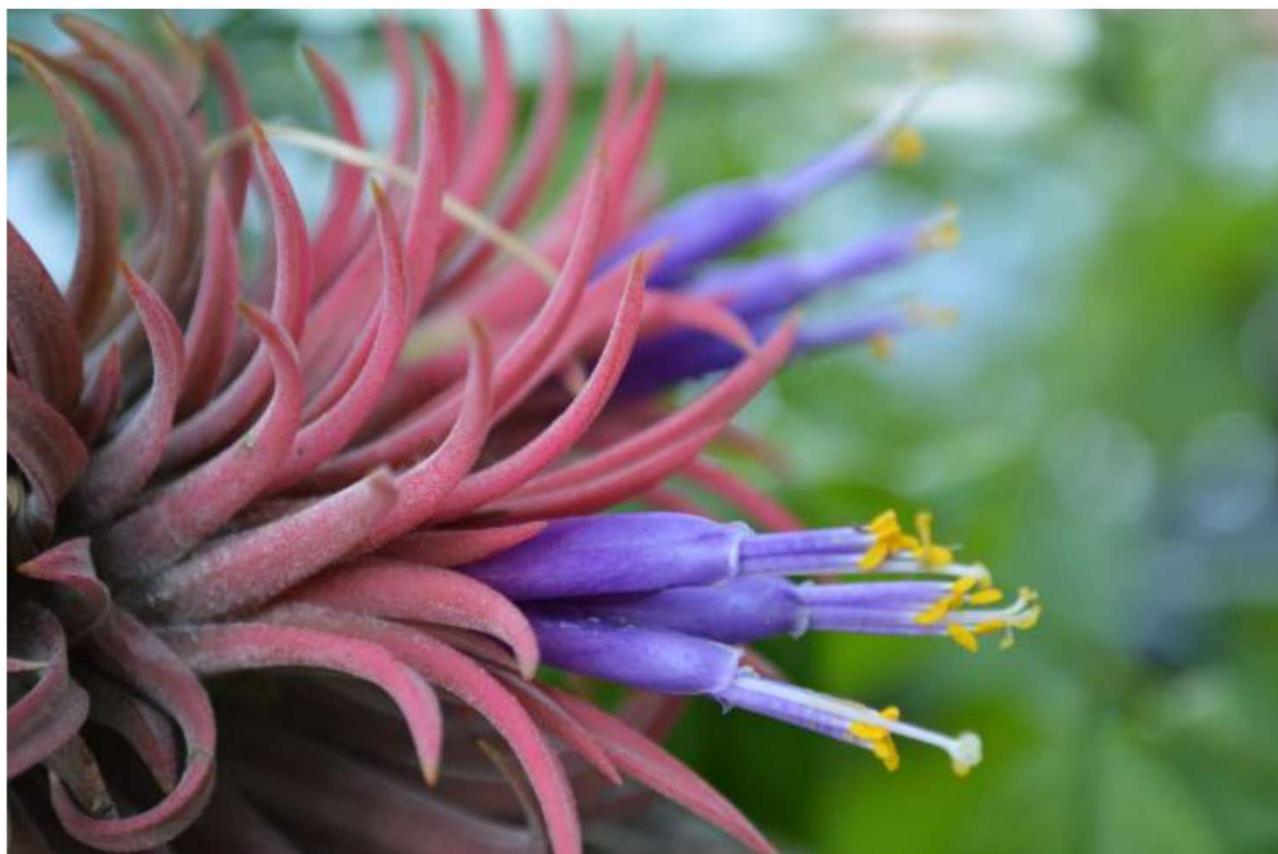




*Ciencia
Nicolaita*

89



diciembre de 2023

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Dra. Yarábí Ávila González

Rectora

Dr. Javier Cervantes Rodríguez

Secretario General

Dr. Jorge Fonseca Madrigal

Secretario Académico

Dr. Edgar Martínez Altamirano

Secretario Administrativo

Dr. Miguel Ángel Villa Álvarez

Secretario de Difusión Cultural
y Extensión Universitaria

Lic. Mónica Gutiérrez Legorreta

Secretario Auxiliar

Dr. Jesús Campos García

Coordinador de la Investigación
Científica

José López Bucio

Editor

Comité Editorial

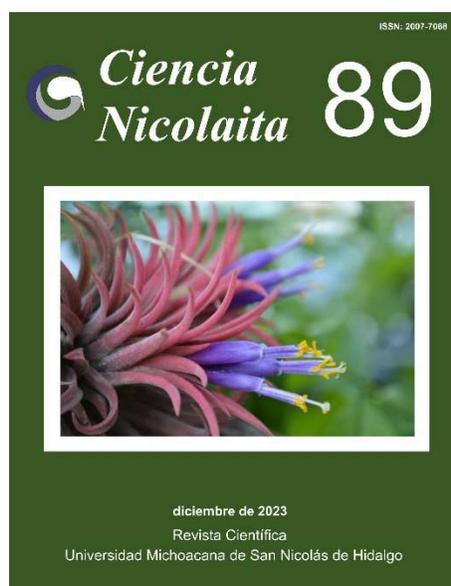
Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, Conacyt – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, Mé-xico; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Uni-versidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambriz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fer-nando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Equipo Editorial: Sergio Ramírez Murillo, Naborina Villaseñor Santoyo.

Administrador página web: Hugo César Guzmán Rivera.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 20007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 89, diciembre de 2023

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Directorio	2
Contenido	3
Presentación	6
José Ruiz Herrera: pilar de la ciencia en México, una trayectoria y una herencia perdurable en su viaje a través de la bioquímica, la microbiología y el mundo de los hongos Roberto Ruiz Medrano https://doi.org/10.35830/cn.vi89.724	8
La epigenética y el cáncer: Terapia epigenética, una alternativa terapéutica Scarlett Ivonne Ortiz Zamora, Renato Nieto Aguilar, Alfonso Characu Rueda Rocha, Cecilia Manuel Jacobo, Juana Araceli Sánchez Moreno y Asdrúbal Aguilera Méndez https://doi.org/10.35830/cn.vi89.716	21
Péptidos pequeños bioactivos en plantas y su papel en el desarrollo y la defensa Adrián Ávalos Rangel, Javier Raya González, José López Bucio https://doi.org/10.35830/cn.vi89.715	33

Cambio de color en las flores y producción asexual de semillas en <i>Fuchsia thymifolia</i> (Onagraceae)	
Cinthy Indira Cervantes Díaz y Eduardo Cuevas García	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.706	44
Los peces de cuevas de México a través de la sistemática filogenética	
Rodolfo Pérez-Rodríguez, Rosa Gabriela Beltrán-López, Omar Domínguez-Domínguez y Juan Manuel Rivas-González	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.690	53
Avifauna del área natural protegida “Reserva estatal Cerro del Águila”, Municipio de Morelia, Michoacán	
Javier Salgado Ortiz, Brenda Elizabeth Arteaga Salgado y José Fernando Villaseñor Gómez	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.723	71
Estado y tendencias sobre la investigación de un humedal al occidente de México	
Esperanza Fuentes-Gutiérrez, Roberto Lindig-Cisneros y Martina Medina-Nava	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.711	92
Análisis termodinámico del proceso de descompresión del gas natural, implementando un tubo vórtex y energía geotérmica	
Luis F. Villalón-López, Carlos Rubio-Maya, Víctor M. Ambriz-Díaz	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.695	114
Evaluación de la difusividad térmica efectiva en el estado transitorio de una geometría fractal para condiciones de temperatura y flujo de calor constantes	
Israel Rosas Yescas, José Eduardo Acosta Cano de los Ríos, Óscar Arturo Chávez López, Carlos Arturo Méndez Herrera y Víctor Manuel Ambriz Díaz	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.696	128
Diseño térmico, mecánico y simulación estructural de un evaporador del tipo coraza y tubos para aplicaciones de baja temperatura en un Ciclo Rankine Orgánico	
Luis Enrique Muro Teruel, Víctor Manuel Ambriz Díaz, Óscar Arturo Chávez López, Israel Rosas Yescas y José Eduardo Acosta Cano de los Ríos	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.701	140
Análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación de marcos para anteojos a partir de herramientas de diseño computacional	
Renato Trejo Moncada, Víctor M. Ambriz-Díaz, Francisco Terán Arévalo	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.703	154
Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición como sustitución de agregado pétreo natural	
C. U. Espino González, W. Martínez Molina, E. M. Alonso Guzmán, H. L. Chávez García y L. A. Morales Rosales	
https://doi.org/10.35830/cn.vi89.704	167

Diseño metódico de un tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda Luis Enrique Ontiveros Rocha, Juan Felipe Soriano Peña, Luis Alberto Valencia Garay, J. Jesús Pacheco Ibarra y Jesús Eduardo Rodríguez Gutiérrez https://doi.org/10.35830/cn.vi89.709	177
Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo Josué Jordi Zavala Morales, Erasmo Cadenas Calderón, Rafael Campos Amezcua https://doi.org/10.35830/cn.vi89.717	196
Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico Neiffe Valencia Calderón, Erasmo Cadenas Calderón y Josué Jordi Zavala Morales https://doi.org/10.35830/cn.vi89.720	208
Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida Luis Manuel Aguayo-Pérez, Dulce Celeste López-Díaz, Julio Armando de Lira-Flores https://doi.org/10.35830/cn.vi89.697	221
Violación de sabor en decaimientos raros del quark top en el modelo Bestest Little Higgs Jorge Isidro Aranda Sánchez, Tzihué Cisneros Pérez, María de los Ángeles Hernández Ruíz y Eligio Cruz Albaro https://doi.org/10.35830/cn.vi89.713	237
El uso de la inteligencia artificial en un entorno académico Luisa Fernanda González Ramírez, Edgar Lenymirko Moreno Goytia y Liliana Márquez Benavides https://doi.org/10.35830/cn.vi89.721	244
Página legal y créditos	256

Presentación

Estimados lectores, este número de *Ciencia Nicolaita* celebra dos acontecimientos de gran relevancia para nuestra comunidad, por una parte, la incorporación como Editores de Sección de los colegas Rosa Elva Norma del Río Torres, Joel Edmundo López Meza, Héctor Eduardo Martínez Flores, Ernesto García Pineda, Francisco Shidartha Guzmán Murillo, José Antonio González Cervera y José María Ponce Ortega, que en equipo con los actuales Editores Martina Medina Nava, Sabina Irene Lara Cabrera, Jeanette Sofía Bayuelo Jiménez, José Miguel Cervantes Alfaro, Luca Tessieri, María Lourdes González Arquerros, Elia Mercedes Alonso Guzmán, Claudio Fuerte Esquivel, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez y Jorge Alejandro Verduzco Martínez, coadyuvarán en los esfuerzos por mantener la periodicidad de la publicación con los más altos estándares. Por otra parte, la merecida jubilación del Ing. Sergio Ramírez Murillo, quién desde la preparación del primer número de la revista, publicado en octubre de 1992, hasta el presente número (diciembre de 2023), fungió de manera ininterrumpida como asistente editorial, maquetando y preparando las versiones finales de los trabajos que comprenden el muy nutrido y valioso acervo de *Ciencia Nicolaita*. Deseamos el mejor de los éxitos al Ing. Ramírez en los nuevos retos y metas que habrá de emprender.

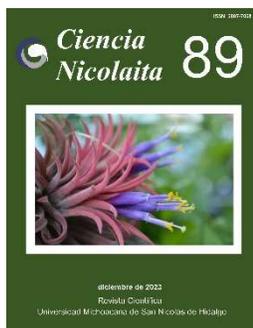
Es también altamente satisfactorio y gratificante presentar los excelentes trabajos de las diferentes áreas de las ciencias biológicas, de la salud, físico-matemáticas e ingenierías, iniciando con el artículo en homenaje al Dr. José Ruíz Herrera, uno de los más grandes microbiólogos mexicanos de nuestro tiempo, así como trabajos originales y de revisión en temas como el cáncer, el funcionamiento de las células vegetales, biodiversidad y estado actual de ecosistemas, de gran relevancia para el cuidado de la salud y el patrimonio natural de México, un país megadiverso.

La influencia de las ciencias exactas y la ingeniería en la vida cotidiana es innegable, baste mencionar el uso de las computadoras y el teléfono celular. Los avances científicos, a veces imperceptibles, cuando se consideran a nivel global, detonan amplias transformaciones a medida que se asimilan y se distribuyen. No es pues de extrañar, que el grado de desarrollo de un país esté aparejado con el grado de tecnificación y con la solidez de su sistema de ciencia y tecnología. Este número incluye trabajos que presentan prototipos novedosos con aplicaciones en el área doméstica, industrial y de servicios. Dichos avances abonan a la sustentabilidad energética, ambiental, así como en las vías de comunicación, en las que el reciclaje de residuos de construcción y demolición se pueden aprovechar para la elaboración de mezclas asfálticas.

Avances recientes en la física de partículas están ligados al estudio del bosón de Higgs. En este número se presenta un modelo como procedimiento para derivar las masas de los bosones y un enfoque más fuerte en el sector de los quarks, embajadores de la nueva física. En la vasta extensión del universo digital, la inteligencia artificial emerge como un faro de progreso, como un cerebro virtual para emular tareas similares a las humanas, ya sea en la toma de decisiones, la detección de patrones o la comprensión del lenguaje. Tan prometedor como polémico, el uso de la inteligencia artificial en el entorno académico plantea retos de enorme actualidad, es imperativo aprovechar su potencial de una manera ética, para mejorar nuestras capacidades en lugar de eclipsarlas.

En esta época de cambio vertiginoso, *Ciencia Nicolaita* habrá de adaptarse para seguir ofreciendo a sus autores una plataforma para la difusión de su trabajo y a sus lectores, lo mejor de los avances científicos y tecnológicos que se suceden cada día.

José López Bucio
Editor



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

José Ruiz Herrera: pilar de la ciencia en México, una trayectoria y una herencia perdurable en su viaje a través de la bioquímica, la microbiología y el mundo de los hongos

José Ruiz Herrera: pillar of science in Mexico, a trajectory and an enduring legacy in his journey through biochemistry, microbiology and the world of fungi

Roberto Ruiz Medrano

Para citar este artículo: Ruiz Medrano Roberto, 2023. José Ruiz Herrera: pilar de la ciencia en México, una trayectoria y una herencia perdurable en su viaje a través de la bioquímica, la microbiología y el mundo de los hongos. Ciencia Nicolaita no. 89, 8-20. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.724>



Historial del artículo:

Recibido: 19 de junio de 2023

Aceptado: 23 de junio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: rmedrano@cinvestav.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



José Ruiz Herrera: pilar de la ciencia en México, una trayectoria y una herencia perdurable en su viaje a través de la bioquímica, la microbiología y el mundo de los hongos

José Ruiz Herrera: pillar of science in Mexico, a trajectory and an enduring legacy in his journey through biochemistry, microbiology and the world of fungi

Roberto Ruiz Medrano

Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, CINVESTAV.

Resumen

El Profesor José Ruiz Herrera fue uno de los científicos más distinguidos de nuestro país, pilar de la bioquímica, la microbiología y el estudio de los hongos, con sus aplicaciones en la medicina y la agricultura. Este artículo rinde homenaje al maestro y a la persona, a través de su trayectoria en diferentes instituciones, en las que contribuyó en la formación y consolidación de grupos y en la transmisión de sus conocimientos a incontables generaciones de estudiantes. A su paso por el Instituto Politécnico Nacional, la Universidad de Rutgers, la Universidad de Guanajuato, el CINVESTAV, y sus colaboraciones con destacados colegas dentro y fuera de nuestro país, sus descubrimientos sobre la estructura de la pared celular, las bases moleculares de la diferenciación y su papel en el ciclo biológico, la importancia de la simbiosis y sus aplicaciones en actividades humanas, quedan como un legado para las generaciones venideras. El Dr. Ruiz Herrera también será recordado como un excelente maestro, sumamente generoso y siempre preocupado no sólo por el desarrollo académico de sus estudiantes, sino por su bienestar. Su trato respetuoso hacia ellos es otro de sus múltiples legados y nos recuerda que el éxito académico está profundamente ligado a la relación maestro-alumno.

Palabras clave: Pared celular, diferenciación, dimorfismo, hongos, simbiosis.

Abstract

Professor José Ruiz Herrera was one of the most distinguished scientists in our country, a pillar of biochemistry, microbiology and the study of fungi, with their applications in medicine and agriculture. This article pays tribute to the teacher and the person, through his career in different institutions, in which he contributed to the formation and consolidation of groups and the dissemination

of knowledge to countless generations of students. During his time at the National Polytechnic Institute, Rutgers University, the University of Guanajuato, CINVESTAV, and his collaborations with outstanding colleagues inside and outside our country, his discoveries on the structure of the cell wall, the molecular basis of differentiation and its role in the biological cycle, the importance of symbiosis and its applications in human activities are a legacy for generations to come. Dr. Ruiz Herrera will also be remembered as an excellent teacher, extremely generous and always concerned not only for the academic development of his students, but for their well-being. His respectful treatment towards them is another of his many legacies and reminds us that academic success is deeply linked to the teacher-student relationship.

Keywords: Cell wall, differentiation, fungal dimorphism, fungi, symbiosis.

José Ruiz Herrera: el científico, el maestro y el alumno

El Profesor José Ruiz Herrera, uno de los científicos más distinguidos de nuestro país, obtuvo una beca del Departamento de Estado de los Estados Unidos, para realizar su doctorado en el campo de la bioquímica microbiana en la Universidad de Rutgers, en Nueva Jersey. Se trataba de una sola beca por la que concursaron 300 aspirantes. Gracias a sus trabajos pioneros en diferentes ramas de la microbiología y bioquímica, fue galardonado con el Premio de la Academia Mexicana de Ciencias en 1975, el Premio Ruth Allen de la Sociedad Fitopatológica Americana en 1983, el Premio Nacional de Ciencias y Artes en el área de Ciencias Exactas y Naturales en 1984, la Presea Lázaro Cárdenas del Instituto Politécnico Nacional en 1991, y la Presea Miguel Hidalgo y Costilla, que otorga el Congreso del Estado de Guanajuato en 1993. Fue Investigador Emérito del Sistema Nacional de Investigadores y del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, presidente de la Asociación Mexicana de Microbiología, y de la Sociedad Mexicana de Bioquímica. A pesar de la enorme magnitud de su obra científica, académica y de formación y consolidación de grupos, siempre se distinguió por su profunda y sincera modestia; en algunas entrevistas mencionaba que, a diferencia de otros científicos notables, de niño no mostró un especial interés por la ciencia, y menos aún contaba con un laboratorio en casa en el que hubiese podido realizar experimentos.

Cuando se busca una causa o un talento especial para explicar tan brillante trayectoria, se podría argu-

mentar una enorme capacidad de aprendizaje, aunada al trabajo disciplinado y constante que distinguía al Dr. Ruíz, como le llamaban sus colegas y discípulos. Una breve anécdota al respecto: se cuenta que, contando con apenas 10 años, su madre lo envió a visitar a una prima en Magozal, en el norte de Veracruz. El esposo de su prima, para mantenerlo entretenido, le enseñó a jugar damas españolas. No sólo aprendió rápidamente el juego, sino que derrotó a su maestro repetidamente, lo que le causó gracia (aunque él mismo comentaba que algo reprimida). Esto no le hizo tanta gracia a su maestro, lo que provocó el regreso prematuro a la Ciudad de México. Nunca dejó de aprender, algo que muchos tuvimos la fortuna de atestiguar de manera muy cercana. Esa aptitud para aprender, para transmitir conocimientos abstractos, así como siempre sentir curiosidad por la ciencia, seguramente influyó en su extraordinaria capacidad como investigador y como maestro.

José Ruiz Herrera nació en la Colonia Roma, en la Ciudad de México, el 12 de mayo de 1935. Siendo el hijo menor de la familia, ingresó a la Vocacional del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en donde se interesó por la microbiología, y, en general, por la ciencia, en ese entonces una actividad bastante joven en México. Es de recordarse, que la carrera de investigador científico, tal como la conocemos ahora, era bastante inusual, y sólo se ofrecían especialidades o posgrados en áreas científicas en la Ciudad de México.

Vocacional del Instituto Politécnico Nacional

Ya para concluir sus estudios de secundaria, el plantel número 10 en la Ciudad de México organizó



una serie de conferencias acerca de las posibilidades de realizar estudios universitarios. José Ruiz Herrera, como tantos estudiantes a esa edad, no estaba seguro qué carrera seguir, aunque tenía claro continuar con sus estudios. Como él mismo narró en una entrevista, fueron las conferencias mencionadas anteriormente las que mayor influencia tuvieron en su formación temprana. En particular, le impresionaron las pláticas de un médico veterinario en torno a la microbiología, lo que incidió profundamente en su decisión de estudiar una carrera relacionada con esta disciplina. Este tema le entusiasmó tanto que decidió entonces ingresar a la Escuela Vocacional número 4 del Instituto Politécnico Nacional (IPN), que entonces se encontraba en el Casco de Santo Tomás y que ofrecía carreras técnicas relacionadas con química y biología.

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas

Posteriormente, ingresó a la escuela nacional de Ciencias Biológicas (ENCB), del mismo IPN, para estudiar la carrera de Químico Bacteriólogo Parasitólogo (QBP). La ENCB, fundada en 1934 y después incorporada al IPN, contaba entonces con excelentes maestros, que reafirmaron su interés por la microbiología, así como por la bioquímica. En sus aulas recibió clases del Dr. Guillermo Carvajal Sandoval, precisamente de bioquímica, y del Dr. Adolfo Pérez Miravete, de inmunología. Otros profesores notables fueron Juan de Oyarzábal, quien impartía Física. El maestro Oyarzábal era miembro de la comunidad de españoles refugiados en México tras la guerra civil, y, aparte de ser un excelente maestro, era aficionado al esperanto. Incluso organizó una visita de los estudiantes de su clase a una plática que impartió Tibor Sekelj, el decano de este lenguaje a nivel mundial, a su paso por México. Cabe mencionar que fue el mejor estudiante de su generación, dándose tiempo para el deporte, ya que jugó fútbol americano a nivel colegial con los Búhos de la escuela de Medicina. Siempre siguió con interés a los equipos de fútbol americano del IPN, a los que apoyaba incondicionalmente, aun cuando sus sobrinos llegaron a jugar para el equipo de la UNAM, enconados rivales.

Un maestro que tuvo una importante influencia en el Dr. Ruiz Herrera fue Carlos Casas Campillo, quien fue su profesor de microbiología. El maestro Casas

Campillo lo recomendó para realizar una estancia en la compañía farmacéutica Syntex, en la que posteriormente laboró como Químico Asociado en Investigación. Asimismo, continuó colaborando con el maestro Casas Campillo, de 1959 a 1960 (ya habiendo concluido sus estudios de licenciatura), en el uso de hongos para realizar reacciones bioquímicas para la síntesis de esteroides, compuestos con una gran gama de aplicaciones médicas y farmacéuticas. Estos compuestos, así como una vasta mayoría de moléculas biológicas, son asimétricos, y pueden adquirir dos conformaciones, una de las cuáles es imagen especular de la otra. Sólo una conformación es biológicamente activa, y, como lo descubrió Pasteur, los seres vivos son capaces de producir y de distinguir una conformación de la otra. Por otra parte, la síntesis química de dichos compuestos resulta en una mezcla de ambas conformaciones, lo que hace que los compuestos así obtenidos sean menos eficaces. Es por esto que se usan microorganismos para la síntesis de moléculas con una orientación espacial determinada, es decir, con una disposición de sus átomos en el espacio definida; Syntex fue pionera en el uso de esta estrategia para la obtención de compuestos con actividad biológica utilizando microorganismos como catalizadores. El maestro Ruiz Herrera siempre mostró interés por este tema, la asimetría intrínseca de las moléculas biológicas, y, por extensión, de los sistemas vivos; por ejemplo, reacciones químicas que llevan a cabo las células que dependen no solo de los reactantes, sino de su disposición espacial (reacciones vectoriales). Asimismo, se interesaba por estos y otros aspectos básicos de la microbiología, con los que lograba despertar el interés por esta disciplina, y en general por la ciencia, en estudiantes jóvenes (incluyendo a quien esto escribe).

Universidad de Rutgers

El maestro Casas Campillo había estudiado en la Universidad Estatal de Nueva Jersey, en Rutgers, bajo la dirección de Selman Waksman, ganador del premio Nobel de Medicina y Fisiología, por el descubrimiento de la estreptomycin y otros antibióticos, y fue quien lo animó a realizar estudios de posgrado en dicha universidad. Para ello debió concursar por una beca del Departamento de Estado, que, como se mencionó anteriormente, logró obtener. Para entonces ya había

contraído matrimonio con Carmen Medrano, quien se reunió con él al poco tiempo (**Fig. 1**).



Figura 1. José Ruiz Herrera y Carmen Medrano, New Brunswick, Nueva Jersey, 1961. Crédito: colección de la familia Ruiz Medrano.

Aprobó el examen predoctoral para desarrollar su tesis sobre la disimilación de la metionina por un hongo del suelo, bajo la dirección del Dr. Robert L. Starkey, un distinguido profesor en el Departamento de microbiología agrícola. Este aminoácido no es utilizado como sustrato para su crecimiento por la gran mayoría de los hongos, y hasta entonces su disimilación (es decir, su degradación), sólo había sido observada *in vitro* utilizando extractos libres de células o bien bacterias que tenían otras fuentes de carbono, pero no hongos. Este trabajo es importante pues demostró que esta molécula, y otras que normalmente no son utilizadas como nutrientes, pueden de cualquier manera ser catabolizadas por hongos de suelo (Ruiz-Herrera y Starkey, 1969). Asimismo, despertó su interés, que sería permanente, por la bioquímica microbiana, en particular de hongos. Durante el desarrollo de su tesis mostró una gran independencia de criterio, por lo que al inicio no consultaba frecuentemente al Dr. Starkey sobre los experimentos a realizar. Esto no fue del agrado del Profesor Starkey, pues

suponía, erróneamente, que no estaba trabajando lo suficiente en el laboratorio, pero tras mostrar sus resultados quedó gratamente impresionado por sus avances. Su tesis doctoral le valió el reconocimiento al mejor trabajo en el Departamento de Microbiología de la Universidad de Rutgers en 1963, año en que concluyó su tesis.

De regreso a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas

Ese mismo año regresó a México para incorporarse a la planta de profesores de la ENCB en el Departamento de Microbiología. Es necesario mencionar que, en ese entonces, la ciencia era una actividad con un muy bajo nivel de institucionalización en México; la investigación científica era llevada a cabo sobre todo en universidades públicas, como una actividad más bien marginal y periférica con respecto a la docencia. El maestro Ruiz Herrera comentaba, en parte en broma, que el único equipo de laboratorio con el que contaba a su arribo a la ENCB era un banco para colocar sus libros. No obstante, continuó sus investigaciones centradas en las rutas de descomposición y asimilación de moléculas biológicas por hongos y bacterias. Asimismo, impartió cursos de bioquímica microbiana, famosos en la ENCB por su grado de dificultad; sin embargo, la fama del curso se debía también a la capacidad del Maestro Ruiz Herrera de transmitir su vasto conocimiento de este tema y muchos otros a sus alumnos, y además, inducirlos a encontrar la lógica en esta disciplina, y, más generalmente, en la ciencia.

En 1966, inició una estancia sabática en la Universidad de California en San Diego, con el Profesor John A. DeMoss, en donde estudió los mecanismos de reducción de nitrato en *E. coli*. El trabajo que desarrolló indicó la existencia de un complejo multienzimático asociado a membrana, involucrado en este proceso (Ruiz-Herrera y DeMoss, 1969), lo que fue confirmado posteriormente por otros grupos. Regresó a su alma mater en 1968, y posteriormente concentró sus esfuerzos en la organización del Congreso Internacional de Microbiología en la Ciudad de México, para el cual atendió congresos realizados por diversas sociedades de microbiología en Europa, Estados Unidos y Sudamérica, con el fin de invitar a ponentes potenciales. El congreso tuvo lugar en la Ciudad de México en 1970,

y fue, de acuerdo con muchos de sus asistentes, un gran éxito.

El maestro Ruiz Herrera no fue ajeno al movimiento estudiantil de 1968. Un estudiante de la ENCB lo invitó al mitin estudiantil programado para el fatídico 2 de octubre de 1968 en la Plaza de las Tres Culturas en Tlatelolco. Afortunadamente, llegó tarde, lo que probablemente lo salvó de sufrir mayores consecuencias. Sin embargo, durante la ocupación de las principales escuelas del IPN (incluida la ENCB) por el ejército, una incubadora que se encontraba junto a la ventana de su laboratorio fue dañada por un disparo de bala. A diferencia de otros laboratorios, el suyo no fue vandalizado probablemente gracias a un letrero que colocó a la entrada, advirtiendo de peligro de muerte por la presencia de microorganismos altamente virulentos. Cabe suponer que tuvo un efecto disuasorio en las fuerzas que ocupaban el IPN.

Universidad de California en Riverside

Poco tiempo después comenzó una muy fructífera colaboración con el Profesor Salomón Bartnicki García, de la Universidad de California en Riverside (**Fig. 2**), y quien era egresado también de la ENCB, y además había realizado su doctorado en Rutgers, poco antes que el Maestro Ruiz Herrera.

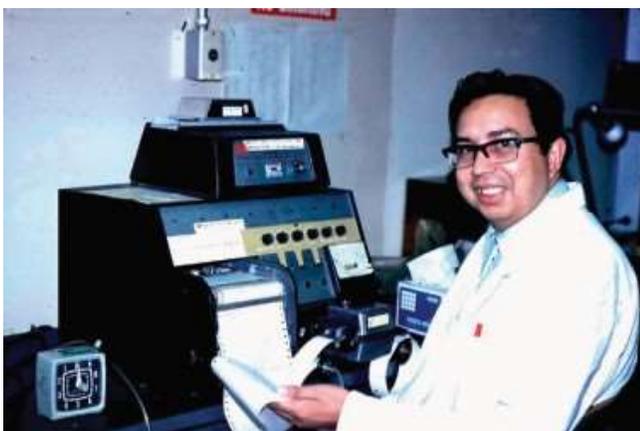


Figura 2. José Ruiz Herrera, Universidad de California en Riverside, 1973. Crédito: Dr. Salomón Bartnicki García.

El trabajo del Dr. Bartnicki se centraba en los mecanismos de germinación y crecimiento de hongos, especialmente en el zigomiceto *Mucor rouxii*. Un problema que les interesaba estudiar, y que tiene profun-

das implicaciones prácticas, versa sobre los mecanismos de síntesis de pared en hongos, y en particular de un componente estructural de la misma, la quitina. La pared de los hongos está conformada principalmente por dos polímeros, uno altamente ramificado y otro lineal. El primero es un componente amorfo, que son las glucanas, y el segundo, de naturaleza fibrilar, es la quitina. En las plantas, otro grupo de organismos con pared celular, el material amorfo son también las glucanas y el fibrilar es la celulosa. La cutícula de insectos también está conformada por quitina, lo que es indicativo de su importancia; de hecho, después de la celulosa es el polímero biológico más abundante en la naturaleza. El maestro Ruiz Herrera comparaba la pared de hongos con el concreto armado; en éste, el material amorfo, o cementante, es precisamente el cemento, que le confiere resistencia mecánica a la ruptura, mientras que el fibrilar, es decir, las varillas, aportan resistencia a la deformación.

Hacia principios de los años 70 se sabía que la quitina era producida en forma de microfibrillas, pero los detalles de su síntesis se desconocían casi por completo. El trabajo pionero de Ruiz Herrera y Bartnicki García demostró que la síntesis de quitina podía replicarse *in vitro* por la forma soluble de la enzima quitina sintasa (Ruiz-Herrera y Bartnicki-García, 1974). Este hallazgo demostró la localización subcelular de la síntesis del componente fibrilar de la pared de los hongos, y, de manera destacada, fue la primera vez que se logró la síntesis de un polímero de la pared celular *in vitro*. Esto es particularmente importante desde un punto de vista de salud humana, puesto que las infecciones causadas por hongos en animales y humanos son sumamente difíciles de controlar, por presentar pocos sitios "blanco" que son susceptibles a fármacos o medicamentos. Esto a su vez se debe a que el metabolismo primario de hongos es muy parecido al de animales (y evidentemente al de humanos), pero la síntesis de quitina es específica de hongos, por lo que un conocimiento detallado de este proceso puede contribuir al desarrollo de fármacos conducente al control de infecciones fúngicas. Desde un punto de vista básico, contribuyó a entender el proceso de síntesis de pared en hongos. Este trabajo, publicado en la prestigiosa revista *Science*, fue resaltado en la portada de la revista en mayo de 1974 (una de las pocas que han obtenido investigadores mexicanos), y, aunado a su ya destacada trayectoria científica, le condujo a obtener

el Premio de la Academia Mexicana de Ciencias en 1975, que se otorga a investigadores jóvenes.

Centro de Investigación y Estudios Avanzados

En 1976, Ruiz Herrera se incorpora al Departamento de Genética y Biología Molecular del CINVESTAV del IPN, Unidad Zacatenco, si bien continuó impartiendo clases de bioquímica microbiana en la ENCB. Es en este período que, en colaboración con Bartnicki y con Charles Bracker, de la Universidad de Purdue, descubrió que la síntesis de quitina era llevada a cabo por unos organelos nuevos que fueron denominados quitosomas (Bracker *et al.*, 1976). De acuerdo con sus hallazgos, estos organelos vesiculares contenían la enzima responsable de la síntesis de quitina, en donde ocurría este proceso, antes que las fibrillas se depositasen en la superficie de la célula, en donde se ensamblaban de manera espontánea. Años después, demostró la existencia de proteínas que contribuyen a entrelazar dichas cadenas de quitina y así refuerzan la pared celular. Sin embargo, proponentes de un modelo alternativo sostenían vehementemente que la quitina sintasa se localizaba en la membrana, tras su transporte por la vía clásica (es decir, a través del retículo endoplásmico y aparato de Golgi), en donde ocurría la síntesis de quitina. Si bien este debate era sobre todo académico, como se ha mencionado anteriormente, tenía profundas implicaciones prácticas, pues conocer el sitio donde ocurre la producción de este polímero, responsable de la gran resistencia de los hongos a diferentes tipos de estrés, era importante para el desarrollo de fármacos que pudiesen inhibir este proceso (considerando el caso de infecciones fúngicas en humanos). El debate quedó finalmente zanjado en 2007, con el trabajo del grupo de la Dra. Meritxell Riquelme del Centro de Investigaciones Científicas y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Sus resultados demostraron de manera inequívoca, utilizando quitina sintasa fusionada a una proteína fácilmente detectable (la proteína verde fluorescente, o GFP), que dicha enzima se localiza en los quitosomas, que no se transportan a la membrana por la ruta clásica ya mencionada, y es en estas vesículas en donde ocurre la síntesis de quitina (Riquelme *et al.*, 2007). Aunque el debate fue en ocasiones des-

gastante para el maestro Ruiz Herrera, su eventual resolución le satisfizo grandemente, si bien ya hacía tiempo que se había concentrado en otros problemas biológicos, pero siempre relacionados con hongos, y muy frecuentemente con la estructura y síntesis de pared en estos organismos.

Un hallazgo importante realizado en este período fue que los quistes de amibas (estructuras de resistencia análogas a las esporas) poseen quitina, lo que sugeriría, además de nuevos mecanismos de control de la amibiasis, que este componente es más generalizado de lo que se pensaba en las matrices extracelulares de diferentes organismos (Arroyo-Begovich *et al.*, 1980).

Instituto de Investigaciones en Biología Experimental

Un problema recurrente en la incipiente ciencia en nuestro país, hasta finales de la década de los 70s, era su centralización en la Ciudad de México, lo que evidentemente ocurría en todos los niveles de la vida pública. El Dr. Manuel Ortega, director del CINVESTAV en ese entonces, propuso al maestro Ruiz Herrera, ya como jefe del Departamento de Genética y Biología Molecular, contribuir con la descentralización de la investigación científica. Esto se realizaría por medio de un convenio con una universidad receptora fuera de la Ciudad de México que contrataría a profesores del CINVESTAV, a los que pagaría parte del sueldo, y el resto lo haría el CINVESTAV. A fin de cuentas, el convenio fue firmado con la Universidad de Guanajuato, gracias en buena parte a la visión y gestiones y del Ingeniero David Guerra Carrillo, director en ese entonces de la Facultad de Química, y fallecido prematuramente poco después. Así comenzó en 1980 una etapa productiva y feliz que se prolongó por 10 años, aderezada con frecuentes estancias en España. En marzo de 1981, se crea formalmente el Instituto de Investigaciones en Biología Experimental (IIBE) de la Facultad de Química, que ofreció un doctorado en ciencias por primera vez fuera de la Ciudad de México. El IIBE amplió notablemente las perspectivas para egresados de la carrera de Químico Farmacobiólogo (QFB) de la Universidad de Guanajuato, pues les permitió realizar estudios de posgrado e introducirse en la actividad científica.



A principios de esta década el maestro Ruiz Herrera comienza a interesarse por el fenómeno del dimorfismo en hongos, relacionado con la capacidad que tienen de crecer en forma levaduriforme, es decir, como organismos unicelulares, en ciertas condiciones, pero en otras como organismos multicelulares filamentosos, formando micelio. Nuevamente, este fenómeno tiene implicaciones prácticas importantes, ya que diversos hongos patógenos, tanto de animales como de plantas, son inoos cuando se desarrollan como micelio, pero son patogénicos como levaduras. Tal es el caso de los patógenos humanos *Candida albicans* e *Histoplasma capsulatum*. El caso opuesto típico es el del patógeno del maíz *Ustilago maydis*, o huitlacoche, que como levadura no es infeccioso, pero sí que lo es como micelio. Sin embargo, el interés del maestro Ruiz Herrera por este proceso era conocer con mayor detalle la diferenciación celular, proceso por el cual una célula puede multiplicarse, dando lugar a células especializadas, y, en el caso de organismos multicelulares, tejidos y órganos con funciones específicas.

El problema de la diferenciación ha atraído y sigue atrayendo a una buena cantidad de investigadores, ya que es fundamental en biología, y para el que se han propuesto muchos modelos para tratar de comprenderlo. Utilizando a *M. rouxii* y obteniendo mutantes incapaces de llevar a cabo la transición dimórfica, demostró cuáles pueden ser los inductores de dicha transición, tanto los efectores ambientales como las

rutras por las que ocurre la transición (Ruiz-Herrera, 1985). Relacionado con lo anterior, descubrió que las poliaminas, moléculas biológicas polifuncionales involucradas en una gran diversidad de procesos, son capaces de inducir la transición dimórfica, posiblemente a través de la modificación de la actividad de genes específicos por medio de la metilación del DNA. En paralelo, realizó investigaciones acerca de los mecanismos de síntesis de pared en hongos, en las que pudo sintetizar *in vitro* el componente cementante de la pared celular, las glucanas y revelar su ruta de síntesis. Aunado a lo anterior demostró la presencia de quitosomas en diversas especies, lo que demostraba la generalidad de dichos organelos. Investigó asimismo la respuesta a luz en *Phycomyces blakesleeanus*, un hongo que produce una estructura reproductiva que porta esporas (esporangióforo), y que es notable por su tamaño (puede alcanzar varios centímetros de longitud) y por su comportamiento, ya que esta estructura es capaz de salvar objetos aun en ausencia absoluta de luz u otras pistas físicas o químicas (Herrera-Estrella y Ruiz-Herrera, 1983).

Por su destacada trayectoria científica le fue otorgado el Premio Ruth Allen, de la Sociedad Fitopatológica Americana, en 1983, junto con el Dr. Bartnicki García y el Dr. Charles Bracker (con quien colaboró en el descubrimiento de los quitosomas) (**Fig. 3**), y el Premio Nacional de Ciencias en el área de Ciencias Exactas y Naturales en 1984. En 1989, es galardonado con la medalla al Mérito Microbiológico de la Asociación



Figura 3. José Ruiz Herrera, Salomón Bartnicki García y Charles Bracker, durante la recepción del Premio Ruth Allen, Ames, Iowa, 1983. Crédito: Salomón Bartnicki García.

Mexicana de Microbiología, otorgado conjuntamente por la Secretaría de Salud y la Embajada de Francia.

España

En 1969, durante su peregrinaje por diversos países con el fin de invitar a potenciales ponentes al Congreso Internacional de Microbiología, estableció contacto con grupos científicos en España, en particular con el distinguido microbiólogo Julio Rodríguez Villanueva, eventualmente rector de la Universidad de Salamanca. Su grupo incluía a investigadores con quienes estableció una colaboración muy estrecha: Rafael Sentandreu, Germán Larriba y Ángel Domínguez, sobre los mecanismos de síntesis de la pared celular en hongos. Dicha colaboración derivó en una amistad muy cercana entre ellos. Otro colaborador muy estrecho en España fue el Dr. Enrique Cerdá Olmedo, de la Universidad de Sevilla, con quien investigó los mecanismos de síntesis de pared celular de *P. blakesleanus* y su relación con la respuesta a luz. Realizó estancias en Badajoz, Salamanca, Sevilla y Valencia, así como estancias sabáticas en esta última ciudad, que disfrutó enormemente.

Le atraía sobremanera viajar en España en compañía de su esposa, un país con el que desarrolló un vínculo especial. En su oficina mostraba orgulloso un escobillón que utilizó para lavar tubos de ensaye, tanto en su laboratorio como durante sus estancias en España. Además de diseñar y llevar a cabo experimentos de manera entusiasta, lavaba el material que utilizaba precisamente con ese escobillón. Para él simbolizaba el valor del trabajo duro en el laboratorio y en general en la ciencia.

CINVESTAV Unidad Irapuato

En 1991 decide dejar la Universidad de Guanajuato e incorporarse al Departamento de Ingeniería Genética de Plantas del CINVESTAV, Unidad Irapuato (**Fig. 4**). Como parte de la estrategia descentralizadora de la actividad científica en México, y en particular del CINVESTAV, se crearon unidades o Campus en diversas partes del país, inicialmente en Mérida en 1980, y después en Irapuato en 1981. Le siguieron posteriormente unidades en Guadalajara, Saltillo, Monterrey, Querétaro y Tamaulipas. Aquí comenzó una nueva etapa, igualmente productiva, y también en términos



Figura 4. El maestro Ruiz Herrera en su laboratorio, 2016. Crédito Claudia León Ramírez.

generales, muy feliz (**Fig. 5**). Si bien continuó investigando la estructura de la pared celular de los hongos, así como los mecanismos por los que se modula su síntesis, comenzó la búsqueda de nuevos modelos para el estudio de este fenómeno, uno de sus temas predilectos, así como la diferenciación celular.

Los modelos que seleccionó fueron *Yarrowia lipolytica* y *U. maydis*, o huitlacoche. *Y. lipolytica* es otro hongo dimórfico, utilizado en la industria alimenticia como importante fuente de lipasas (enzimas que degradan lípidos). De manera análoga a *M. rouxii*, el grupo del maestro Ruiz Herrera demostró que las poliaminas inducen la transición levadura-micelio en *Y. lipolytica*, y la ruta del AMP cíclico, un segundo mensajero universal en virtualmente todos los sistemas



Figura 5. Salomón Bartnicki García, José Ruiz Herrera y Rafael Sentandreu, CINVESTAV Irapuato, 2015.



biológicos, está igualmente involucrada en dicho proceso (Guevara-Olvera *et al.*, 1993). Estos resultados indicaban que las poliaminas actúan como un regulador general del desarrollo en hongos y muchos otros organismos. Otro trabajo del grupo demostró la importancia del dimorfismo en especies fúngicas como *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*, que es un importante problema en el manejo postcosecha de maíz, entre otros cultivos agrícolas. Estos hongos infectan granos de maíz en ciertas condiciones de almacenamiento, contaminándolos con aflatoxinas, compuestos que al ser ingeridos pueden causar malformaciones y cáncer, entre otros efectos. Se demostró que las aflatoxinas son sintetizadas únicamente durante la esporulación del hongo, y en respuesta a poliaminas; de manera crucial, inhibidores de la síntesis de estos compuestos inhibían también la producción de aflatoxinas (Guzmán de Peña y Ruiz-Herrera, 1997).

Por otra parte, *U. maydis* infecta maíz y teosinte, el pariente silvestre y muy probable precursor del maíz. A diferencia de otros hongos fitopatógenos, *U. maydis* no mata a la planta que infecta, sino que induce tumores, o crecimientos anormales en las mazorcas. Tales tumores están repletos de las esporas del hongo y, vale la pena agregar, constituyen un manjar en México (aunque en otros países es considerado una plaga). Este hongo es dimórfico, y la forma infecciosa es el micelio. El maestro Ruiz Herrera elucidó los mecanismos por los que *U. maydis* se desarrolla como levadura y como micelio, que eran semejantes a los hallazgos en *M. rouxii*, sin embargo, encontró que hay factores adicionales, como ácidos grasos del huésped y su producto metabolizado por el hongo, acetato, que inducen la transición dimórfica. Su grupo también demostró que el ciclo reproductivo del hongo podía replicarse *in vitro*, inducido por compuestos difusibles de células de maíz. El conocer cómo ocurre dicha transición es muy útil para optimizar este proceso, considerando el valor de *U. maydis* como un alimento de alto valor nutritivo. Por otra parte, debido al valor de *Arabidopsis thaliana* como modelo (por la existencia de mutantes en virtualmente todos los genes que codifican proteínas, facilidad de transformación genética, ciclo de vida muy estudiado, y reducidas dimensiones), se hipotetizó que podría ser también un modelo para el estudio de la infección por parte de *U. maydis*. En efecto, se demostró que esta planta es un huésped alternativo para el hongo, pues es capaz de penetrar a través de

los espacios intercelulares e induce síntomas visibles, incluyendo cambios en la arquitectura de las raíces (Méndez-Morán *et al.*, 2005). Además, demostró que puede infectar otras especies, como el sorgo.

Durante los estudios realizados en *U. maydis*, el maestro Ruiz Herrera y su grupo observaron dos fenómenos, que ojos menos acuciosos hubieran ignorado o descartado como artefactos experimentales. Estos, como se verá más adelante, parecen tener la misma causa. Cuando se cultiva a *U. maydis* en medio sólido en condiciones estériles, se observan normalmente colonias regulares del hongo fácilmente identificables. Sin embargo, frecuentemente aparecen colonias mucho más pequeñas, de aspecto bacteriano (a las que un miembro del grupo, el Dr. Lorenzo Guevara Olvera, bautizó con el apodo de *Ustilaguín*), en condiciones en las que no debería haber crecimiento más que del hongo. Por otra parte, de manera más bien accidental, se encontró, en colaboración con el Dr. Juan José Peña, del Departamento de Bioquímica del CINVESTAV Irapuato, que *U. maydis* es capaz de fijar nitrógeno.

Esto es sorprendente puesto que sólo las bacterias son capaces de realizar esta hazaña bioquímica. Si bien el nitrógeno es el componente principal de la atmósfera (casi 80%), esta molécula es difícil de asimilar. Las bacterias requieren una enzima, la nitrogenasa, para romper los enlaces que mantienen unidos entre sí a los dos átomos de la molécula de nitrógeno, amén de condiciones anaerobias. Esto comienza entonces el proceso de utilización del nitrógeno, que ya en forma de amoníaco o nitrato puede ser utilizado por otros organismos, por ejemplo, las leguminosas en simbiosis con la bacteria *Rhizobium*, para la obtención de aminoácidos y proteínas. Sin embargo, no hay evidencia de la presencia de esta enzima en ningún eucariote estudiado a la fecha, y aquellos que son capaces de fijar nitrógeno lo hacen únicamente en simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno. Por lo tanto, la hipótesis de presencia de un gen para nitrogenasa en *U. maydis* fue pronto descartada; lo que se descubrió fue que este hongo alberga al menos una bacteria endosimbionte, capaz de fijar nitrógeno, lo que explicaba esta habilidad (Ruiz Herrera *et al.*, 2015).

Los resultados más recientes de su grupo revelaron un escenario más complejo, pues resulta que *U. maydis* puede albergar otras bacterias endosimbiontes, y

se encontró que la población de endófitos puede variar entre diferentes aislados del hongo. De hecho, el grupo del maestro Ruiz Herrera demostró que algunos aislados no son capaces de fijar nitrógeno. Esto es consistente con el hecho que las principales especies bacterianas alojadas en los aislados de *U. maydis* que no parecen fijar nitrógeno, carecen del gen de la nitrógenasa. Más intrigante aun es el hecho que el hongo no sobrevive al tratamiento con antibióticos cuyo blanco son únicamente bacterias. Esto indica que los endosimbiontes son necesarios para la viabilidad de *U. maydis*, y no sólo para fijar nitrógeno. La siguiente etapa en esta investigación, que dejó trazada el maestro Ruiz Herrera, era determinar el papel preciso de dichos endosimbiontes en la viabilidad del hongo. Dos trabajos relacionados con estos temas se encuentran en la fase final de su preparación, que serán un homenaje merecido a su trayectoria perdurable.

En este período, probablemente el más fructífero de su distinguida carrera académica, recibió varios reconocimientos, como la Presea Lázaro Cárdenas, que otorga el IPN a egresados distinguidos en 1991; el emeritazgo de parte del Sistema Nacional de Investigadores en 1992, en el que colaboró en su creación y fue miembro de la primera comisión dictaminadora en 1984; la Presea Miguel Hidalgo y Costilla en 1993, que otorga el Congreso del Estado de Guanajuato; y el título de Investigador Emérito del CINVESTAV, en 2007. A pesar de ser Investigador Emérito y por lo tanto no estar obligado a asistir cotidianamente, el maestro Ruiz Herrera continuó desarrollando investigación de manera normal, e impartiendo el curso de bioquímica en la maestría en el programa de posgrado del CINVESTAV Irapuato. Este curso lo preparaba todos los años de manera sumamente cuidadosa y responsable (nunca pospuso sus clases), siempre incluyendo los artículos y desarrollos científicos más recientes en el tema. En sus clases también se discutían resultados aparentemente extraordinarios, publicados en las revistas de mayor impacto (algunos de los cuales no resistían un escrutinio cuidadoso); su análisis en clase permitía un mejor conocimiento del proceso del razonamiento y la investigación científica, pues daba más importancia al proceso de aprendizaje que a la memorización de *factoides*. Su capacidad de transmitir temas complejos en clase y en sus conferencias de divulgación se debieron en parte a su cultura

enciclopédica; siendo capaz de crear analogías que hacían el conocimiento mucho más accesible.

El maestro Ruiz Herrera se preocupaba por una mayor difusión de la ciencia, en particular en un país como México, con poca tradición científica y en el que una buena parte de la población profesa un pensamiento mágico de manera muy fervorosa. Impartió conferencias para divulgación de la ciencia, y compartió sus conocimientos con productores de maíz para la producción de huitlacoche. También escribió libros de temática similar en el área de microbiología, y especializados publicados por editoriales científicas de prestigio acerca de la estructura de la pared celular y la síntesis de quitina en hongos, así como del papel de las poliaminas en el desarrollo.

Epílogo

El maestro Ruiz Herrera es y será reconocido por su labor científica, y también por su papel en el desarrollo de la ciencia en México durante su fructífera trayectoria (**Fig. 6**). Le preocupaba que la ciencia en nuestro país estuviese a merced de los caprichos de la política, pues esto daba lugar a estrategias a corto plazo (nunca más allá de un sexenio, y recientemente a mer-



Figura 6. José Ruiz Herrera, 2022. Crédito: Roberto Ruiz Medrano.



ced de veleidades ideológicas). Para ilustrar este fenómeno, al inicio de sus clases mostraba tres proyectos que presentaban todas las características necesarias para ser rechazados por las agencias de financiamiento científico: la separación de cristales de tartrato de acuerdo con su configuración, el análisis de la progenie en plantas de chícharo, y el estudio de la forma de los picos en pájaros pinzones en las islas Galápagos (obviamente se refería a los trabajos de Pasteur, Mendel y Darwin, respectivamente). Las razones por las que estos proyectos hubiesen sido rechazados en la actualidad eran diferentes en forma, pero semejantes en fondo: proyectos muy básicos y que no aportaban directamente a la productividad de la economía, o muy alejados de las necesidades del “pueblo”. La justificación del rechazo al hipotético proyecto de Darwin sonaba muy actual: la agencia científica y, por tanto, el gobierno, no tenía por qué financiar los viajes de un naturalista que no había demostrado nada todavía. El resultado, para el Maestro Ruiz Herrera, era el mismo: el avance de la ignorancia.

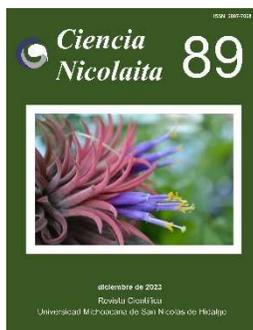
Otra de sus preocupaciones era la falta de interés por la ciencia en la población en general, y en los políticos en particular. Dos problemas actuales le preocupaban sobremanera: normalmente la ciencia en México era objeto de poco interés por las autoridades, pero recientemente observó, al igual que muchos de sus colegas, un ambiente cada vez más hostil para el desarrollo y aplicación de conocimiento científico. Y esto no sólo es notorio en México, sino en todo el mundo, aún en países con una larga tradición científica. Ejemplos abundan, como los movimientos antivacunas y los que rechazan de una manera visceral las tecnologías basadas en el uso de organismos genéticamente modificados. Sin embargo, confiaba que la razón se impondría, en vista de los grandes beneficios que aporta la ciencia a la sociedad (el conocimiento de las causas del cambio climático, el desarrollo de vacunas, la obtención de variedades vegetales tolerantes a patógenos, y a diferentes tipos de estrés, la elucidación de los mecanismos por los que patógenos causan enfermedades en humanos y plantas, y muchos otros). En particular, consideraba que el meteórico desarrollo de vacunas en contra del virus causante de la más reciente pandemia, tendría que ser considerado un triunfo de la ciencia de la manera más amplia. El Dr. Ruiz Herrera también será recordado como un excelente maestro, sumamente generoso y siempre

preocupado no sólo por el desarrollo académico de sus estudiantes, sino por su bienestar. Su trato respetuoso hacia ellos es otro de sus múltiples legados, como su honestidad intelectual y su rectitud a toda prueba. Formó directamente a varias generaciones de científicos y maestros, muchos de ellos reconocidos por su destacada trayectoria, e indirectamente también a través de sus cursos. Su legado evidentemente perdurará.

Referencias

- Arroyo-Begovich A, Cárabez-Trejo A, Ruiz-Herrera J. 1980. Identification of the structural component in the cyst wall of *Entamoeba invadens*. *Journal of Parasitology* 66:735-741.
- Bracker CE, Ruiz-Herrera J, Bartnicki-García S. 1976. Structure and transformation of chitin synthetase particle (chitosomes) during microfibril synthesis in vitro. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 73:4570-4574.
- Guevara-Olvera L, Calvo-Mendez C, Ruiz-Herrera J. 1993. The role of polyamine metabolism in dimorphism of *Yarrowia lipolytica*. *Journal of General Microbiology* 193:485-493.
- Guevara-Olvera L, Xoconostle-Cázares B, Ruiz-Herrera J. 1997. Cloning and disruption of the ornithine decarboxylase gene of *Ustilago maydis*: evidence for a role of polyamines in its dimorphic transition. *Microbiology (Reading)* 143 (Pt 7):2237-2245. doi: 10.1099/00221287-143-7-2237.
- Guzmán-de-Peña D, Ruiz-Herrera J. 1997. Relationship between aflatoxin biosynthesis and sporulation in *Aspergillus parasiticus*. *Fungal Genetics and Biology* 21:198-205. doi: 10.1006/fgbi.1996.0945.
- Herrera-Estrella L, Ruiz-Herrera J. 1983. Light response in *Phycomyces blakesleeanus*: evidence for roles of chitin biosynthesis and breakdown. *Experimental Mycology* 7:362-369.
- Méndez-Morán L, Reynaga-Peña CG, Springer PS, Ruiz-Herrera J. 2005. *Ustilago maydis* infection of the nonnatural host *Arabidopsis thaliana*. *Phytopathology* 95(5):480-8. doi: 10.1094/PHYTO-95-0480.
- Riquelme M, Bartnicki-García S, González-Prieto M, Sánchez-León E, Verdín-Ramos JA, Beltrán-Aguilar A, Freitag M. 2007. Spitzenkörper localization and intracellu-

- lar traffic of GFP-labeled CHS-3 and CHS-6 chitin synthases in living hyphae of *Neurospora crassa*. *Eukaryotic Cell* 6:1853-1864.
- Ruiz-Herrera J, Starkey RL. 1969. Dissimilation of methionine by fungi. *Journal of Bacteriology* 99:544-551.
- Ruiz-Herrera J, DeMoss JA. 1969. Nitrate reductase complex of *Escherichia coli* K-12: participation of specific formate dehydrogenase and cytochrome b components in nitrate reductase. *Journal of Bacteriology* 99:720-729.
- Ruiz-Herrera J, Bartnicki-Garcia S. 1974. Synthesis of cell wall microfibrils in vitro by a "soluble" chitin synthetase from *Mucor rouxii*. *Science* 186(4161):357-9. doi: 10.1126/science.186.4161.357.
- Ruiz-Herrera J. 1985. Dimorphism in *Mucor* species with emphasis on *M. rouxii* and *M. bacilliformis*. En: Fungal dimorphism: with emphasis on fungi pathogenic to humans. Ed. P. J. Szanislo. Plenum Publishing Co. New York. p. 361-384
- Ruiz-Herrera J, Sentandreu R. 2002. Different effectors of dimorphism in *Yarrowia lipolytica*. *Arch Microbiol* 178(6):477-83. doi: 10.1007/s00203-002-0478-3.
- Ruiz-Herrera J, Martínez-Cadena G, Loarca F, Salcedo-Hernández R. 2003. Analysis of phenomena involved in the apical growth of *Phycomyces blakesleeanus*. *Archives of Microbiology* 180(6):427-33. doi: 10.1007/s00203-003-0609-5.
- Ruiz-Herrera J, León-Ramírez C, Vera-Nuñez A, Sánchez-Arreguín A, Ruiz-Medrano R, Salgado-Lugo H, Sánchez-Segura L, Peña-Cabriales JJ. 2015. A novel intracellular nitrogen-fixing symbiosis made by *Ustilago maydis* and *Bacillus* spp. *New Phytologist* 207(3):769-77. doi: 10.1111/nph.13359.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

La epigenética y el cáncer: Terapia epigenética, una alternativa terapéutica

Epigenetics and cancer: Epigenetic therapy, a therapeutic alternative

Scarlett Ivonne Ortiz Zamora, Renato Nieto Aguilar, Alfonso Characu Rueda Rocha,
Cecilia Manuel Jacobo, Juana Araceli Sánchez Moreno y Asdrúbal Aguilera Méndez *

Para citar este artículo: Ortiz Zamora Scarlett Ivonne, Nieto Aguilar Renato, Rueda Rocha Alfonso Characu, Manuel Jacobo Cecilia, Sánchez Moreno Juana Araceli, Aguilera Méndez Asdrúbal, 2023. La epigenética y el cáncer: Terapia epigenética, una alternativa terapéutica. Ciencia Nicolaita no. 89, 21-32. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.716>

Historial del artículo:



Recibido: 21 de abril de 2023

Aceptado: 3 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: amendez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

La epigenética y el cáncer: Terapia epigenética, una alternativa terapéutica

Epigenetics and cancer: Epigenetic therapy, a therapeutic alternative

Scarlett Ivonne Ortiz Zamora¹, Renato Nieto Aguilar², Alfonso Characu Rueda Rocha¹, Cecilia Manuel Jacobo³, Juana Araceli Sánchez Moreno⁴ y Asdrúbal Aguilera Méndez^{1*}

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado de Odontología.

³Instituto Tecnológico de Monterrey, Campus Morelia

⁴Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital Regional 1, Morelia.

Resumen

La epigenética estudia los cambios en la expresión de los genes sin que ocurran modificaciones en las secuencias del ADN. Por lo tanto, relaciona las influencias ambientales y genéticas con un fenotipo determinado, el cual podría estar relacionado con la aparición de enfermedades. El cáncer es una enfermedad asociada con el descontrol en la división celular y está determinada por factores genéticos y ambientales. La terapia epigenética puede modificar las alteraciones que sufre el ADN y reducir o interrumpir el desarrollo del cáncer. En esta revisión se discuten los conceptos de epigenética y cáncer, así como su relación y las terapias epigenéticas que actualmente están en estudio como posibles tratamientos terapéuticos, siendo una alternativa promisorio en un futuro cercano.

Palabras clave: epigenética, cáncer, terapia epigenética.

Abstract

Epigenetics studies changes in gene expression without affecting DNA sequences. Therefore, it relates environmental and genetic influences to a certain phenotype, which could be related to the appearance of diseases. Cancer is a disease associated with the lack of control in cell division and is determined by genetic and environmental factors. Epigenetic therapy can modify DNA alterations and reduce or interrupt cancer development. This review discusses the concepts of epigenetics and cancer, as well as their relationship and the epigenetic therapies that are currently under study as possible therapeutic treatments, being a promising alternative in the near future.

Keywords: epigenetics, cancer, epigenetic therapies.

Autor de correspondencia: amendez@umich.mx
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Introducción

El estudio de la epigenética se enfoca en los factores hereditarios cuyas alteraciones en la expresión genética no afectan a la secuencia de nucleótidos del ADN (Aguilera, 2020), por lo que las alteraciones en la expresión genética pueden dar lugar al desarrollo de enfermedades como el cáncer; caracterizada por un crecimiento celular descontrolado que daña los órganos y tejidos (Lee y Kim, 2022; Henikoff, 2023). No obstante, los cambios epigenéticos en contraste con los cambios genéticos pueden revertirse, ayudar al desarrollo del diagnóstico de la enfermedad y determinar las diversas vías moleculares involucradas en la susceptibilidad a fármacos (Bennett *et al.*, 2018), por lo que actualmente la terapia epigenética para el tratamiento del cáncer es una gran opción terapéutica.

La epigenética

La epigenética se refiere al estudio de los cambios heredables en la expresión genes que suceden sin modificaciones en la secuencia del ADN y que generan un fenotipo específico (Aguilera, 2020; Henikoff, 2023). Dichos cambios pueden ocurrir durante la diferenciación y la determinación del destino celular, antes, durante y después de la división celular, e influyen sobre

la morfología y funciones de las células (Fardi *et al.*, 2018; Lee y Kim, 2021). Existen cuatro mecanismos epigenéticos que trabajan coordinadamente: a) La metilación del ADN, b) La modificación de histonas, c) La regulación de ARN no codificante o dependiente de micro ARNs y d) La remodelación de la cromatina (Cao y Yan, 2020).

Para comprender con mayor facilidad los mecanismos epigenéticos, podemos utilizar como analogía un libro, en el cual existen cuatro componentes: 1) “Escritores”, encargados de agregar las marcas epigenéticas; 2) “Borradores”, funcionan como una goma y se encargan de eliminar dichas marcas epigenéticas; 3) “Lectores”, reconocen a estas marcas y se unen a los cambios, con la finalidad de mediar efectos que puedan surgir posteriormente y 4) “Motor/remodelador”, encargado de modular la cromatina y posicionar a los nucleosomas en el genoma (**Fig. 1**) (Guo *et al.*, 2019; Cao y Yan, 2020).

Una mutación en los genes que codifican enzimas que participan en los mecanismos epigenéticos puede conllevar a una alteración de la expresión génica, lo que se traduce en la aparición de enfermedades en humanos (Fardi *et al.*, 2018; Lee y Kim, 2021). Esto está relacionado a su vez con los hábitos alimenticios, en los cuales se ha visto que las dietas hipercalóricas

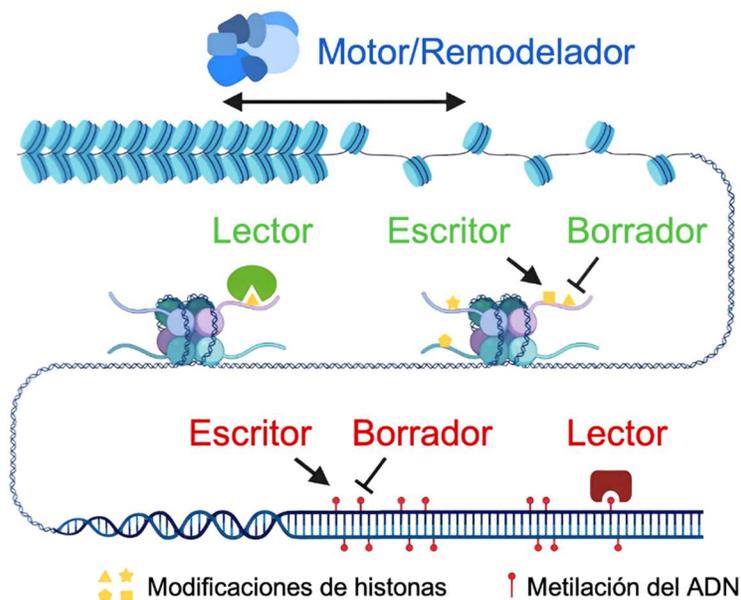


Figura 1. Mecanismos de regulación epigenética. El ADN se envuelve con histonas formando nucleosomas, con ayuda del “remodelador”. Los “escritores” establecen modificaciones en las histonas o el ADN. Los “borradores” eliminan estas modificaciones. A través de cada modificación y con la finalidad de facilitar los cambios epigenéticos, se unen las proteínas de unión conocidas como “lectores”. Modificada de Cao y Yan (2020).

ricas en carbohidratos y ácidos grasos saturados pueden producir cambios epigenéticos no favorables, en cambio dietas ricas en frutas y vegetales ricos en compuestos bioactivos (antioxidantes, vitaminas, etc.) producen cambios epigenéticos favorables que previenen la aparición de cáncer y otras enfermedades crónico degenerativas (Gómez de Cedrón *et al.*, 2023).

Metilación de ADN

Las metilaciones se producen por la adición enzimática de un grupo metilo (CH₃) al quinto carbono de la citosina y se presentan en los dinucleótidos 5'-CpG-3, aunque también pueden ser metiladas secuencias no CpG (Rodríguez, 2004). Aproximadamente del 60 al 90% de todas las secuencias CpG en el genoma están metiladas, pero existen otras localizadas en la mayoría de los genes de mantenimiento que no lo están, conocidas como "islas CpG" y cuando se encuentran hipermetiladas resulta en la represión en la expresión de estos genes (Rodríguez, 2004). La metilación es una de las modificaciones epigenéticas más comunes en las células eucariotas, es crucial para mantener un genoma estable, regula el proceso de transcripción y la interacción de proteínas con el ADN, lo cual modula la expresión de los genes, e inclusive influye sobre la latencia de virus celulares (Biswas y Rao, 2017; Li y Li, 2019).

La metilación se realiza por enzimas conocidas como ADN metiltransferasas DNMTs (por sus siglas en inglés, *DNA methyltransferases*) (Tabla 1), las cuales ayudan a movilizar a un grupo metilo (CH₃) de la S-adenosil metionina (SAM) al carbono 5 de la citosina (Biswas y Rao, 2017).

La hipermetilación de las islas CpG se ha documentado en genes codificadores de proteínas como TSPY L5 en el cáncer gástrico, o la metilación fenotípica de las islas CpG en el cáncer de colon (López *et al.*, 2021).

Adicionalmente, la investigación realizada por Carrera (2022) mostró la correlación clínico-patológica de la metilación de ADN en tumores en el cáncer de mama.

Modificación de histonas

Entre las modificaciones que pueden ocurrir en las histonas se encuentran la acetilación, metilación, fosforilación, ubiquitinación, ADP-ribosilación, sumoilaición, y biotinilación (Villanueva *et al.*, 2020; Aguilera *et al.*, 2022). No obstante, las más frecuentes son:

a) *Acetilación*: Está controlada por histonas acetil transferasas (HAT), que agregan grupos acetilo en lisinas, relajando así la interacción entre el ADN y las histonas, lo que aumenta la expresión de genes. Por otra parte, las histonas desacetilasas (HDAC) eliminan las marcas anteriores (grupos acetilo), favoreciendo la condensación de la cromatina y la represión de la expresión génica.

b) *Fosforilación*: Toma lugar en residuos de treonina, tirosina y serina por medio de las cinasas y fosfatasas, que se encargan de agregar y quitar grupos fosfato, respectivamente. El grupo fosfato en las histonas provoca una conformación más accesible para la transcripción y expresión genética.

c) *Metilación*: Por medio de las histonas metiltransferasas (HMT), las enzimas prolina arginina metil transferasas (PRMT) y lisina metil transferasas (KMT), adicionan grupos metilo en las histonas en residuos de arginina y lisina, mientras que las histonas desmetilasas (HDM) los eliminan. Esta modificación, a diferencia de las anteriores, no altera a la carga de las histonas, en cambio afecta a los factores transcripcionales y su afinidad por los promotores (Shanmugam *et al.*, 2018; Fardi *et al.*, 2018; Villanueva *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

Tabla 1

Funciones de las enzimas DNA metiltransferasas. Modificado de Cui y Xu (2018) y López-Estupiñán *et al.* (2021).

Tipo de enzima	Tipo de metilación	Función en la metilación del ADN
DNMT1	Metiltransferasa de <i>novo</i> y de mantenimiento	Ayuda a su mantenimiento en la replicación al conservar los patrones preexistentes, asegurando que queden en las mismas posiciones.
DNMT3a y DNMT3b	Metiltransferasa de <i>novo</i>	Propician la metilación de <i>novo</i> , estableciendo patrones nuevos de metilación al catalizar aquellos elementos no metilados durante la gestación.
DNMT3L	Metiltransferasa de <i>novo</i>	<i>In vitro</i> mejora directamente la actividad de DNMT3a y DNMT3b. <i>In vivo</i> interactúa con DNMT3a, induciendo la metilación en células madre embrionarias.

ARN no codificantes

Los ARN no codificantes (ARNnc) (non-coding RNA) participan en la regulación epigenética de la expresión de genes y representan más del 90% del ARN. Los principales ARNnc reguladores son: los “largos” (long non-coding RNA, lncRNA), pequeños ARN interferentes (small interfering, siRNA) y los micro ARN (small interfering, miRNA) (Krause *et al.*, 2016; Villanueva *et al.*, 2020). Los miARNs en humanos también pueden inducir la remodelación de la cromatina, lo que sugiere que la metilación del ADN, la modificación de las histonas y los miARN pueden actuar conjuntamente para regular la expresión génica (Lillycrop y Burdge, 2012). Los miARN que desempeñan un papel oncológico se conocen como onco-miR o miARN promotores de tumores. El miR-21 es uno de los más conocidos, ya que tiene una actividad supresora de la secuencia de genes *bona fide TS* como la tropomiosina 1 (TPM1), la proteína de muerte celular programada 4 (PDCD4), el homólogo de fosfatasa y tensina (PTEN), entre otros, expresándose comúnmente en cáncer de ovario, mama, próstata, páncreas, estómago y pulmón. Esta expresión elevada se ve correlacionada con la quimiorresistencia, una reducción en la supervivencia general del paciente y una mayor metástasis en ganglios linfáticos (Tse *et al.*, 2022).

Remodelación de cromatina

La cromatina puede ser modificada estructuralmente por medio de complejos proteínicos denominados factores de remodelación, que inducen modificaciones covalentes con gasto de ATP (Lillycrop *et al.*, 2012; Sasaki y Ogiwara, 2020). Existen dos grupos de factores que regulan la estructura de la cromatina: 1) *complejos de remodelación de cromatina*, encargados de aprovechar la energía resultante de la hidrólisis de ATP para modificar la interacción histona-ADN, al preservar la estructura de la cromatina, abrirla o cerrarla por medio de la expulsión, inserción, reposición o deslizamiento de nucleosomas; 2) *factores reguladores de histonas*, que conservan las interacciones ADN-histona por medio de los factores reguladores de la cromatina, produciendo uniones covalentes de moléculas a las histonas como acetilación, ubiquitinación y metilación (Sasaki y Ogiwara, 2020).

En células cancerosas puede producirse inhibición de la apoptosis y de los genes supresores de tumores,

así como inestabilidad genética y cromosómica. Ejemplo de esto es el gen ARID1A, que codifica para una de las subunidades del complejo de remodelación de cromatina y se encuentra frecuentemente mutado en pacientes con cáncer gástrico (Rabanal, 2020).

Cáncer y carcinogénesis

El cáncer se caracteriza por un crecimiento celular descontrolado en alguna parte del cuerpo. Además, estas células pueden migrar e invadir tejidos u órganos lejanos (Herms y Jones, 2023). Es una enfermedad multifactorial, debido a que su origen puede partir de antecedentes genéticos y de factores relacionados con el estilo de vida y la nutrición (Martínez *et al.*, 2021). En la mayoría de los casos esto se debe a mutaciones en las células somáticas, pero también puede deberse a mutaciones en la línea germinal que se transmiten de padres a hijos, las cuales explican los síndromes de cáncer hereditario (Nenclares y Harrington, 2020).

Los tipos de cáncer pueden clasificarse acorde al grado de anormalidad morfológica y de diferenciación de las células: *Grado 1*: células con una anormalidad leve o muy sutil, pero que se encuentran bien diferenciadas. *Grado 2*: células más anormales que las anteriores y se encuentran moderadamente diferenciadas. *Grado 3*: células muy anormales y mal diferenciadas. *Grado 4*: células muy indiferenciadas, inmaduras y primitivas (Abbas y Rehman, 2018).

La carcinogénesis, también llamada oncogénesis o tumorogénesis es el proceso por el cual se produce el cáncer y es la formación de un tumor maligno en el que las células se transforman en células cancerosas (Herms y Jones, 2023). Los tumores se nombran acorde al tipo de célula de la cual se originan: 1) Sarcomas: surgen de las alteraciones anormales en tejido conectivo, hueso, músculos y grasa. 2) Carcinomas: a partir de células epiteliales anormales, este tipo constituye la mayoría de los cánceres. 3) Linfomas: se forman del sistema linfático. 4) Leucemias: derivada de la médula ósea, principalmente en los glóbulos blancos. 5) Mielomas: se originan de células plasmáticas anormales (Abbas y Rehman, 2018).

Los genes que se asocian con el cáncer se dividen en dos grupos: los oncogenes y los genes supresores de tumores TSG (*tumor suppressor gene*). Los TSGs ex-

plican los síndromes de cáncer hereditario, son fenotípicamente recesivos e inhiben la proliferación celular, controlan el ciclo celular y la apoptosis. Los oncogenes están relacionados con las mutaciones en las células somáticas que generan cáncer, son fenotípicamente dominantes y controlan la proliferación celular, su motilidad y supervivencia. Asimismo, los oncogenes pueden verse activados por una de tres vías: 1) A partir de mutaciones genéticas. 2) Amplificando genes. 3) Por translocación de genes (Fig. 2, Nenclares y Harrington, 2020).

El cáncer presenta comportamientos característicos, como resistencia a la muerte celular, capacidad replicativa ilimitada, angiogénesis, metástasis, invasión, evasión a los supresores del crecimiento e independencia de la señalización proliferativa o de crecimiento, de los cuales los últimos dos son las características principales del cáncer (Hanahan, 2022). Posteriormente, se agregaron dos características funcionales, la capacidad de evadir la respuesta inmunitaria del organismo y la desregulación de la energía metabólica celular (activación de la glucólisis); además de dos características habilitadoras o favorables de tumores: la inflamación y las alteraciones genómicas (Wu *et al.*, 2019).

Genética inestable

La clase de modificaciones genéticas que dan origen al cáncer, se pueden clasificar en cuatro tipos: *a) Cambios en la secuencia de un gen:* deleciones e inserciones de nucleótidos en las secuencias genéticas, *b) Translocación de cromosomas:* fusiones a diversos cromosomas o segmentos diferentes de un sólo cromosoma, *c) Modificaciones en la cantidad de cromosomas:* Aumento o disminución en el número de cromosomas, *d) Amplificaciones genéticas:* son duplicados de un “amplicón” (fragmento de ADN que da lugar a diferentes copias de este) que contenga un gen promotor del crecimiento (Pérez *et al.*, 2018).

Ciclo celular

El ciclo celular es esencial para la reproducción y el crecimiento y participan proteínas reguladoras (ciclinas), cinasas dependientes de ciclinas (CDKs), genes supresores de tumores, oncogenes y proteínas de control mitótico, que permiten o inhiben la progresión del ciclo celular (Ligasová *et al.*, 2023). Sin embargo, las mutaciones y alteraciones en la regulación del ciclo celular pueden dar origen a células cancerosas, cuya habilidad de supervivencia se debe a su capacidad de

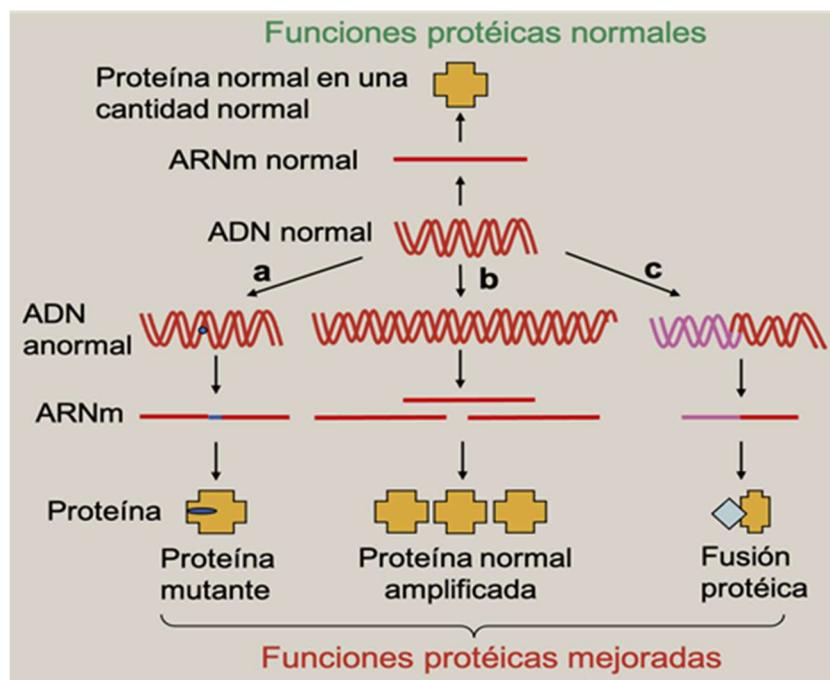


Figura 2. Vías de activación de los oncogenes. (a) Existen mutaciones en el ADN que producen alteraciones en las proteínas, (b) La amplificación de los genes resulta en cantidades incrementadas de proteínas normales. (c) La translocación del ADN desde la ubicación de un cromosoma hacia otro puede producir una fusión proteica con actividad biológica mejorada. Modificada de Nenclares y Harrington (2020).

resistencia y evasión a la muerte celular programada o apoptosis (Matthews *et al.*, 2022).

Angiogénesis y metástasis

La angiogénesis es la formación de nuevos vasos sanguíneos a partir de capilares preexistentes, cuya función es eliminar desechos y brindar un suministro de nutrientes y oxígeno para el desarrollo y crecimiento de los tejidos. La angiogénesis patológica es importante para el crecimiento y la propagación del cáncer, ya que suministra nutrientes y constituye un conducto para la metástasis (Hisano y Hla, 2019; Fu *et al.*, 2020). Las células cancerosas pueden estimular a la angiogénesis a través de diversas moléculas de señalización, como el factor de crecimiento vascular endotelial (VEGF), la interleucina 8 (IL-8) y el factor de crecimiento de los fibroblastos (FGF), así como el microambiente hipóxico, que promueven la angiogénesis regulando la expresión y/o la actividad de varios genes relacionados (Hisano y Hla, 2019).

La metástasis es el proceso de separación, movilización y propagación de células cancerosas que se separan del cáncer primario (lugar en el que se formaron originalmente) y que viajan a través del sistema linfático o el torrente sanguíneo, gracias a la ayuda de la angiogénesis, para formar tumores metastásicos (tumores nuevos) en otras partes del organismo (National Cancer Institute, 2018). La gran mayoría de los carcinomas pueden formar tumores sólidos, a excepción de las leucemias y neoplasias malignas. Gracias a esta capacidad de movilidad, la metástasis es la principal causa del fracaso de tratamientos contra el cáncer, ocasionando el 90% de las muertes en los distintos tipos de cáncer (Fares *et al.*, 2020).

Terapias para el cáncer

Existen diversos métodos utilizados para el tratamiento del cáncer, estos dependerán del tamaño, lugar, profundidad, fase en la que este y el grado de proliferación; así como de la edad, género, grado de nutrición, estado de salud y genética de la persona (Amjad *et al.*, 2023).

Terapia biológica: Es el uso de microorganismos (virus y bacterias) que presentan replicación selectiva en las células tumorales, destruyéndolas o tienen la capacidad de sintetizar y liberar compuestos específicos contra células cancerosas. Sin embargo, el uso de

virus se ve obstaculizado por los anticuerpos generados contra ellos (Hernández *et al.*, 2020; Patyar *et al.*, 2010). Es importante mencionar que este tipo de terapia se encuentra aún en fase experimental.

Quimioterapia: Uso de fármacos que afecta la síntesis de ARN, ADN o proteínas de células tumorales y de células en crecimiento o en estado proliferativo (Amjad *et al.*, 2023). Es poco específica, al inhibir también el crecimiento de células normales con tasas de crecimiento altas, como las células madre de la médula ósea, folículos pilosos y epitelio digestivo. Esto da lugar a una gran variedad de efectos secundarios (Behranvand *et al.*, 2021; Olsen, 2019).

Radioterapia: Utiliza partículas como iones, protones, fotones y electrones para irradiar de forma heterogénea el tejido canceroso, dañando el ADN y provocando su muerte. No obstante, no todos los tumores pueden ser tratados por este método, por ejemplo, el cáncer de mama y pulmón son medianamente radiosensibles y los osteosarcomas son poco sensibles (Hosseinzadeh *et al.*, 2017; Riaz *et al.*, 2023).

Cirugía: Procedimiento llevado a cabo para diagnosticar, reducir o extirpar un tumor o un tejido dañado cercano (Standford Medicine Healthcare, 2022). Sin embargo, no es una alternativa para todos los tipos de cáncer, ya que sólo puede aplicarse en cánceres sólidos, por ende, no es una opción para linfomas ni leucemias (Cancer Research UK, 2022).

Inmunoterapia: Terapia que mejora la respuesta inmunitaria adaptativa al utilizar agentes naturales o externos, con la finalidad de que potencien la acción del sistema inmunitario para que eliminen a las células cancerosas. Algunas de las complicaciones es que en ocasiones pueden presentarse casos de autoinmunidad e inflamación (Riley *et al.*, 2019; Emens y Loi, 2023).

Terapias epigenéticas

La epigenética forma parte fundamental del desarrollo de estrategias terapéuticas o epifármacos para tratar el cáncer, ya que las alteraciones epigenéticas se ven directamente relacionadas con la promoción de tumores y la expresión de oncogenes. También forman parte de una alternativa importante gracias a la plasticidad epigenética y capacidad de reversión (Gómez, 2022; Castro-Muñoz *et al.*, 2023). La plasticidad epigenética es la capacidad de revertir los cambios

epigenéticos en el ADN y las histonas, en respuesta a factores tanto internos como externos. Los cambios epigenéticos también pueden ayudar al diagnóstico del riesgo, la predicción clínica y el estudio de las vías moleculares para la valoración de susceptibilidad a fármacos, ya que, al combinarlas con algunas de las terapias tradicionales del cáncer, podría evitar una resistencia tumoral producida al usar una sola terapia (Fardi *et al.*, 2018; Morel *et al.*, 2020). Existen diferentes terapias y epifármacos que pueden ser clasificados en distintos grupos, los cuales dependen de la modificación epigenética al que van dirigidos (Gómez, 2022; Castro-Muñoz *et al.*, 2023).

Terapias de metilación de ADN

Los antimetabolitos inhibidores de la actividad de DNMT más estudiados actualmente son la Decitabina y la Azacitidina, los cuales tienen la capacidad de unirse a DNMTs a través de uniones covalentes, inhibiendo así su función y provocando su degradación (Toh *et al.*, 2017; Bates, 2020). Ambos cuentan con la aprobación regulatoria de la FDA (“Food and Drug Administration”) de Estados Unidos, para el tratamiento del síndrome mielodisplásico (el cual puede evolucionar a leucemia aguda en pacientes con cuenta elevada de blastos en médula ósea) y para la leucemia mielomonocítica crónica CMML (“Chronic myelomonocytic leukemia”), mientras que en la Unión Europea se aprobó para tratar a pacientes con CMML recién diagnosticada o secundaria que no posean los requisitos necesarios para recibir un trasplante (Bates, 2020; National Cancer Institute, 2022).

Terapias de modificación y regulación de histonas

Los inhibidores de las HDAC reactivan genes silenciados supresores de tumores, al aumentar la acetilación de las histonas. No obstante, también actúan sobre proteínas no histonas nucleares implicadas en la transcripción (por ejemplo, p53) para regular la acción y estabilidad del ADN, actuando en el ciclo celular, diferenciación e induciendo la apoptosis de las células tumorales (Morel *et al.*, 2020). Existen cinco agentes aprobados a partir del 2020 por la FDA: 1) Vorinostat, para el tratamiento de linfoma cutáneo CTCL (“Cutaneous T-cell lymphoma”), 2) Belinostat, para el linfoma periférico PTCL (“Peripheral T-cell lymphoma”), 3) Romidepsin, para CTCL y PTCL y 4) Panobinostat,

para el tratamiento del mieloma múltiple y Tucidinosat para PTCL (Bondarev *et al.*, 2021).

Otra opción son los inhibidores de KMT y HMT, ya que la subunidad EZH2 de las transferasas HMT es de gran interés farmacológico, debido a que se encuentra mutada en varios tipos de cáncer (Italiano *et al.*, 2018), además de que potencia su expansión y crecimiento (Samaržija *et al.*, 2022). En 2020, la FDA otorgó la aprobación al Tazemetostat (inhibidor de EZH2) para pacientes adultos con tumores positivos para mutaciones EZH2, con linfomas foliculares recidivante sin alternativas de tratamiento satisfactorias con por lo menos dos terapias sistémicas previas (FDA, 2020; Italiano *et al.*, 2018).

Los inhibidores de proteínas con bromo dominio y motivo extra-terminal BET (“bromodomain and extra-terminal domain”) son otra alternativa. Para que surja la interacción histona-BET, los inhibidores se deben unir a las proteínas BET. Estas se encargan de bloquear selectivamente la unión de las histonas acetiladas y de BRD2 (proteína bromodominio 2), BRD3 y BRD4, reduciendo la sobreexpresión del gen *c-Myc* en cánceres (Gómez *et al.*, 2022). La regulación de este gen se ve afectado en más del 70% de los cánceres humanos (Madden *et al.*, 2021), como en los cánceres de mama, de colon, carcinoma de cuello uterino, osteosarcomas, melanomas, glioblastomas y leucemias mieloides (Pelengaris *et al.*, 2002).

Otra estrategia es utilizar inhibidores epigenéticos como inmunomoduladores. Las modificaciones epigenéticas de histonas y la metilación de ADN pueden ayudar a mejorar la función inmunológica contra varios tipos de cáncer que evaden al sistema inmunológico, aumentando la respuesta a las inmunoterapias y sus respuestas clínicas (Pfister y Ashworth, 2017). Además, los inhibidores de DNMT y HDAC tienen la capacidad de regular la inmunidad antitumoral de manera positiva a partir de la capacidad que tienen de modular la transcripción génica de las células inmunes y tumorales. Los inhibidores de DNMT Azacitidina y Decitabina ayudan al incremento en la expresión de genes del MHC1 (Complejo Mayor de Histocompatibilidad Clase 1), en células neoplásicas. La Decitabina ha demostrado un efecto de sensibilidad al interferón tipo 1 en células tumorales, siendo utilizada en inmunoterapias contra el carcinoma pulmonar no microcítico. También se ha visto que en bajas concentracio-

nes induce una respuesta en los receptores de linfocitos NK (*Natural Killer*), actuando en la destrucción de células de CMML (Ahuja *et al.*, 2016; Pfister y Ashworth, 2017).

Terapias para ARN no codificante

La inhibición de miARN oncogénicos para su restauración como supresores tumorales se lleva a cabo por dos vías: 1) por oligonucleótidos sintéticos análogos, que mimetizan a los miARN para restaurar la actividad supresora y 2) por oligonucleótidos sintéticos antagonistas, que actúan como oponentes de los miARN frente a la diana oncogénica de estos, inhibiendo su función. En la actualidad se siguen probando las terapias basadas en miARN en ensayos clínicos, como MRX34 para tumores sólidos, MesomiR-1 en cáncer pulmonar y en mesotelioma pleural maligno (Moldón *et al.*, 2021; Castro-Muñoz *et al.*, 2023).

Conclusiones

La epigenética y el cáncer se relacionan en términos de la regulación morfológica y funcional de las células, así como en la influencia ambiental y genética que determina un fenotipo determinado, lo cual está relacionado con la aparición de enfermedades. Las modificaciones en los patrones epigenéticos se producen en todas las etapas del cáncer, por lo que pueden ser detectados desde estadios muy tempranos, proporcionando una detección oportuna, lo que asegura una mayor probabilidad de supervivencia. Además, se puede diseñar un tratamiento terapéutico específico, acorde a las modificaciones específicas de cada paciente.

Actualmente los tratamientos epigenéticos son utilizados en combinación con otros tipos de terapias para su efecto más eficaz y mejorar su potencial de acción, disminuyendo los efectos secundarios no deseados que presentan la mayoría de los tratamientos clásicos. Por lo tanto, entender la relación entre la epigenética y el cáncer es crucial para el desarrollo de estrategias terapéuticas efectivas y son una oportunidad para mejorar el diagnóstico y en un futuro no muy lejano poder ofrecer un tipo de medicina personalizada y más eficaz.

Referencias

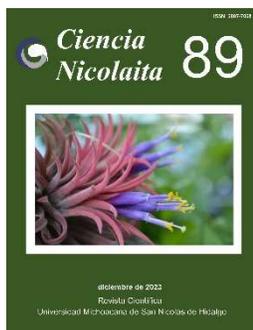
- Abbas, Z., Rehman, S., 2018, "An overview of cancer treatment modalities", *Neoplasms*, London, Britain, IntechOpen, 2018, 139-157. ISBN: 978-1-78923-777-1 (print) 978-1-78923-778-8 (web).
- Aguilera-Méndez, A., 2020, La nutrición materna y la programación metabólica: el origen fetal de las enfermedades crónicas degenerativas en los adultos, *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 27(3), 1-10. ISSN: 2395-8782. DOI: 10.30878/ces.v27n3a7.
- Aguilera-Méndez, A., Boone-Villa, D., Nieto-Aguilar, R., Villafaña-Rauda, S., Molina, A. S., Sobrevilla, J.V., 2022, Role of vitamins in the metabolic syndrome and cardiovascular disease, *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 474(1), 117–140. ISSN: 0031-6768 (print) 1432-2013 (web). DOI: 10.1007/s00424-021-02619-x.
- Ahuja, N., Sharma, A.R., Baylin, S. B., 2016, Epigenetic therapeutics: a new weapon in the war against cancer, *Annual Review of Medicine*, 67,73-89. ISSN: 0066-4219 (print) 1545-326X (web). DOI: 10.1146/annurev-med-111314-035900.
- Amjad, M.T., Chidharla, A., Kasi, A., 2023, Cancer chemotherapy, *In StatPearls [Internet]*. 5-17. PMID: 33232037. Bookshelf ID: NBK564367.
- Bates, S.E., 2020, Epigenetic therapies for cancer, *New England Journal of Medicine*, 383(7), 650-663. ISSN: 0028-4793 (print) 1533-4406 (web). DOI: 10.1056/NEJMra1805035.
- Behranvand, N., Nasri, F., Zolfaghari Emameh, R., Khani, P., Hosseini, A., Garssen, J., Falak, R., 2021, Chemotherapy: a double-edged sword in cancer treatment, *Cancer Immunology, Immunotherapy*, 71, 507–526. ISSN: 0340-7004 (print) 1432-0851 (web). DOI: 10.1007/s00262-021-03013-3.
- Bennett, R.L., Licht, J.D., 2018, Targeting epigenetics in cancer, *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 58, 187-207. ISSN: 0362-1642 (print) 1545-4304 (web). DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-010716-105106.
- Biswas, S., Rao, M., 2017, Epigenetics in cancer: fundamentals and beyond, *Pharmacology & Therapeutics*, 173, 118-134. ISSN: 0163-7258. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2017.02.011.
- Bondarev, A.D., Attwood, M. M., Jonsson, J., Chubarev, V.N., Tarasov, V.V., Schiöth, H.B., 2021, Recent developments of HDAC inhibitors: Emerging indications and

- novel molecules, *British Journal of Clinical Pharmacology*, 87(12), 4577-4597. ISSN: 0306-5251. DOI: 10.1111/bcp.14889.
- Cancer Research UK, "What is cancer surgery?", Cancer research UK, <https://www.cancerresearchuk.org/about-cancer/treatment/surgery/about>, [consultado el 15 de septiembre de 2022].
- Cao, J., Yan, Q., 2020, Cancer epigenetics, tumor immunity, and immunotherapy, *Trends in Cancer*, 6(7), 580-592. ISSN: 2405-8033. DOI: 10.1016/j.tre-can.2020.02.003.
- Carrera-Tupiza, D.G., 2022, Determinación del aporte de los biomarcadores de metilación del ADN en el cáncer de mama: Tesis de licenciatura, *Universidad Central de Ecuador*, p. 92.
- Castro-Muñoz, L. J., Ulloa, E. V., Sahlgren, C., Lizano, M., De La Cruz-Hernández, E., Contreras-Paredes, A., 2023, Modulating epigenetic modifications for cancer therapy (Review), *Oncology Reports*, 49(3), 59. <https://doi.org/10.3892/or.2023.8496>.
- Cui, D., Xu, X., 2018, DNA Methyltransferases, DNA Methylation, and Age-Associated Cognitive Function, *International Journal of Molecular Sciences*, 19(5), 1315. ISSN: 1422-0067. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2017.02.011.
- Emens, L. A., Loi, S., 2023, Immunotherapy Approaches for Breast Cancer Patients in 2023, *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 13(4), a041332. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a041332>.
- Fardi, M., Solali, S., Hagh, M. F., 2018, Epigenetic mechanisms as a new approach in cancer treatment: An updated review, *Genes and Diseases*, 5(4), 304-311. ISSN: 2352-3042. DOI: 10.1016/j.gendis.2018.06.003.
- Fares, J., Fares, M.Y., Khachfe, H.H., Salhab, H.A., Fares, Y., 2020, Molecular principles of metastasis: a hallmark of cancer revisited, *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 5(1), 1-17. ISSN 2059-3635. DOI: 10.1038/s41392-020-0134-x.
- Food & Drug Administration U.S. (FDA), "FDA granted accelerated approval totazemetostat for follicular lymphoma", <https://www.fda.gov/drugs/fda-granted-accelerated-approval-tazemetostat-follicular-lymphoma#:~:text=On%20June%2018%2C%202020%2C%20the,approved%20test%20and%20who%20have> [consultado 27 de octubre de 2022].
- Fu, L.Q., Du, W.L., Cai, M.H., Yao, J.Y., Zhao, Y.Y., Mou, X.Z., 2020, The roles of tumor-associated macrophages in tumor angiogenesis and metastasis, *Cellular Immunology*, 2-7. ISSN: 1090-2163 (print) 0008-8749 (web). DOI: 10.1016/j.cellimm.2020.104119.
- Gómez-Aguilar, C., Lara-Espinosa, I., Sánchez-Trujillo, A.C., Zarin-Herzberg, A., 2022, Epigenética del cáncer, *Ciencia: Academia Mexicana de Ciencias*, 73 (4), 34-42. ISSN: 1405-6550.
- Gómez de Cedrón, M., Moreno-Palomares, R., Ramírez de Molina, A., 2023, Metabolo-epigenetic interplay provides targeted nutritional interventions in chronic diseases and ageing, *Frontiers in Oncology*, 13,1169168. doi: 10.3389/fonc.2023.1169168.
- Guo, M., Peng, Y., Gao, A., Du, C., Herman, J. G., 2019, Epigenetic heterogeneity in cancer. *Biomarker Research*, 7(1), 1-19. ISSN: 2050-7771. DOI: 10.1186/s40364-019-0174-y.
- Hanahan D., 2022, Hallmarks of Cancer: New Dimensions. *Cancer Discovery*, 12(1), 31-46. <https://doi.org/10.1158/2159-8290.CD-21-1059>.
- Henikoff, S., 2023, The epigenetic landscape: An evolving concept, *Frontiers in Epigenomics and Epigenetics*, 1, 1176449. doi: 10.3389/freae.2023.1176449.
- Hermes, A., Jones, P.H., 2023, Somatic Mutations in Normal Tissues: New Perspectives on Early Carcinogenesis, *Annual Review Cancer Biology*, 7:189-205. <https://doi.org/10.1146/annurev-cancerbio-061421-012447>.
- Hernández-Padilla, L., Reyes, H. Campos García J, 2020, Antiproliferative effect of bacterial cyclodipeptides in the HeLa line of human cervical cancer reveals multiple protein kinase targeting, including mTORC1/C2 complex inhibition in a TSC1/2-dependent manner, *Apoptosis: An International Journal on Programmed Cell Death*, 25(9-10), 632-647. <https://doi.org/10.1007/s10495-020-01619-z>.
- Hisano, Y., Hla, T., 2019, Bioactive lysolipids in cancer and angiogenesis, *Pharmacology and Therapeutics*, 193, 91-98. ISSN: 0163-7258. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2018.07.006.
- Hosseinzadeh, E., Banaee, N., Ali Nedaie, H., 2017, Cancer and treatment modalities, *Current Cancer Therapy Reviews*, 13(1), 17-27. ISSN: 1573-3947 (print) 1875-6301 (web). DOI: 10.2174/1573394713666170531081818.
- Italiano, A., Soria, J.C., Toulmonde, M., et al. 2018, Tazemetostat, an EZH2 inhibitor, in relapsed or refractory B-cell non-Hodgkin lymphoma and advanced solid tumours: a first-in-human, open-label, phase 1 study. *The*



- Lancet Oncology*, 19(5), 649-659. ISSN: 1470-2045. DOI: 10.1016/S1470-2045(18)30145-1.
- Krause, B. J., Castro-Rodríguez, J. A., Uauy, R., Casanello, P., 2016, General concepts of epigenetics: Projections in paediatrics, *Revista Chilena de Pediatría*, 87(1), 4–10. ISSN: 0370-4106. DOI: 10.1016/j.rchipe.2015.12.002.
- Lee, J.E., Kim, M.Y., 2021, Cancer epigenetics: Past, present and future, *Seminars in Cancer Biology*, (83) 4-14. ISSN: 1044-579X. DOI: 10.1016/j.semcancer.2021.03.025.
- Li Y., Li J., 2019, Technical advances contribute to the study of genomic imprinting, *PLoS Genetics*, 15(6), 1-15. ISSN: 1553-7404. DOI: 10.1371/journal.pgen.1008151.
- Ligasová, A., Frydrych, I., Koberna, K., 2023, Basic Methods of Cell Cycle Analysis, *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3674. <https://doi.org/10.3390/ijms24043674>.
- Lillycrop, K. A., Burdge, G. C., 2012, Epigenetic mechanisms linking early nutrition to long term health, *Best Practice & Research. Clinical Endocrinology & Metabolism*, 26(5), 667–676. ISSN: 1521-690X. DOI: 10.1016/j.beem.2012.03.009.
- López-Estupiñán, A.D., Mondragon-Chávez, F., Giraldo-Velásquez, A.F., Olave-Medina, J.D., Lodoño-Velasco, E., 2021, Descripción de las principales alteraciones epigenéticas asociadas con el desarrollo de cáncer colorrectal, próstata, mama y gástrico: Revisión de tema, *Salutem Scientia Spiritus*, 36-51. ISSN: 2463-1426 (web).
- Madden, S.K., de Araujo, A.D., Gerhardt, M., Fairlie, D.P., Mason, J.M., 2021, Taking the Myc out of cancer: toward therapeutic strategies to directly inhibit c-Myc, *Molecular Cancer*, 20(1), 1-18. ISSN: 1476-4598. DOI: 10.1186/s12943-020-01291-6.
- Martínez, A.M., Marcos, M.L.T., López, P.J.T., 2021, Análisis de la relación entre aspectos de la nutrición y el cancer, *Journal of Negative and No Positive Results: JONNPR*, 6(2), 321-357. ISSN: 2529-850X. DOI: 10.19230/jonnpr.3809.
- Matthews, H. K., Bertoli, C., de Bruin, R. A., 2022, Cell cycle control in cancer, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(1), 74-88. ISSN: 1471-0072 (print) 1471-0080 (web). DOI: 10.1038/s41580-021-00404-3.
- Moldón, Y.R., Lara, A.E., Cárdenas, J.A.H., Cabodevilla, R.C.V., 2021, Tratamiento del cáncer basado en la epigenética, *Correo Científico Médico de Holguín*, 25(3), 1-25. ISSN 2708-5481.
- Morel, D., Jeffery, D., Aspeslagh, S., Almouzni, G., Postel-Vinay, S., 2020, Combining epigenetic drugs with other therapies for solid tumours-past lessons and future promise, *Nature Reviews Clinical Oncology*, 17(2), 91-107. ISSN: 1759-4774 (print) 1759-4782 (web). DOI: 10.1038/s41571-019-0267-4.
- National Cancer Institute, “Metastasis”, <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/metastasis> [consultado el 13 de septiembre del 2022].
- National Cancer Institute, 2018, “Myelodysplastic Syndromes Treatment (PDQ)-Patient Version”, <https://www.cancer.gov/types/myeloproliferative/patient/myelodysplastic-treatment-pdq> [consultado el 20 de octubre del 2022].
- Nenclares, P., Harrington, K.J., 2020, The biology of cancer, *Medicine*, 48(2), 67-72. ISSN: 1357-3039. DOI: 10.1016/j.mpmed.2019.11.001.
- Olsen M.M., 2019, “Chemotherapy and Biotherapy Guidelines and recommendations for practice”, LeFebvre, K.B., Brassil, K.J., *Oncology Nursing Society*, 61-88, ISBN: 9781635930207.
- Patyar, S., Joshi, R., Byrav, D.S.P., Prakash, A., Medhi, B., Das, B.K., 2010, Bacteria incancer therapy: A novel experimental strategy, *Journal of Biomedical Science*, 17(1), 21. DOI: 10.1186/1423-0127-17-21.
- Pelengaris, S., Khan, M., Evan, G., 2002, c-MYC: more than just a matter of life and death, *Nature Reviews Cancer*, 2(10), 764-776. ISSN: 1474-175X (print) 1474-1768 (web). DOI: 10.1038/nrc904.
- Pérez-Cabeza de Vaca, R.P.C., Cárdenas-Cárdenas, E., Mondragón-Terán, P., Solís, A.A.E.V., 2018, Biología molecular del cáncer y las nuevas herramientas en oncología, *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 22(4), 171-181. ISSN: 1665-7330 (print) 2696-1563 (web).
- Pfister, S.X., Ashworth, A., 2017, Marked for death: targeting epigenetic changes in cancer, *Nature Reviews Drug Discovery*, 16(4), 241-263. ISSN: 1474-1776 (print) 1474-1784 (web). DOI: 10.1038/nrd.2016.256.
- Rabanal-Sanchez, J., 2020, *Helicobacter pylori* y la expresión de genes en pacientes con adenocarcinoma gástrico, *Revista de la Facultad de Ciencias*, 9(2), 56-65. ISSN: 2357-5549 (web). DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v9n2.81923.
- Riaz, N., Jeen, T., Whelan, T. J., Nielsen, T. O., 2023, Recent Advances in Optimizing Radiation Therapy Decisions in

- Early Invasive Breast Cancer, *Cancers*, 15(4), 1260. <https://doi.org/10.3390/cancers15041260>.
- Riley, R.S., June, C.H., Langer, R., Mitchell, M.J., 2019, Delivery technologies for cancer immunotherapy, *Nature Reviews Drug Discovery* 18, 175–196. ISSN: 1474-1776 (print) 1474-1784 (web). DOI: 10.1038/s41573-018-0006-z.
- Rodríguez-Dorantes, M., Téllez-Ascencio, N., Cerbón A, M., López, M., Cervantes, A., 2004, Metilación del ADN: un fenómeno epigenético de importancia médica, *Revista de Investigación Clínica*. 56(1), 56-71. ISSN: 0034-8376 (print) 2564-8896 (web).
- Samaržija, I., Tomljanović, M., Novak Kujundžić, R., Trošelj, K.G., 2022, EZH2 Inhibition and Cisplatin as a Combination Anticancer Therapy: An Overview of Preclinical Studies, *Cancers*, 14(19), 2-25. ISSN: 2072-6694. DOI: 10.3390/cancers14194761.
- Sasaki, M., Ogiwara, H., 2020, Synthetic lethal therapy based on targeting the vulnerability of SWI/SNF chromatin remodeling complex-deficient cancers, *Cancer Science*, 111(3), 774-782. ISSN:1349-7006. DOI: 10.1111/cas.14311.
- Shanmugam, M.K., Arfuso, F., Arumugam, S., Chinnathambi, A., Jinsong, B., Warriar, S., Wang, L.Z., Kumar, A. P., Ahn, K.S., Sethi, G., Lakshmanan, M., 2018, Role of novel histone modifications in cancer, *Oncotarget*, 9(13), 11414–11426. ISSN: 1949-2553 (web). DOI: 10.18632/oncotarget.23356.
- Stanford Medicine Healthcare, “Types of Surgery for Cancer Treatment”, <https://stanfordhealthcare.org/medical-treatments/c/cancer-surgery/types.html>, [consultado el 15 de septiembre de 2022].
- Toh, T. B., Lim, J. J., Chow, E.K., 2017, Epigenetics in cancer stem cells, *Molecular Cancer*, 16(1), 1-20. ISSN: 1476-4598. DOI: 10.1186/s12943-017-0596-9.
- Tse, J., Pierce, T., Carli, A.L., Alorro, M.G., Thiem, S., Marcussou, E.G., Ernst, M., Buchert, M., 2022, Onco-miR-21 Promotes Stat3-Dependent Gastric Cancer Progression, *Cancers*, 14(2), 1-22. ISSN: 2072-6694. DOI: 10.3390/cancers14020264.
- Villanueva, L., Álvarez-Errico, D., Esteller, M., 2020, The contribution of epigenetics to cancer immunotherapy, *Trends in Immunology*, 41(8), 676-691. ISSN: 1471-4906. DOI: 10.1016/j.it.2020.06.002.
- Wu, K.L., Tsai, Y.M., Lien, C.T., Kuo, P.L., Hung, J.Y., 2019, The roles of MicroRNA in lung cancer, *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7), 1611. ISSN: 1422-0067. DOI: 10.3390/ijms20071611.
- Zhang, Y., Sun, Z., Jia, J., Du, T., Zhang, N., Tang, Y., Fang, Y., Fang, D., 2021, “Overview of histone modification”, *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1283, 1-16. ISBN: 978-981-15-8103-8 (print) 978-981-15-8104-5 (web). DOI: 10.1007/978-981-15-8104-5_1.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Péptidos pequeños bioactivos en plantas y su papel en el desarrollo y la defensa

Bioactive small peptides in plants and their role in development and defense

Adrián Ávalos Rangel, Javier Raya González, José López Bucio

Para citar este artículo: Ávalos Rangel Adrián, Raya González Javier, López Bucio José, 2023. Péptidos pequeños bioactivos en plantas y su papel en el desarrollo y la defensa. Ciencia Nicolaita no. 89, 33-43.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.715>



Historial del artículo:

Recibido: 18 de abril de 2023

Aceptado: 23 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: adrian.avalos.rangel@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Péptidos pequeños bioactivos en plantas y su papel en el desarrollo y la defensa

Bioactive small peptides in plants and their role in development and defense

Adrián Ávalos Rangel¹, Javier Raya González², José López Bucio¹

¹Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

²Facultad de Químico-Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Resumen

La mayoría de las plantas cumplen su ciclo vital ancladas a un sustrato, por lo que manifiestan respuestas adaptativas muy eficientes ante los cambios en los factores ambientales y ante el ataque de herbívoros y patógenos, que son muy costosas energéticamente. El balance entre el crecimiento y la defensa ocurre mediante la producción temporal de diferentes reguladores del crecimiento, entre los que se encuentran una vasta gama de péptidos de entre 12 a 24 aminoácidos, incluyendo a la SISTEMINA y la familia CLAVATA3/EMBRYO SURROUNDING-RELATED (CLE), que activan cascadas de señalización para resistir el agobio o para modular la producción de células necesarias para la reparación de tejidos dañados. La percepción de estos péptidos ocurre mediante su interacción con proteínas cinasas localizadas en la membrana plasmática y que transducen las diversas señales mediante eventos de fosforilación. En este artículo, se describen avances recientes en la identificación de péptidos activos en plantas, con énfasis particular en sus mecanismos de acción, así como su influencia en procesos de crecimiento e inmunidad vegetal.

Palabras clave: Plantas, péptidos, meristemas, desarrollo, defensa.

Abstract

The majority of plants fulfill their life anchored to a substrate, so they manifest very efficient adaptive responses to changes in environmental factors and to the attack of herbivores and pathogens, which are very expensive energetically. The balance between growth and defense occurs through the temporary production of different growth regulators. These include a vast family of small peptides of between 12 to 24 amino acids, including SYSTEMIN and the CLAVATA3/EMBRYO SURROUNDING-RELATED family, which activate signaling cascades to resist stress or to modulate cell production necessary to repair the damaged tissues. The perception of such peptides occurs through their interaction with kinase proteins located in the plasma membrane, which transduce



environmental sensing responses through phosphorylation events. This review article describes recent advances about the roles of active peptides of plants, with particular emphasis on their mechanisms of action, and their influence on growth and immunity.

Keywords: Plants, peptides, meristems, development, defense.

Introducción

La sobrevivencia y productividad de las plantas implica el reconocimiento efectivo de diversos estímulos bióticos y abióticos que influyen sobre el crecimiento y desarrollo, así como en la respuesta inmune. En años recientes, se han logrado avances muy importantes en el entendimiento de los mecanismos de percepción de señales, entre las que participan hormonas como las auxinas, citocininas, etileno, ácido jasmónico, brasinoesteroides y en particular, un grupo de péptidos de entre 12 a 24 aminoácidos, que son motivo de esta revisión (Olsson *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2022; Fedoreyeva, 2023).

El descubrimiento de los péptidos bioactivos en plantas inició con el estudio de la respuesta a heridas en las hojas del jitomate, mediante trabajos realizados a principios de este siglo por el grupo del Dr. Clarence A. Ryan de la Universidad Estatal de Washington, con lo que se avanzó en el conocimiento sobre la adaptación al daño causado por mordeduras de herbívoros, picaduras de insectos y caída de granizo, que se pueden presentar de forma temporal, estacional o incluso recurrentemente durante el ciclo de vida (León *et al.*, 2001; Fürstenberg-Hägg *et al.*, 2013). Dichos avances permitieron la identificación de la SISTEMINA, un péptido de 18 aminoácidos cuya biosíntesis y transporte ocurre desde los sitios donde ocurren las heridas a órganos distantes (Ryan y Pearce, 2003). Posteriormente, se identificó un péptido bioactivo de 23 aminoácidos denominado AtPEP1 en la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, cuya aplicación inducía la producción de peróxido de hidrógeno y la expresión de la defensina PDF1.2, confiriendo tolerancia al patógeno causante de la pudrición de la raíz *Pythium irregulare* (Huffaker *et al.*, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2006).

La SISTEMINA y AtPEP1 se producen como productos de proteólisis de proteínas de mayor tamaño, el primero se traduce como una proteína de 200 aminoácidos, en tanto que el precursor de AtPEP1 es un polipéptido de 92 aminoácidos. Si bien, el papel de la

SISTEMINA y AtPEP1 se correlacionaba con la inmunidad vegetal, con el paso de los años se fueron identificando nuevos péptidos importantes para el crecimiento y desarrollo, e incluso la adaptación al estrés abiótico (Willoughby *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2022). Entre éstos se incluye a la familia CLAVATA3/EMBRYO SURROUNDING (CLE), los cuales tienen un tamaño de entre 12 a 14 aminoácidos y actúan a través de su unión a proteínas de la membrana plasmática que son estructural y funcionalmente similares a receptores con actividad de cinasa (**Figura 1**).

Debido a que los genes que codifican a las proteínas precursoras de péptidos están ampliamente representados, con más de 1000 genes, y sus posibles receptores con actividad de cinasa incluyen al menos 600 genes en el genoma de *A. thaliana*, se presenta una enorme redundancia funcional que inicialmente dificultó su estudio (Jose *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2022; Fedoreyeva, 2023). En esta revisión, se describen los principales avances alcanzados hasta la fecha, sobre el papel que desempeñan los péptidos bioactivos en la comunicación celular, la mitosis en los meristemos y la inmunidad vegetal, sus ligandos celulares, así como las relaciones que se establecen con vías de señalización durante los procesos de crecimiento y defensa.

Péptidos bioactivos pequeños implicados en la defensa

En el jitomate, el ARN mensajero que codifica para el precursor de la SISTEMINA se encuentra en niveles muy bajos en las hojas no heridas, pero se acumula ante un daño mecánico o laceración, particularmente en las células que rodean al floema, en el tejido vascular, y se transporta a tejidos distantes (**Figura 2**). El precursor, denominado PROSISTEMINA, se acumula exclusivamente en las células del parénquima del floema después de la herida y se procesa para liberar el péptido bioactivo de 18 residuos (Zhang y Hu, 2017). Aunque inicialmente se pensaba que el precursor carecía de actividad biológica, trabajos recientes

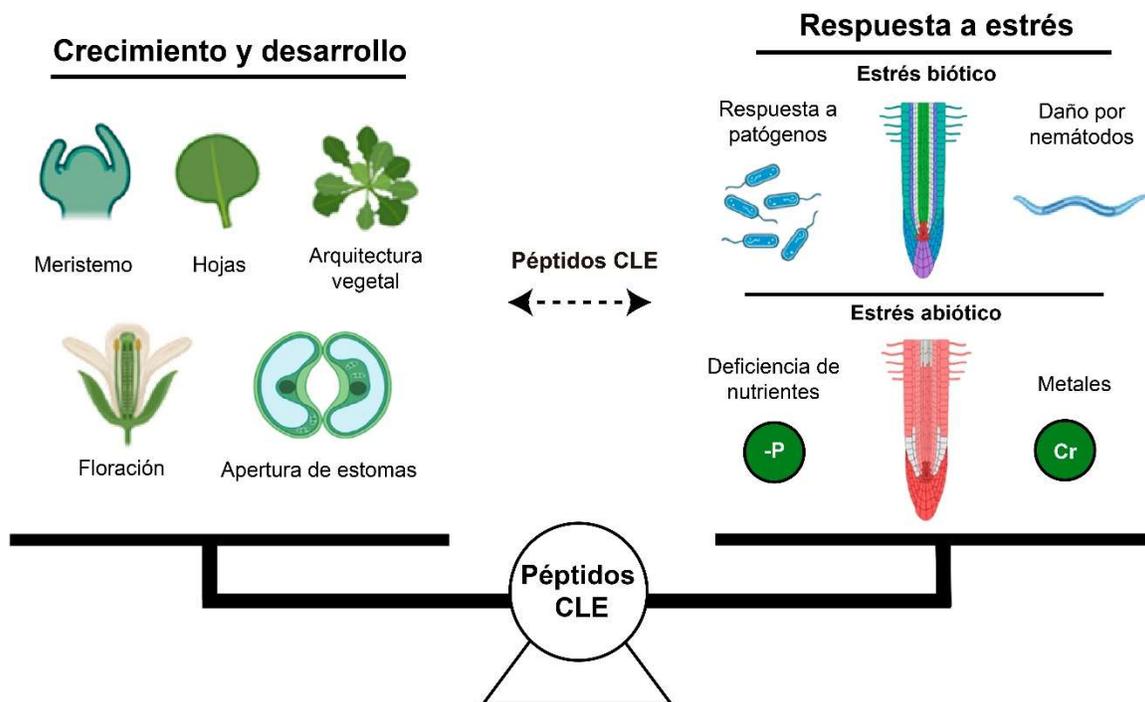


Figura 1. Los péptidos de la familia CLAVATA3/EMBRYO SURROUNDING (CLE) y su papel en el desarrollo vegetal y la adaptación al estrés. El balance entre el crecimiento y la respuesta al agobio depende de una percepción adecuada de señales ambientales, en que los péptidos de la familia CLE actúan como ligandos celulares en los meristemos, así como tejidos vegetativos y reproductivos, afectando el desarrollo foliar, la floración y apertura de estomas, la respuesta a herida y patógenos, deficiencia de nutrientes como el fósforo (P) y toxicidad por metales como el cromo (Cr). Figura modificada de Zhu *et al.*, (2023).

indican que la proteína intacta, o aún después de su procesamiento proteolítico, la PROSISTEMINA, promueve la expresión de genes de defensa temprana y tardía, que limitan el desarrollo y la supervivencia de las larvas de *Spodoptera littoralis* y otros insectos masticadores (Buonanno *et al.*, 2018; Molisso *et al.*, 2022).

En *Arabidopsis* se han identificado seis parálogos de un segundo precursor peptídico implicado en la inmunidad denominado PROPEP1 (de 92 residuos) y existen numerosos ortólogos en plantas de importancia agrícola (Huffaker *et al.*, 2006). ProAtPEP1 se procesa por una proteasa aspártica, presente en el apoplasto, codificada por el gen *CONSTITUTIVE DISEASE RESISTANCE 1*. Dicha enzima también escinde otros pro-péptidos de la misma familia, en respuesta a las oscilaciones intracelulares de calcio que ocurren en el tejido dañado (Hander *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019).

La expresión constitutiva de PROPEP1 en plantas transgénicas de *Arabidopsis* indujo la transcripción de la defensina PDF1.2, una proteína rica en cisteína que participa en la defensa contra patógenos y parásitos. Es de interés indicar que el fenotipo de las plantas

transgénicas crecidas en suelo incluyó un mayor desarrollo radicular en comparación con las plantas normales y resistencia al patógeno radicular *Pythium irregulare*, lo que implica funciones tanto en el desarrollo como en la defensa (Buonanno *et al.*, 2018; Molisso *et al.*, 2022).

El ácido jasmónico y sus precursores conocidos como jasmonatos son moléculas importantes para la inmunidad vegetal, el crecimiento y desarrollo de las plantas (Wasternack y Strnad, 2016). Tanto la SISTEMINA como AtPEP1 actúan como estimuladores de la biosíntesis de ácido jasmónico, en la transmisión de la información del daño que ocurre localmente, actuando como moléculas que alertan a otros tejidos, y que conllevan al reforzamiento de las paredes celulares y la producción de inhibidores de proteasas, contribuyendo en la resiliencia del organismo y en la resistencia manifiesta ante la agresión por insectos masticadores y daño mecánico (Shen *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020; Sun y Zhang, 2021). Lo anterior plantea como un reto determinar el orden jerárquico en que ocurre la señalización a nivel local o sistémico, ya que

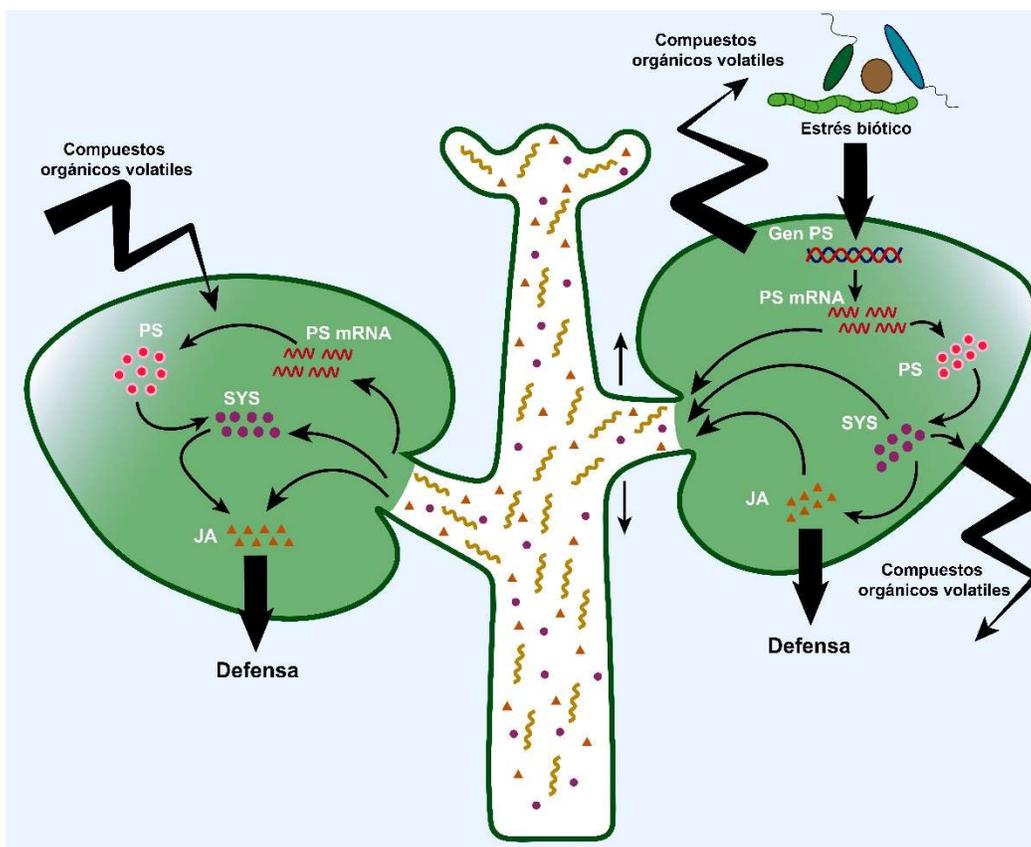


Figura 2. Respuestas locales y a distancia en hojas en las que participa la SISTEMINA en el follaje. La identificación de la SISTEMINA (SYS) ocurrió en plantas de jitomate atacadas por insectos masticadores. El daño por herida conduce a la expresión del gen de la PROSISTEMINA (PS) cuyos transcritos se transportan a través de los peciolo de las hojas y el tallo hacia regiones distantes, en donde se traduce, se procesa y potencia la liberación de ácido jasmónico (JA). Diferentes factores bióticos y abióticos, como volátiles, moléculas de patógenos, componentes estructurales de microorganismos, e incluso fragmentos de paredes celulares de la misma planta que se liberan durante el daño, podrían actuar a través de la SISTEMINA y otros péptidos con funciones regulatorias. Figura modificada de Zhang *et al.*, (2022).

diversas moléculas se mueven a través de los plasmodesmos, a través del apoplasto, dentro del tejido vascular o, como volátiles, a través del aire (Figura 2). La relación del ácido jasmónico con los péptidos bioactivos ante un daño o amenaza, probablemente requiere de una combinación de diferentes compuestos transportándose al mismo tiempo y a través de múltiples barreras, y la intensidad de la señal podría disminuir o aumentar con la distancia.

Papel de los péptidos pequeños en el desarrollo vegetal

El gen *CLAVATA3* codifica para un precursor que libera un péptido de 13 amino ácidos que es bioactivo en el meristemo del follaje mediante su interacción con el receptor codificado por el gen *CLAVATA1* (Hazak y Hardtke, 2016). Cascada abajo, la participación del factor de transcripción *WUSCHEL* (*WUS*) genera

cambios en la permeabilidad de la membrana nuclear a través de su unión a proteínas denominadas como exportinas, y esta interacción es importante para la formación de primordios de hojas (Plong *et al.*, 2021).

Más recientemente, se han identificado varios péptidos con similitud en la secuencia final de amino ácidos que se produce, por lo que fueron agrupados dentro de la familia CLE. Dichos péptidos interactúan con diferentes receptores con actividad de cinasa en los meristemos e inhiben el crecimiento de la raíz. Por ejemplo, el péptido CLE40 interactúa con el receptor ACR4 y restringe la expresión del factor de transcripción *WOX5* en el centro quiescente, afectando el nicho de células iniciales, y promoviendo la diferenciación, lo que resulta en la formación de pelos radiculares en la punta de la raíz (Berckmans *et al.*, 2020). De igual forma, el péptido CLE14 actúa como un represor de la elongación celular en condiciones de limitación de fósforo, un nutriente esencial para el crecimiento

(Gutiérrez-Alanís *et al.*, 2017), y como inductor de la formación de pelos radiculares en *Arabidopsis*, arroz y jitomate (Hayashi *et al.*, 2018; 2019), en tanto que en el follaje restringe la senescencia de las hojas causadas por la producción de especies reactivas de oxígeno (Zhang *et al.*, 2022). En explantes de *Medicago truncatula*, Kudriashov *et al.* (2023) identificaron tres péptidos (MtCLE8, 16, y 18) cuya expresión se incrementa en respuesta a tratamientos hormonales que promueven la formación de callos, y la sobreexpresión de *MtCLE16* disminuyó la embriogénesis somática, actuando como un antagonista de la división celular.

Por otra parte, el péptido ROOT GROWTH FACTOR (RGF1), interactúa con una familia de 5 receptores, denominados RGF1 INSENSITIVE (RGI) con dominios extracelulares ricos en leucina. El fenotipo de una mutante quintuple *rgi1/2/3/4/5*, es similar al de las mutantes con pérdida de función en las proteínas cinasas activadas por mitógenos MPK3, MPK6, MKK4 y MKK5, o YDA, las cuáles desarrollan una raíz corta con una actividad mitótica reducida, alteración en la formación de raíces laterales y una menor expresión de los factores de transcripción PLETHORA 1 y 2 (Lu *et al.*, 2020; Shao *et al.*, 2021; Jeon *et al.*, 2023).

Los péptidos EPIDERMAL PATTERNING FACTOR-LIKE2 (EPFL2) y EPFL9 ricos en cisteína, interactúan con el receptor ERECTA, así promueven el crecimiento de los cotiledones, la producción de óvulos en etapa reproductiva, la formación de las semillas y el crecimiento de los frutos (Hara *et al.*, 2009; Fujihara *et al.*, 2021). Mediante la tecnología de mutagénesis inducida por CRISPR/Cas9 se eliminaron individualmente cada uno de los 11 genes EPF/EPFL en el cultivar de arroz Kasalath. La pérdida de función de la mayoría de los genes *OsEPF/EPFL* no generó una alteración clara del fenotipo, mientras que la interrupción de *OsEPFL2* redujo el tamaño del grano, lo que resulta coincidente con su expresión en la panícula (Xiong *et al.*, 2022).

Receptores con actividad de cinasa

Diversos péptidos actúan mediante su interacción con proteínas receptoras con actividad de cinasa. Dichos receptores se reportaron inicialmente en los animales, por esta razón, a sus ortólogos vegetales se les ha denominado receptores similares a proteínas cinasas o Receptor-Like Kinases (RLK), por sus siglas en inglés (Dievart *et al.*, 2020). La primera RLK de plantas

se describió en el maíz por Walker y Zhang (1990), reportada entonces como una supuesta proteína cinasa estructuralmente relacionada con las tirosinas cinasas receptoras y hasta la fecha se les ha encontrado en un gran número de especies vegetales, con al menos 600 miembros en *Arabidopsis* y 1130 en arroz (Hazak y Hardtke, 2016; Mühlenbeck *et al.*, 2021). La señalización mediada por RLK promueve la activación transcripcional de genes implicados en la defensa contra patógenos, como en el caso del reconocimiento de las bacterias, en que un fragmento estructural del flagelo (flagelina22; FLG22) se une al receptor Flagelin Sensitive 2 (FLS2) para iniciar su interacción con los correceptores BAK1, formando heterodímeros que conducen a la posterior transfosforilación de su dominio citoplásmico (Sun *et al.*, 2013).

La mayoría de los receptores con actividad de cinasa en los vegetales tienen tres dominios proteínicos importantes: el dominio extracelular, el dominio transmembranal, y el dominio citoplasmático con actividad de cinasa. El dominio extracelular se encuentra en el extremo amino terminal y está conectado con el péptido señal, puede detectar un estímulo externo, se polimeriza con otros receptores homólogos o heterólogos, y luego inicia el proceso de transmisión de la señal. El dominio transmembranal atraviesa la membrana citoplasmática y contiene entre 22 a 28 aminoácidos y es responsable de fijar las proteínas a la membrana. El dominio cinasa intracelular está ubicado en el extremo carboxilo terminal y está altamente conservado, con sitios de fosforilación de serina/treonina, y la transmisión de la señal a otras proteínas cascada abajo ocurre a través de eventos de fosforilación. Se han descrito diversos dominios extracelulares en estas proteínas, lo que las ubica en al menos once subfamilias, de los cuáles, los dominios repetidos ricos en leucina (LRR-RLKs) son los más abundantes, estando presentes en al menos 223 miembros (Antolín-Llovera *et al.*, 2014). También se han reportado un gran número de receptores atípicos denominados cinasas citoplasmáticas similares a receptores (RLCK), que se fijan en la membrana plasmática, pero carecen de dominios de unión extracelular (**Figura 3**).

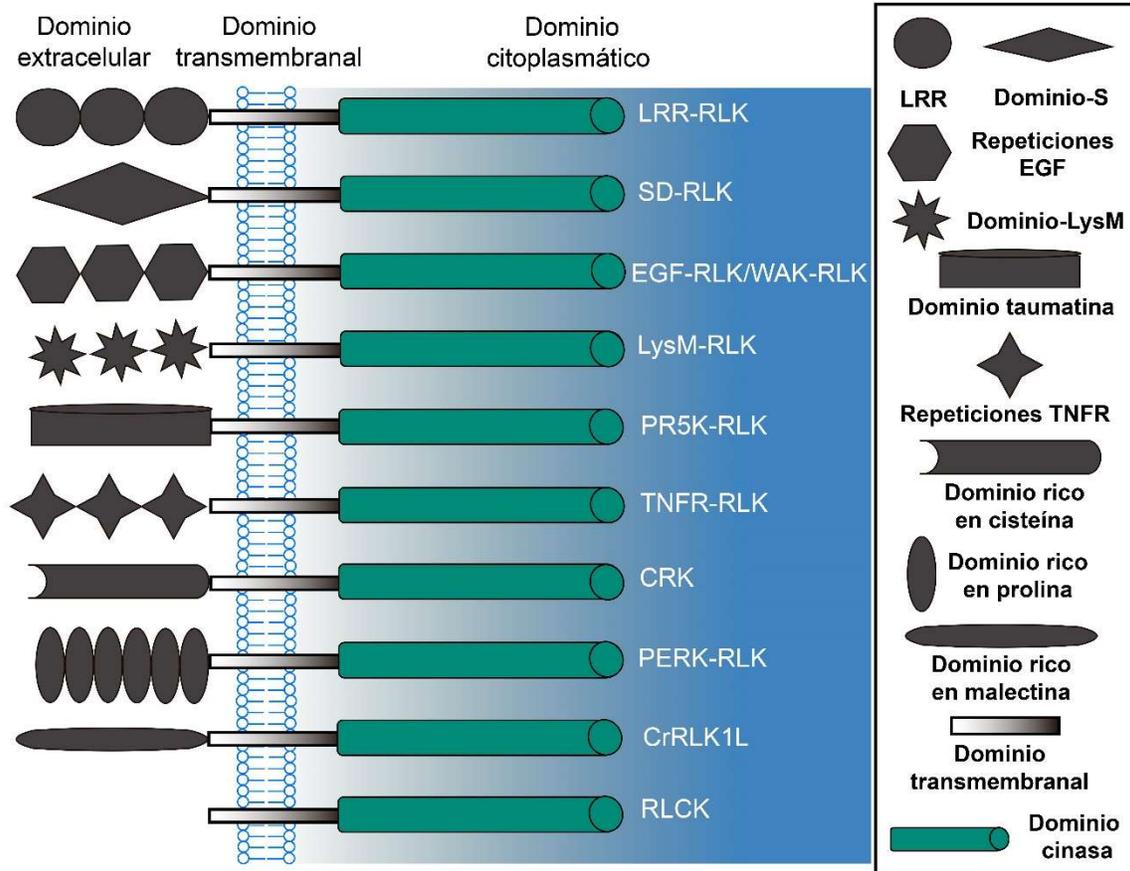


Figura 3. Estructura general de los receptores con actividad de cinasa de *Arabidopsis thaliana*. El dominio citoplásmico es la región más conservada de estas proteínas y posee actividad de cinasa. El dominio extracelular es variable e interactúa con diferentes ligandos, entre ellos se encuentran la SISTEMINA, elicitores de bacterias y hongos y algunos péptidos de la familia CLE. Figura modificada de Zhu *et al.*, (2023).

Funciones de los receptores tipo cinasa

El crecimiento y desarrollo de las plantas ocurre gracias a la actividad mitótica que se realiza en los meristemos de la raíz y del follaje. En estos sitios, el ciclo celular se mantiene constante, lo que permite la división celular que conlleva a la producción de biomasa durante todo el ciclo de vida. En *Arabidopsis*, la actividad mitótica del meristemo del follaje está controlada por el receptor CLAVATA 1 (CLV1), un miembro de la subfamilia LRR-RLK mediante el reconocimiento del péptido CLV3 y cuya interacción afecta la expresión del factor de transcripción WUS, que se expresa en la región central del meristemo (Hirakawa *et al.*, 2021). CLV1 se dimeriza con otros receptores con actividad de cinasa para formar un complejo receptor/co-receptor y posteriormente, actúa como puente en las señales de retroalimentación CLV3-WUS, modulando

el tamaño del meristemo y el número de órganos florales que se producen (Nimchuk *et al.*, 2017).

En el meristemo de la raíz se han descrito varios receptores que a través de la interacción con diferentes ligandos, inhiben la mitosis. En un trabajo reciente, Pelagio-Flores y col. (2019) mostraron que la mutación y la sobreexpresión del receptor CRK28, respectivamente, afecta de manera contrastante el crecimiento y desarrollo de *Arabidopsis*. Las mutantes *crk28-1* produjeron raíces de mayor longitud y pelos radiculares cortos, en tanto que las plantas transgénicas *35S:CRK28*, con expresión incrementada del receptor, presentaron raíces cortas con pelos radiculares muy largos, fenotipo similar al observado con la aplicación de diferentes dodecapeptidos (Hayashi *et al.*, 2018; 2019). El crecimiento retardado de la raíz en las líneas de *Arabidopsis* que sobreexpresan la construcción *35S:CRK28* correlacionó con el aumento en la expresión de genes inducibles por ácido abscísico y de

los factores de transcripción ABI4 y ABI5 (Pelagio-Flores *et al.*, 2019), indicando un posible papel en la adaptación de las plantas al estrés abiótico.

La familia RLK contiene varias proteínas que participan en el desarrollo de las hojas. El receptor ERECTA (ER) pertenece a la subfamilia LRR-RLK, que incluye también a ERECTA-LIKE 1 (ERL1) y ERL2, dichas proteínas desempeñan un papel importante en la regulación de la morfología foliar, desarrollo de los estomas y respuesta al estrés biótico y abiótico (Fischer y Teichmann, 2017; Chen *et al.*, 2019; Vu *et al.*, 2023). El receptor tipo cinasa mejor conocido y ampliamente estudiado, se denomina BRASSINOSTEROID RESPONSE 1 (BRI 1). Dicha proteína se identificó en el estudio de la respuesta de *Arabidopsis* a los brasinoesteroides, compuestos de naturaleza esteroidea con actividad hormonal. BRI1 es un LRR-RLK típico que se dimeriza con sus co-receptores SOMATIC EMBRYOGENESIS RECEPTOR KINASE 3 (SERK3) y BAK1 (Heese *et al.*, 2007; Graeff *et al.*, 2020, Mao y Li, 2020). BAK1 y SERK3 actúan en diversos procesos de crecimiento y desarrollo activando al factor transcripcional BRI1-EMS-SUPPRESSOR1 (BES1). El receptor SERK2 es un componente de la señalización por brasinoesteroides en el arroz, y cabe resaltar que su sobreexpresión aumenta el tamaño del grano y confiere resistencia al estrés salino (Dong *et al.*, 2020), lo que permite vislumbrar que la aplicación de esta tecnología permitiría incrementar la producción de alimentos a través de este cereal de importancia mundial.

En relación a la SISTEMINA, el péptido de la defensa, recientemente se descubrieron dos correceptores LRR-RK distintos denominados SYR1 y SYR2, de los cuáles SYR1 se une al péptido con alta afinidad y especificidad (Wang *et al.*, 2018). La actividad de SYR1, aunque no es decisiva para las respuestas locales y sistémicas que ocurren en respuesta a herida, resultó importante para la defensa contra insectos masticadores, lo que abre la posibilidad de que un solo péptido pudiera actuar mediante su interacción con varios y diversos receptores. Esta vía de señalización es sin duda, una de las más conocidas, ya que se han identificado rutas hormonales implicadas en la transducción de la señal como el etileno y el ácido jasmónico, así como segundos mensajeros como el calcio y las especies reactivas de oxígeno, que inducen cascadas de fosforilación a través de diferentes MAP cinasas (**Figura 4**).

Conclusiones y perspectivas

Desde la identificación de la SISTEMINA, se han encontrado un gran número de péptidos con funciones biológicas relevantes y diversas, como son la respuesta inmune, desarrollo de la raíz y follaje, la actividad de los meristemas y la respuesta hormonal a diferentes niveles. Los péptidos se producen mediante el procesamiento de precursores de mayor tamaño, mediante una familia de proteasas recientemente descritas como METACASPASAS tipo II (Shen *et al.*, 2019). El módulo CLE14-PEPR2 juega un papel importante en la adaptación de la raíz a la deficiencia de fosfato (Gutiérrez-Alanis *et al.*, 2017), lo que abre la posibilidad de que metales como el hierro y el cromo, que interactúan bioquímicamente con el fosfato a nivel de transporte (López-Bucio *et al.*, 2014; 2019), pudieran también involucrar péptidos pequeños en su señalización y receptores con actividad de cinasa.

Una distinción en la forma de actuar de la SISTEMINA y los péptidos CLE implicados en el desarrollo, es que lo hacen en concentraciones nanomolares o incluso picomolares, lo que los presenta como moléculas mucho más activas que los reguladores del crecimiento canónicos como el ácido jasmónico y las auxinas, que actúan en concentraciones micromolares (Hayashi *et al.*, 2018; 2019). La utilización de péptidos sintéticos como bioestimulantes podría representar una alternativa de bajo costo y amigable con el ambiente.

Mediante la secuenciación de los genomas vegetales, es posible aplicar estrategias de genética reversa, con la finalidad de obtener mutantes en cada uno de los receptores LRR-RLK predichos y caracterizar diferentes ligandos peptídicos para estudiar su actividad biológica en diferentes procesos y analizar la especificidad de su reconocimiento. Actualmente se desconoce si la SISTEMINA podría afectar el desarrollo de la raíz, su ramificación y capacidad para captar agua y nutrientes, por lo que caracterizar sus interacciones con las respuestas mediadas por otros péptidos extendería sus aplicaciones más allá del desarrollo y la defensa.

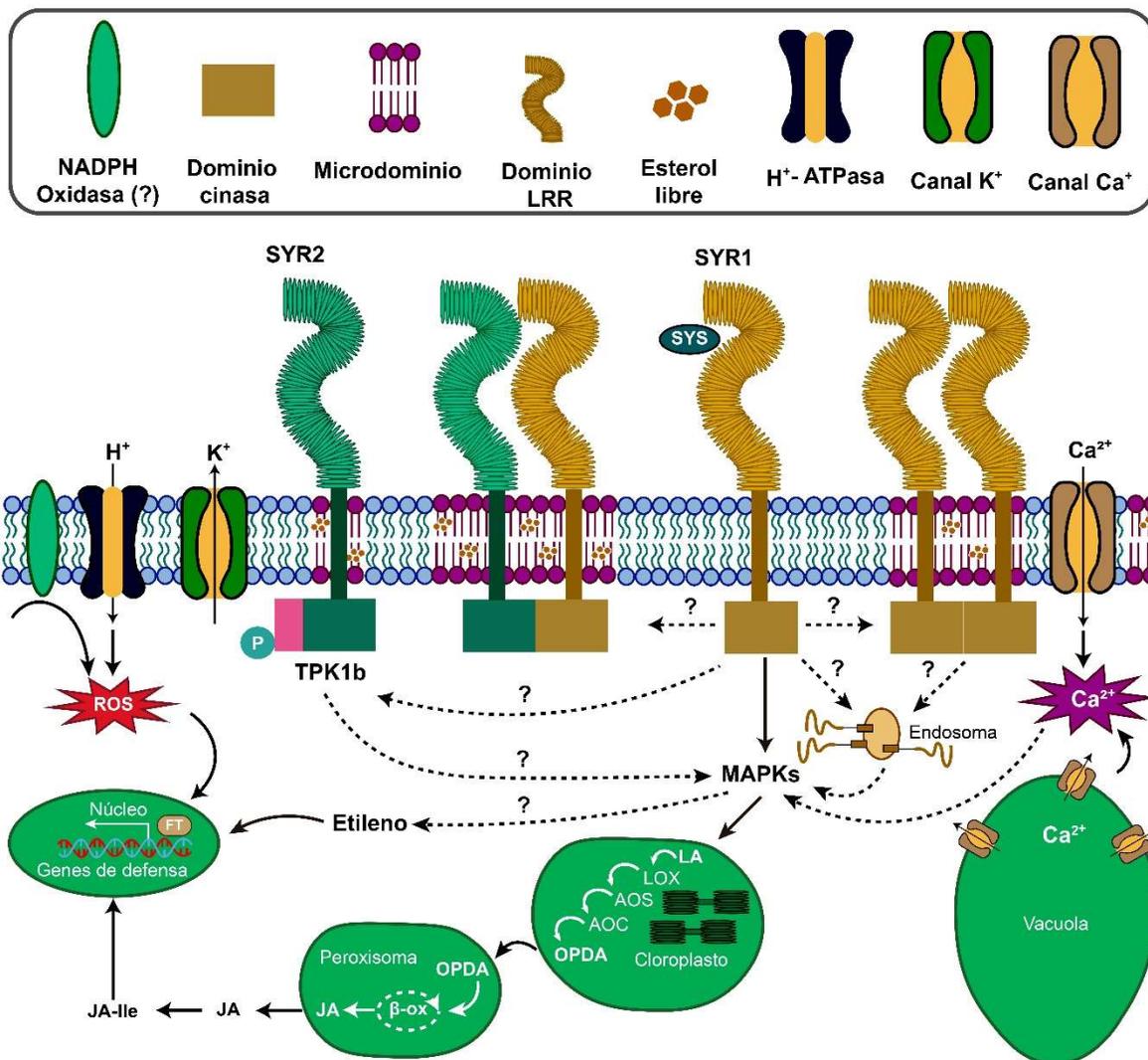


Figura 4. Cascada de transducción de señales mediada por la SISTEMINA. En la membrana plasmática, la SISTEMINA (SYS) interactúa con los receptores SYSTEMIN RECEPTOR 1 (SYR1) formando homodímeros o heterodímeros con SYR2, lo que conduce a la fosforilación de su dominio citoplásmico. Cascada abajo, las proteínas cinasas activadas por mitógenos (MAPKs) participan en la señalización actuando en sinergia con el etileno y el ácido jasmónico y segundos mensajeros como el calcio y las especies reactivas de oxígeno, lo que conduce a los cambios en la expresión de genes para el reforzamiento de la inmunidad. Figura modificada de Zhang et al., (2022).

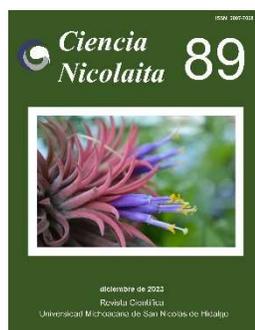
Referencias

- Antolín-Llovera M, Petutsching EK, Ried MK, Lipka V, Nürnberger T, Robatzek S, Parniske M. 2014. Knowing your friends and foes-plant receptor-like kinases as initiators of symbiosis or defence. *New Phytol.* 204(4):791-802.
- Berckmans B, Kirschner G, Gerlitz N, Stadler R, Simon R. 2020. CLE40 signaling regulates root stem cell fate. *Plant Physiol.* 182(4):1776-1792.
- Buonanno M, Coppola M, Di Lelio I, Molisso D, Leone M, Pennacchio F, Langella E, Rao R, Monti SM. 2018. Prosystemin, a prohormone that modulates plant defense barriers, is an intrinsically disordered protein. *Protein Sci.* 227(3):620-632.
- Chen S, Liu J, Liu Y, Chen L, Sun T, Yao N, Wang HB, Liu B. 2019. BIK1 and ERECTA play opposing roles in both leaf and inflorescence development in Arabidopsis. *Front Plant Sci.* 10:1480.
- Dievart A, Gottin C, Périn C, Ranwez V, Chantret N. 2020. Origin and diversity of plant receptor-like kinases. *Annu Rev Plant Biol.* 71:131-156.

- Dong N, Yin W, Liu D, Zhang X, Yu Z, Huang W, Liu J, Yang Y, Meng W, Niu M, Tong H. 2020. Regulation of brassinosteroid signaling and salt resistance by SERK2 and potential utilization for crop improvement in Rice. *Front Plant Sci.* 11:621859.
- Fedoreyeva LI. 2023. Molecular mechanisms of regulation of root development by plant peptides. *Plants* (Basel) 12(6):1320.
- Fischer U, Teichmann T. 2017. The ERECTA and ERECTA-like genes control a developmental shift during xylem formation in Arabidopsis. *New Phytol.* 213(4):1562-1563.
- Fujihara R, Uchida N, Tameshige T, Kawamoto N, Hotokezaka Y, Higaki T, Simon R, Torii KU, Tasaka M, Aida M. 2021. The boundary-expressed EPIDERMAL PATTERNING FACTOR-LIKE2 gene encoding a signaling peptide promotes cotyledon growth during *Arabidopsis thaliana* embryogenesis. *Plant Biotechnol.* (Tokyo) 38(3):317-322.
- Fürstenberg-Hägg J, Zagrobelny M, Bak S. 2013. Plant defense against insect herbivores. *Int J Mol Sci.* 14(5):10242-97.
- Graeff M, Rana S, Marhava P, Moret B, Hardtke CS. 2020. Local and systemic effects of brassinosteroid perception in developing phloem. *Curr Biol.* 30(9):1626-1638.e3.
- Gutiérrez-Alanís D, Yong-Villalobos L, Jiménez-Sandoval P, Alatorre-Cobos F, Oropeza-Aburto A, Mora-Macías J, Sánchez-Rodríguez F, Cruz-Ramírez A, Herrera-Estrella L. 2017. Phosphate starvation-dependent iron mobilization induces CLE14 expression to trigger root meristem differentiation through CLV2/PEPR2 signaling. *Dev Cell* 41:555-570.e3.
- Hander T, Fernández-Fernández ÁD, Kumpf RP, Willems P, Schatowitz H, Rombaut D, Staes A, Nolf J, Pottier R, Yao P, Gonçalves A, Pavie B, Boller T, Gevaert K, Van Breusegem F, Bartels S, Stael S. 2019. Damage on plants activates Ca²⁺-dependent metacaspases for release of immunomodulatory peptides. *Science* 363(6433):eaar7486.
- Hara K, Yokoo T, Kajita R, Onishi T, Yahata S, Peterson KM, Torii KU, Kakimoto T. 2009. Epidermal cell density is autoregulated via a secretory peptide, EPIDERMAL PATTERNING FACTOR 2 in Arabidopsis leaves. *Plant Cell Physiol.* 50(6):1019-31.
- Hayashi N, Tetsumura T, Sawa S, Wada T, Tominaga-Wada R. 2018. CLE14 peptide signaling in Arabidopsis root hair cell fate determination. *Plant Biotechnol.* (Tokyo) 35(1):17-22.
- Hayashi N, Rongkavilit N, Tetsumura T, Sawa S, Wada T, Tominaga-Wada R. 2019. Effect of the CLE14 polypeptide on GLABRA2 homolog gene expression in rice and tomato roots. *Plant Biotechnol.* (Tokyo) 36(3):205-208.
- Hazak O, Hardtke CS. 2016. CLAVATA 1-type receptors in plant development. *J Exp. Bot.* 67(16):4827-33.
- Heese A, Hann DR, Gimenez-Ibanez S, Jones AM, He K, Li J, Schroeder JI, Peck SC, Rathjen JP. 2007. The receptor-like kinase SERK3/BAK1 is a central regulator of innate immunity in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104(29):12217-12222.
- Hirakawa Y. 2021. CLAVATA3, a plant peptide controlling stem cell fate in the meristem. *Peptides* 142:170579.
- Huffaker A, Pearce G, Ryan CA. 2006. An endogenous peptide signal in Arabidopsis activates components of the innate immune response. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103(26):10098-10103.
- Jeon BW, Kim JS, Oh E, Kang NY, Kim J. 2023. ROOT MERISTEM GROWTH FACTOR1 (RGF1)-RGF1 INSENSITIVE 1 peptide-receptor pair inhibits lateral root development via the MPK6-PUCHI module in Arabidopsis. *J. Exp. Bot.* 74(5):1475-1488.
- Jose J, Ghantasala S, Roy Choudhury S. 2020. Arabidopsis transmembrane receptor-like kinases (RLKs): A bridge between extracellular signal and intracellular regulatory machinery. *Int. J. Mol. Sci.* 21(11):4000.
- Kudriashov AA, Zlydneva NS, Efremova EP, Tvorogova VE, Lutova LA. 2023. MtCLE08, MtCLE16, and MtCLE18 transcription patterns and their possible functions in the embryogenic calli of *Medicago truncatula*. *Plants* (Basel). 12(3):435.
- León J, Rojo E, Sánchez-Serrano JJ. Wound signalling in plants. 2001. *J. Exp. Bot.* 52(354):1-9.
- López-Bucio J, Hernández-Madrigal F, Cervantes C, Ortiz-Castro R, Carreón-Abud Y, Martínez-Trujillo M. 2014. Phosphate relieves chromium toxicity in *Arabidopsis thaliana* plants by interfering with chromate uptake. *Biometals* 27(2):363-370.
- López-Bucio JS, Salmerón-Barrera GJ, Ravelo-Ortega G, Raya-González J, León P, Reyes de la Cruz H, Campos-García J, López-Bucio J, Guevara-García AA. 2019. Mitogen-activated protein kinase 6 integrates phosphate and iron responses for indeterminate root growth in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 250(4):1177-1189.



- Lu X, Shi H, Ou Y, Cui Y, Chang J, Peng L, Gou X, He K, Li J. 2020. RGF1-RGI1, a peptide-receptor complex, regulates Arabidopsis root meristem development via a MAPK signaling cascade. *Mol. Plant* 13(11):1594-1607.
- Mao J, Li J. 2020. Regulation of three key kinases of brassinosteroid signaling pathway. *Int. J. Mol. Sci.* 21(12):4340.
- Molisso D, Coppola M, Buonanno M, Di Lelio I, Aprile AM, Langella E, Rigano MM, Francesca S, Chiaiese P, Palmieri G, Tatè R, Sinno M, Barra E, Becchimanzi A, Monti SM, Pennacchio F, Rao R. 2020. Not only systemin: prosystemin harbors other active regions able to protect tomato plants. *Front. Plant Sci.* 13:887674.
- Mühlenbeck H, Bender KW, Zipfel C. 2021. Importance of tyrosine phosphorylation for transmembrane signaling in plants. *Biochem. J.* 478(14):2759-2774.
- Nimchuk ZL. 2017. CLAVATA1 controls distinct signaling outputs that buffer shoot stem cell proliferation through a two-step transcriptional compensation loop. *PLoS Genet.* 13(3):e1006681.
- Olsson V, Joos L, Zhu S, Gevaert K, Butenko MA, De Smet I. 2019. Look closely, the beautiful may be small: precursor-derived peptides in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 70:153-186.
- Pelagio-Flores R, Muñoz-Parra E, Barrera-Ortiz S, Ortiz-Castro R, Saenz-Mata J, Ortega-Amaro MA, Jiménez-Bremont JF, López-Bucio J. 2019. The cysteine-rich receptor-like protein kinase CRK28 modulates Arabidopsis growth and development and influences abscisic acid responses. *Planta* 251(1):2.
- Plong A, Rodriguez K, Alber M, Chen W, Reddy GV. 2021. CLAVATA3 mediated simultaneous control of transcriptional and post-translational processes provides robustness to the WUSCHEL gradient. *Nat. Commun.* 12(1):6361.
- Ryan CA, Pearce G. 2003. Systemins: a functionally defined family of peptide signals that regulate defensive genes in Solanaceae species. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100 (Suppl 2):14577-14580.
- Shao Y, Yu X, Xu X, Li Y, Yuan W, Xu Y, Mao C, Zhang S, Xu J. 2020. The YDA-MKK4/MKK5-MPK3/MPK6 cascade functions downstream of the RGF1-RGI ligand-receptor pair in regulating mitotic activity in root apical meristem. *Mol. Plant* 13(11):1608-1623.
- Shen W, Liu J, Li JF. 2019. Type-II Metacaspases mediate the processing of plant elicitor peptides in Arabidopsis. *Mol. Plant* 12(11):1524-1533.
- Sun Y, Li L, Macho AP, Han Z, Hu Z, Zipfel C, Zhou JM, Chai J. 2013. Structural basis for flg22-induced activation of the Arabidopsis FLS2-BAK1 immune complex. *Science* 342(6158):624-628.
- Sun T, Zhang Y. 2021. Short- and long-distance signaling in plant defense. *Plant J.* 105(2):505-517.
- Vu MH, Hyun TK, Bahk S, Jo Y, Kumar R, Thiruppathi D, Iswanto ABB, Chung WS, Shelake RM, Kim JY. 2023. ROS-mediated plasmodesmal regulation requires a network of an Arabidopsis receptor-like kinase, calmodulin-like proteins, and callose synthases. *Front. Plant Sci.* 13:1107224.
- Walker JC, Zhang R. 1990. Relationship of a putative receptor protein kinase from maize to the S-locus glycoproteins of *Brassica*. *Nature* 345(6277):743-746.
- Wang L, Einig E, Almeida-Trapp M, Albert M, Fliegmann J, Mithöfer A, Kalbacher H, Felix G. 2018. The systemin receptor SYR1 enhances resistance of tomato against herbivorous insects. *Nat. Plants* 4(3):152-156.
- Wasternack C, Strnad M. 2016. Jasmonate signaling in plant stress responses and development - active and inactive compounds. *Nat. Biotechnol.* 25;33(5 Pt B):604-613.
- Willoughby AC, Nimchuk ZL. 2021. WOX going on: CLE peptides in plant development. *Curr. Opin. Plant Biol.* 63:102056.
- Xie H, Zhao W, Li W, Zhang Y, Hajný J, Han H. 2022. Small signaling peptides mediate plant adaptations to abiotic environmental stress. *Planta* 255(4):72.
- Yamaguchi Y, Pearce G, Ryan CA. 2006. The cell surface leucine-rich repeat receptor for AtPep1, an endogenous peptide elicitor in Arabidopsis, is functional in transgenic tobacco cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103(26):10104-10109.
- Zhang H, Hu Y. 2017. Long-distance transport of prosystemin messenger RNA in tomato. *Front. Plant Sci.* 8:1894.
- Zhang H, Zhang H, Lin J. 2020. Systemin-mediated long-distance systemic defense responses. *New Phytol.* 226(6):1573-1582.
- Zhang Z, Liu C, Li K, Li X, Xu M, Guo Y. 2022. CLE14 functions as a "brake signal" to suppress age-dependent and stress-induced leaf senescence by promoting JUB1-mediated ROS scavenging in Arabidopsis. *Mol. Plant* 15(1):179-188.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Cambio de color en las flores y producción asexual de semillas en *Fuchsia thymifolia* (Onagraceae)

Floral color change and asexual seed production in *Fuchsia thymifolia* (Onagraceae)

Cinthy Indira Cervantes Díaz y Eduardo Cuevas García*

Para citar este artículo: Cervantes Díaz Cinthy Indira y Cuevas García Eduardo, 2023. Cambio de color en las flores y producción asexual de semillas en *Fuchsia thymifolia* (Onagraceae). Ciencia Nicolaita no. 89, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.706>



Historial del artículo:

Recibido: 7 de febrero de 2023

Aceptado: 4 de junio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: eduardo.cuevas@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Cambio de color en las flores y producción asexual de semillas en *Fuchsia thymifolia* (Onagraceae)

Floral color change and asexual seed production in *Fuchsia thymifolia* (Onagraceae)

Cinthya Indira Cervantes Díaz y Eduardo Cuevas García*

Laboratorio de Evolución de Sistemas Reproductivos en Plantas. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

El cambio de color de las flores y la producción asexual de semillas (apomixis), son dos fenómenos poco estudiados en las angiospermas. En este trabajo estudiamos ambos fenómenos en *Fuchsia thymifolia*, una especie ginodioica en donde coexisten plantas hembra que únicamente producen flores femeninas y plantas con flores hermafroditas, en dos poblaciones naturales de Michoacán. Para estudiar el cambio de color de las flores, se marcaron botones florales en plantas hembra y hermafroditas, los cuales fueron censados y fotografiados desde el primero hasta el último día de vida de cada flor. Para determinar la producción de semillas por apomixis, se utilizaron plantas hembra donde se excluyeron botones florales de los polinizadores y posteriormente se evaluó la producción de frutos. Encontramos que el cambio de color de las flores ocurre tanto en flores femeninas como hermafroditas y este cambio ocurre independientemente de la polinización. La coloración de las flores fue de blanco, cuando las flores abren a rosa durante el tercer y cuarto día y finalmente guinda en los últimos días de vida de las flores (día 5 a 7-8). Además, las flores femeninas fueron más longevas que las hermafroditas. En cuanto a la apomixis, en ambas poblaciones estudiadas y durante dos años, entre el 16 y 20% de las flores embolsadas produjeron frutos maduros. El cambio de color es similar al detectado en otras especies y en general la mayor coloración coincide con la ausencia de recompensas florales en las flores hermafroditas o con la pérdida de receptividad del estigma en las flores femeninas. En cuanto a la apomixis, se requiere de estudios moleculares que confirmen que las semillas obtenidas son genéticamente idénticas a las plantas hembra, como es de esperarse en este fenómeno.

Palabras clave: Apomixis, ginodioicismo, polinización.

Abstract

Floral color change and the asexual seed production (apomixis) are two phenomena rarely studied in angiosperms. In this study, we assess both phenomena in *Fuchsia thymifolia*, a gynodioecious species where female plants that only produce female flowers, and hermaphroditic plants coexist.

To explore the floral color change, flower buds were marked on female and hermaphrodite plants, which were daily censused and photographed. To determine seed production by apomixis, in two natural populations from Michoacán, flower buds from female plants were excluded from pollinators and fruit production was subsequently evaluated. We found that floral color change occurs in both female and hermaphroditic flowers regardless of pollination. When the flowers open manifest a white color, which changed to pink during the third and fourth day and finally to deep reddish by 5 to 7-8 days, at the end of its life cycle. In addition, female flowers lived more than hermaphrodite ones. Regarding apomixis, in both studied populations and during two years, between 16 and 20% of the bagged flowers produced ripe fruits. The floral color change is similar to the reported in other species where dark coloration coincides with the absence of floral rewards in the hermaphrodite flowers or with the loss of stigma receptivity in the female flowers. Regarding apomixis, molecular studies are required to confirm that the seeds obtained are genetically identical to the female plants, as expected in this phenomenon.

Keywords: Apomixis, gynodioecy, pollination.

Introducción

La reproducción es uno de los eventos claves en el ciclo de vida de cualquier ser vivo. Mientras que en la mayoría de los animales vertebrados la reproducción sexual es la única alternativa, las plantas que producen flores o angiospermas presentan distintos mecanismos reproductivos como la exocruza, la autofertilización y la asexualidad (Richards, 2003; Barrett, 2010). Si bien alrededor del 80% de las especies de angiospermas dependen de polinizadores para su reproducción (Ollerton *et al.*, 2011), algunas plantas presentan propagación vegetativa, ya sea por medio de bulbos, chupones (como en el caso de los agaves), yemas, brotes, etc. De esta manera, se producen individuos “nuevos” que son menos costosos para la planta madre, pero con la desventaja de que son clones, es decir, que son genéticamente idénticos a la planta madre. Se ha estimado que el 68% de las herbáceas perennes en Gran Bretaña presentan algún tipo de reproducción vegetativa (Fenner y Thompson, 2005). Quizá el mecanismo más conocido de reproducción sexual de las angiospermas es la producción de semillas, la cual se puede dar por autofecundación (en el caso de algunas especies hermafroditas) o por exocruza entre distintas plantas de la misma especie (Schemske y Lande, 1985).

Un proceso poco conocido es la producción de semillas “asexuales”, es decir sin meiosis ni fertilización, lo que se conoce como agamosperma o apomixis. Este fenómeno se ha descrito en al menos 34 familias

de angiospermas y es especialmente frecuente en géneros como *Taraxacum*, conocido comúnmente como diente de león (Van Dijk, 2003). De manera similar a lo que ocurre con la propagación vegetativa, las semillas apomícticas son una copia idéntica del genotipo materno, por lo que en términos evolutivos la apomixis estricta puede considerarse un callejón sin salida. Sin embargo, si los clones apomícticos, se reproducen con líneas sexuales se puede incrementar la diversidad genética. En algunos casos, se ha documentado que las líneas apomícticas presentan una distribución más amplia que las líneas sexuales, lo que sugiere que la apomixis puede ayudar a la colonización de ciertos ambientes. A pesar de ser este un aspecto relevante, ha sido muy poco estudiado en las angiospermas (Hojsgaard y Horandl, 2019).

Otro aspecto poco estudiado, pero común en las angiospermas, es el relacionado con el cambio de color de las flores, que implica la ganancia o pérdida de pigmentos que van desde antocianinas, carotenoides y flavonoides, hasta la aparición de betalainas o un cambio de pH vacuolar (Niesenbaum, 1999). Existen por lo menos 33 órdenes, 78 familias y 253 géneros de angiospermas con especies cuyas flores cambian de color a lo largo de su vida (Weiss, 1995). Este proceso ha evolucionado de manera independiente en varias ocasiones, probablemente en respuesta a la selección por reconocimiento visual de los polinizadores, reflejando una convergencia funcional generalizada dentro de las plantas con flores (Oberrat y Böhning-Gaese, 1999).



De acuerdo con Weiss (1995) y Nuttman *et al.* (2006) antes de cambiar de color, las flores emiten una señal que indica la existencia de una recompensa como néctar y/o polen, en el momento en que presentan estigmas receptivos, mientras que las flores donde ya ha ocurrido el cambio de color son generalmente no gratificantes y/o sexualmente inviables. Por lo tanto, una hipótesis propone que el cambio de color en las flores se ha asociado con una disminución en las recompensas florales para los polinizadores, sin embargo, se ha propuesto que en ocasiones las plantas conservan las flores que han cambiado de color para mantener un despliegue floral mayor con la finalidad de atraer polinizadores a larga distancia por engaño, pero una vez que están cerca de las flores, estos podrán identificar y elegir solo aquellas que realmente ofrecen las recompensas esperadas de acuerdo al aprendizaje asociativo con los colores florales (Niesenbaum, 1999; Erickson y Pessoa, 2022). De esta forma, las plantas pueden ser polinizadas más eficientemente y los polinizadores pueden ahorrar tiempo y energía mientras se alimentan. En algunas especies, se ha identificado que el cambio de color es inducido por la fertilización de los óvulos, como en *Lupinus al-bifrons*, *L. pilosus*, *Lotus scoparius* y *Viola cornuta*; mientras que en especies como *Lupinus argenteus*, *Fuchsia excorticata* y *Pulmonaria* sp. el cambio de color está simplemente relacionado con las fases de maduración de las flores (Nuttman *et al.*, 2006).

Existen dos hipótesis para explicar el por qué las plantas conservan flores post-reproductivas, no funcionales, que cambian de color en lugar de simplemente tirarlas. La primera propone que el atractivo de la planta se ve reforzado por la retención de las flores senescentes. La segunda hipótesis se refiere al tiempo necesario para que los procesos fisiológicos de la senescencia o la abscisión de las estructuras atractivas ocurran (Delph y Lively, 1989). Por lo tanto, si la pérdida de estructuras atractivas no se da rápidamente o si se retrasa debido al tiempo requerido para otros procesos fisiológicos (por ejemplo, el crecimiento del tubo polínico), las visitas de polinizadores a flores post reproductivas podrían evitarse a través de un cambio de color asociado a la ausencia de recompensas (Delph y Lively, 1989). El objetivo de este trabajo es evaluar si *Fuchsia thymifolia* presenta producción ase-

xual de semillas y describir el patrón de cambio del color de las flores femeninas y hermafroditas a lo largo de su tiempo de vida.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en el Parque Nacional de Cerro Garnica, situado a 50 km al este de la ciudad de Morelia, Michoacán. El parque se encuentra a una altitud de entre 2, 900 y 3, 020 msnm y presenta una vegetación de pino-encino, donde el estrato arbustivo está representado por géneros como *Salvia*, *Lupinus* y *Bacharis*. La población de San José de la Cumbre se encuentra a una distancia de 4 km de Garnica y presenta el mismo tipo de vegetación, pero una menor altitud (2, 800 msnm).

El género *Fuchsia* (Onagraceae) comprende 110 especies agrupadas en 12 secciones (Berry *et al.*, 2004). *Fuchsia thymifolia* pertenecen a la sección Encliandra en la que se ha propuesto que su centro de origen y diversificación es el centro de México (Breedlove, 1969). *Fuchsia thymifolia* es un arbusto de 0.5 a 5 m de alto, densamente ramoso, morfológicamente ginodioico, en el que coexisten individuos hermafroditas y hembra en la misma población. Las flores femeninas son pequeñas (0.4-0.6 cm) de diámetro y presentan reminiscencias de anteras muy pequeñas y sin granos de polen (**Fig. 1**), mientras que las flores hermafroditas son más grandes (0.8-1.2 cm) con anteras con granos viables y estigma desarrollado (Arroyo y Raven, 1975; **Fig. 2**). Los polinizadores de esta especie son dípteros y abejas del género *Bombus* (Cervantes *et al.*, 2018).

Longevidad de flores y cambio de color

Durante el año 2013, en la población de Garnica se marcaron 15 plantas hembra y 15 hermafroditas, las cuales estaban separadas entre sí por al menos 5 m. En cada planta se marcaron 10 botones florales próximos a abrir, cada uno de ellos se aisló (con bolsas de tela fina), para evitar su polinización. Se registró el día de apertura de cada flor para fotografiar las flores en sus diferentes días de vida. Después se utilizaron las fotografías para elaborar una clasificación visual del color de la corola en tres categorías: blanco, rosado y guinda (**Figs. 1 y 2**) de acuerdo al día de vida de las flores.

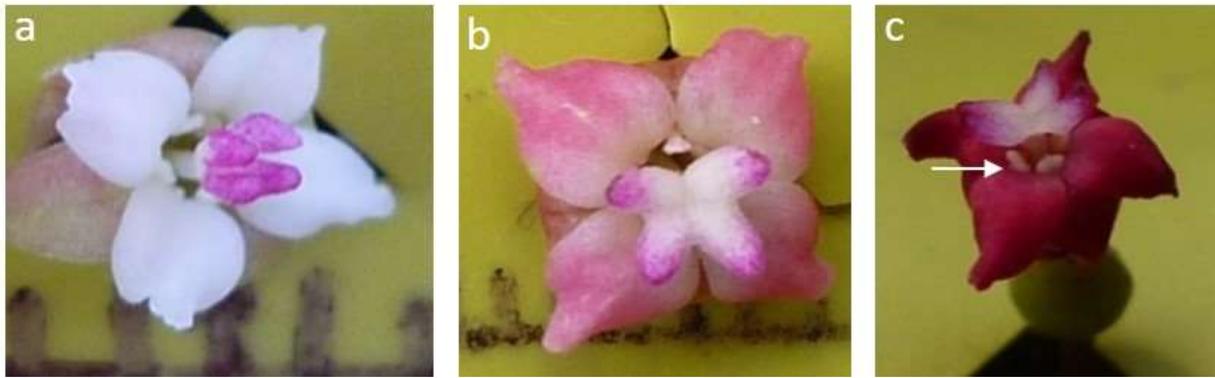


Figura 1. Se muestran ejemplos de las tres categorías de colores observados en las flores hembra de *Fuchsia thymifolia*: a) blanca, b) rosa, y c) guinda. Se puede apreciar al centro de las flores el estigma y la manera en que se abre conforme las flores maduran. La flecha señala las reminiscencias de las anteras.



Figura 2. Colores observados en las flores hermafroditas de *Fuchsia thymifolia*, a) flor blanca, b) flor rosada, y c) flor guinda.

Producción de frutos por apomixis

En julio de 2013 en la población de Garnica se marcaron 30 plantas hembra distintas a las antes mencionadas y en cada una se embolsaron tres botones florales próximos a abrir (90 botones en total). En el 2014, en Garnica y en San José de la Cumbre, se seleccionaron 10 plantas hembra por población. En cada planta se aislaron en promedio 6 botones florales próximos a abrir utilizando bolsas de malla muy fina. En total en Garnica se aislaron 58 botones y 64 en San José de la Cumbre. Posteriormente, fueron monitoreados periódicamente, con la finalidad de registrar si llegaban a producir frutos maduros. Debido a que las flores hembra carecen de anteras con granos de polen, si se registra una producción de frutos, se asume que es por apomixis, ya que no puede haber autofecundación en este tipo de flores por definición.

Resultados

Longevidad de flores y cambio de color

En total se clasificaron 189 fotografías de flores, siendo 109 de hembra y 80 de hermafroditas (**Tabla 1**). El menor número de flores hermafroditas se debe a que en promedio viven menos días (4-5 días) que las flores hembra (6-7 días).

Las fotografías de las flores hembra muestran un cambio de coloración, en donde el primero y segundo día de vida predomina el color blanco con un 88 y un 77%, respectivamente. Para el tercer día, un 61% presenta colores rosados y en el cuarto día un 50% presenta tanto colores rosados como guindas. En el día cinco, el color rosado prevaleció con un 69%. Los días seis y siete, con un color guinda del 61 y 65%, respectivamente. En comparación con las flores hermafroditas, una mayor cantidad de flores hembra permanecieron abiertas hasta el séptimo día, e incluso algunas flores hembra vivieron hasta 10 días (**Figs. 3 y 4**).



Tabla 1
Número de fotografías de flores por morfo por día de vida de *F. thymifolia*.

Flores/Día	1	2	3	4	5	6	7
Hembra	17	13	13	10	16	23	17
Hermafroditas	16	10	17	20	12	5	0

En las flores hermafroditas, se puede apreciar que en los dos primeros días de vida, el color blanco predomina con un 62% y 70%, respectivamente, y para el tercer día, la categoría de color rosado domina con un 59%. Entre los días 4, 5 y 6 ocurrió una proporción de 65, 75 y 100% de flores guindas, respectivamente. Cabe señalar que el color guinda en las flores de este morfo fue visible desde el segundo día con un 10% y el tercer día con un 23%. En este morfo las flores vivieron entre 5 y 6 días (**Figs. 3 y 4**).

Producción de frutos por apomixis

En el 2013 en la población de Garnica, el 19% de las flores femeninas excluidas de polinizadores produjeron frutos y en el 2014 en Garnica y San José, el 16%

y el 20% de las flores, produjeron frutos, respectivamente.

Discusión

El cambio de color por lo general coincide con un cambio en la recompensa floral, actuando como una señal visual para los visitantes, que se alimentan preferentemente en la fase de color gratificante (Nuttman, 2006; Weiss, 1995). En las flores hermafroditas el cambio de color de blanco a guinda ocurre más rápido, porque estas flores viven menos comparadas con las flores hembra. Fue notorio, que las flores hermafroditas presentan colores rosados desde la antesis, y para el segundo día pueden ser de color guinda. Por el contrario, las flores hembra suelen ser blancas

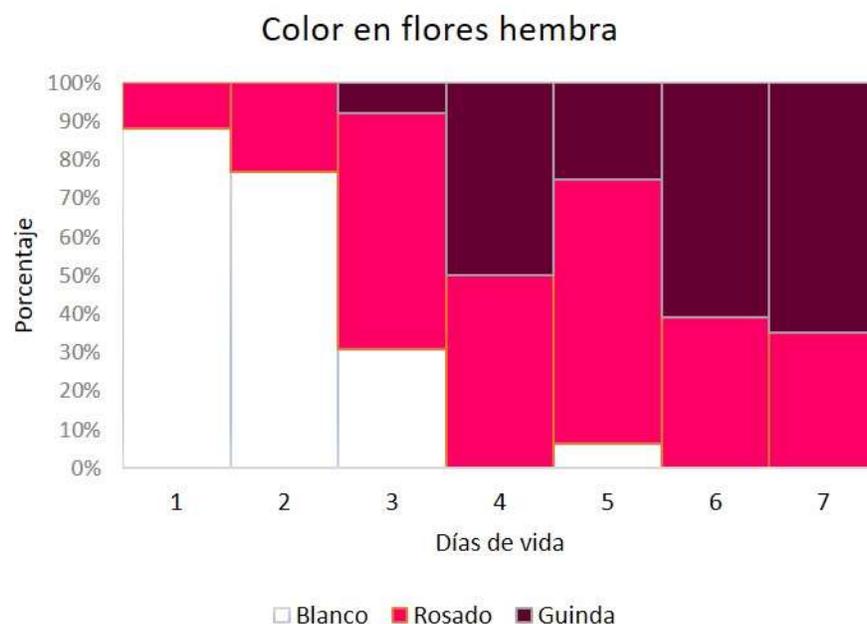


Figura 3. Se muestra el cambio de color de las flores hembra de acuerdo a las tres categorías propuestas (blanco, rosa y guinda) y el día de vida de las flores. De manera general se aprecia que al abrir las flores son blancas y conforme pasan los días el color cambia a rosa y finalmente a guinda (N = 109 flores).

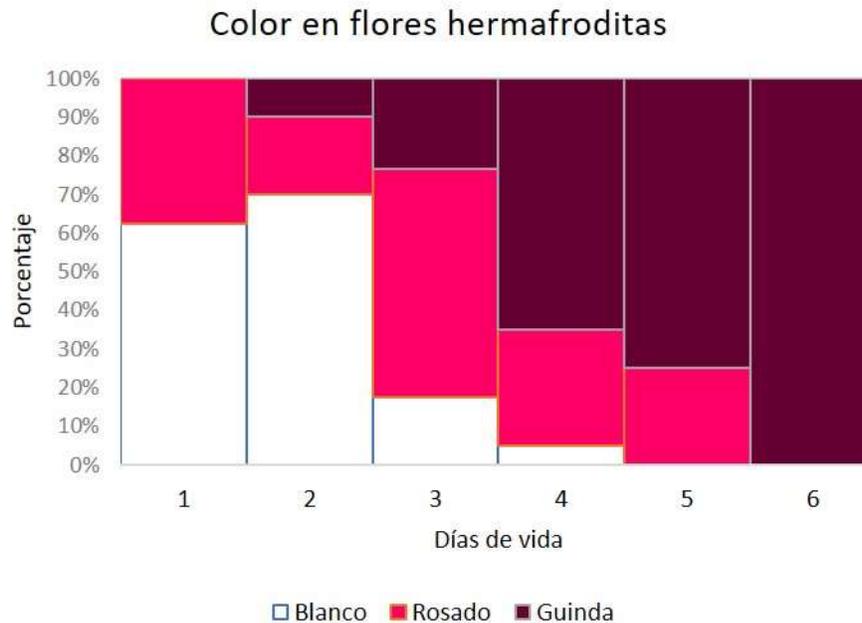


Figura 4. Se muestra el cambio de color de las flores hermafroditas de acuerdo a las tres categorías propuestas (blanca, rosa y guinda) y el día de vida de las flores. Se aprecia que al abrir las flores son blancas y conforme pasan los días el color cambia a rosa y finalmente a guinda.

durante los primeros tres días y después van cambiando su tonalidad de rosada a guinda, y en ocasiones, llega a ser un color guinda muy oscuro. Por otro lado, en trabajos complementarios con la misma especie, se ha descrito que la producción de néctar es mayor entre el tercer y quinto día de vida de las flores, además, durante estos días, las flores reciben significativamente más visitas florales (Cervantes *et al.*, 2018). Por lo tanto, existe una correlación entre el color de las flores, la recompensa floral (néctar) y las visitas de los polinizadores.

El hecho de que la longevidad de las flores femeninas de *F. thymifolia* fuera mayor que el de las hermafroditas, parece ser una situación común en especies dimórficas. Por ejemplo, en *Myracrodruon urundeuva*, un árbol dioico polinizado por abejas, las flores femeninas fueron tres veces más longevas que las flores masculinas (Calaças *et al.*, 2022). En el arbusto ginodioico *Geranium sylvaticum*, también se encontró que las flores femeninas viven más y presentan un mayor tamaño de estigma en comparación con las flores hermafroditas (Elzinga y Varga, 2017). Es posible que la mayor longevidad de las flores femeninas y el mayor tamaño de estigma, pueden aumentar las probabilidades de que sus óvulos sean fecundados, a diferencia de las flores masculinas en donde la dispersión de polen generalmente ocurre en menor tiempo

(Ashman, 1994). Es relevante mencionar, que el cambio de coloración ocurrió independientemente de que las flores no fueran fertilizadas, ya que las flores estudiadas estuvieron embolsadas. Por lo tanto, el cambio de color en las flores de *F. thymifolia*, ocurre en ambos sexos y de manera independiente a la polinización, por lo que puede estar dado por los procesos propios de la senescencia (Delph y Lively, 1989).

Respecto a la apomixis, ésta generalmente se infiere cuando hay producción espontánea de semillas bajo condiciones de aislamiento de los polinizadores, muchas veces acompañado de la emasculación (Van der Hulst *et al.*, 2000; Peng-fei *et al.*, 2006). En *F. thymifolia*, durante los dos años de estudio y en ambas poblaciones hubo producción de frutos en las flores femeninas aisladas de los polinizadores. Sin embargo, no sabemos qué tan frecuente sea este fenómeno en otras poblaciones. Un estudio reciente ha demostrado que esta especie ha hibridado con *F. microphylla* en ambas poblaciones de estudio (Cervantes *et al.*, en preparación). Es posible que la hibridación esté relacionada con la producción asexual de semillas, como se ha documentado en otros géneros (Dobes *et al.*, 2007; Sarhanov *et al.*, 2017), pero hasta la fecha es tan solo una hipótesis. Otra posibilidad es que las semillas apomíticas faciliten la colonización



de otras poblaciones en donde exista una baja disponibilidad de polinizadores. También es necesario complementar lo anterior con estudios moleculares para confirmar que las semillas producidas son genéticamente idénticas a las plantas maternas como se ha demostrado en otras especies (Pangsuban *et al.*, 2009; Heenan, 2010). Se ha reportado que los frutos apomícticos producen pocas semillas y más pequeñas comparadas con las semillas de frutos de exocruza natural o artificial (Pangsuban *et al.*, 2009; Heenan, 2010; De Farias, 2022). La mayoría de los frutos de *F. thymifolia* poseen semillas de diferentes tamaños sin importar si son de origen apomíctico o no (datos no publicados).

La apomixis es una estrategia efectiva en la evolución de ciertos grupos de plantas, ayudando a mantener linajes híbridos, o citotipos con desbalance cromosómico, al permitir su persistencia y dispersión a largo plazo. Así mismo, las especies apomícticas muestran una mayor capacidad adaptativa y una mayor habilidad de colonización al ocupar nichos ecológicos extremos o hábitats con disturbios (partenogénesis geográfica; Hajrudinovic-Bogunic, 2023). En especial la apomixis disminuye la dependencia de las hembras hacia el polen de sus conespecíficos (Heenan, 2010). En el caso de las poblaciones estudiadas de *F. thymifolia*, se sabe que solo las flores hembra producen néctar y tienen una preferencia de visita por parte de los polinizadores en sus fases de color rosado y guinda, en comparación con las flores hermafroditas (Cervantes *et al.*, 2018), por lo que la apomixis podría estar contribuyendo ampliamente en su éxito reproductivo, es necesario un estudio molecular para confirmar que las semillas producidas son genéticamente idénticas a las plantas maternas como es de esperarse en la apomixis.

Referencias

Arroyo, M.T.K., Raven, P.H., 1975, The evolution of subdioecy in morphologically gynodioecious species of *Fuchsia* sect. *Encliandra* (Onagraceae). *Evolution*, 500-511.

Ashman, T.L., Schoen, D.J., 1994, How long should flowers live?. *Nature*, 371(6500), 788-791.

Barrett, S.C., 2010, Understanding plant reproductive diversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1537), 99-109 <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0199>.

Berry, P.E., Hahn, W.J., Sytsma, K.J., Hall, J.C., Mast, A., 2004, Phylogenetic relationships and biogeography of *Fuchsia* (Onagraceae) based on noncoding nuclear and chloroplast DNA data. *American Journal of Botany*, 91(4), 601-614. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.4.601>.

Breedlove, D.E., 1969, The systematics of *Fuchsia* section *Encliandra* (Onagraceae). *Univ. Calif. Publ. Bot.* 53, 1-69.

Calaça, P., de Freitas, L.D., Schlindwein, C., 2022, Strongly unbalanced gender attractiveness in a dioecious mass flowering tropical tree pollinated by stingless bees. *Plant Biology*, 24(3), 473-481 <https://doi.org/10.1111/plb.13398>.

Cervantes, C., Alvarez, A., Cuevas, E., 2018, Small but attractive: female-biased nectar production and floral visitors in a dimorphic shrub. *Plant Biology*, 20(1), 160-164 <https://doi.org/10.1111/plb.12653>.

De Farias, L.F., 2022, Floral biology and reproductive system of physic nut (*Jatropha curcas* L., Euphorbiaceae) in 'Recôncavo da Bahia', Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 94(3).

Delph, L.F., Lively, C.M., 1989, The evolution of floral color change: pollinator attraction versus physiological constraints in *Fuchsia excorticata*. *Evolution*, 43(6), 1252-1262.

Dobeš, C., Sharbel, T.F., Koch, M., 2007, Towards understanding the dynamics of hybridization and apomixis in the evolution of the genus *Boechera* (Brassicaceae). *Systematics and Biodiversity*, 5(3), 321-331. <https://doi.org/10.1017/S1477200007002423>.

Elzinga, J.A., Varga, S., 2017, Prolonged stigma and flower lifespan in females of the gynodioecious plant *Geranium sylvaticum*. *Flora*, 226, 72-81.

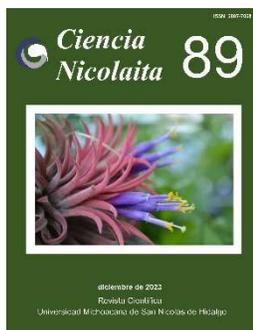
Erickson M.F., Pessoa D.M.A., 2022, Determining factors of flower coloration. *Acta Botanica Brasilica*, 36: e2021abb0299.

Fenner, M., Thompson, K., 2005, *The ecology of seeds*. Cambridge university press.

Hajrudinovic-Bogunic A., Frajman B., Schönschwetter P., Siljak-Yakovlev S., Bogunic F., 2023, Apomictic mountain whitebeam (*Sorbus austriaca*, Rosaceae) comprises several genetically and morphologically divergent lineages. *Biology*, 12,380. <https://doi.org/10.3390/biology12030380>

Heenan P.B., Dawson M.I., Bicknell R.A., 2010, Evidence for apomictic seed formation in *Coprosma waima* (Rubiaceae). *New Zealand Journal of Botany*, 40(3), 347-355. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2002.9512795>

- Hojsgaard, D., Hörandl, E., 2019, The rise of apomixis in natural plant populations. *Frontiers in Plant Science*, 10, 358.
- Niesenbaum R.A., Patselas M.G., Weiner S.D., 1999, Does flower color change in *Aster vimineus* cue pollinators?. *The American Midland Naturalist*, 141(1), 59-68. [http://dx.doi.org/10.1674/00030031\(1999\)141\[0059:D FCCIA\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1674/00030031(1999)141[0059:D FCCIA]2.0.CO;2)
- Nuttman, C.V., Semida, F.M., Zalut, S., Willmer, P.G., 2006, Visual cues and foraging choices: bee visits to floral colour phases in *Alkanna orientalis* (Boraginaceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 87(3), 427-435.
- Oberrath, R., Böhning-Gaese, K., 1999, Floral color change and the attraction of insect pollinators in lungwort (*Pulmonaria collina*). *Oecologia*, 121, 383-391.
- Ollerton, J., Winfree, R., and Tarrant, S. 2011, How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, 120(3), 321-326.
- Pangsuban S., Bamroongruga N., Kanchanapoom. K, Nualsri C., 2009, Facultative apomixis in *Garcinia atrovirens* (Clusiaceae) and effects of different pollination regimes on reproductive success. *Tropical Life Sciences Research*, 20(2), 89-108.
- Peng-fei, Z., Yang Jun-qiang, Y., Yu-qin, S., Guo-Liang, W., Yan-hui, C., 2006, Apomixis and new selections of walnut. In XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: II International Symposium on Plant Genetic Resources of Horticultural Plants 760 (pp. 541-548).
- Richards, A., J., 2003, Apomixis in flowering plants: an overview. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 358:1085-1093.
- Schemske, D.W., Lande, R., 1985, The evolution of self-fertilization and inbreeding depression in plants. II. Empirical observations. *Evolution*, 39:41-52.
- Šarhanová, P., Sharbel., T.F., Sochor., M., Vašut, R. J., Dančák, M., Trávníček, B., 2017, Hybridization drives evolution of apomicts in *Rubus subgenus Rubus*: evidence from microsatellite markers. *Annals of Botany*, 120:317-328.
- Sun, S.-G; K. Liao; J. Xia, Y.H. Guo., 2005, Floral colour change in *Pedicularis monbeigiana* (Orobanchaceae). *Plant Systematics Evolution* 255:77-85.
- Van der Hulst., R.G.M., Mes, T.H., Den Nijs, J. C. M., Bachmann, K., 2000, Amplified fragment length polymorphism (AFLP) markers reveal that population structure of triploid dandelions (*Taraxacum officinale*) exhibits both clonality and recombination. *Molecular Ecology*, 9:1-8.
- Van Dijk, P.J., 2003, Ecological and evolutionary opportunities of apomixis: insights from *Taraxacum* and *Chondrilla*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1434), 1113-1121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1302>.
- Weiss, M. R., 1995, Floral color change: a widespread functional convergence. *American Journal of Botany*, 82(2), 167-185.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Los peces de cuevas de México a través de la sistemática filogenética

Mexican cave fish through phylogenetic systematics

Rodolfo Pérez-Rodríguez, Rosa Gabriela Beltrán-López, Omar Domínguez-Domínguez
y Juan Manuel Rivas-González

Para citar este artículo: Pérez-Rodríguez Rodolfo, Beltrán-López Rosa Gabriela, Domínguez-Domínguez Omar y Rivas-González Juan Manuel, 2023. Los peces de cuevas de México a través de la sistemática filogenética. Ciencia Nicolaita no. 89, 53-70. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.690>



Historial del artículo:

Recibido: 30 de agosto de 2022

Aceptado: 28 de abril de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: rodolfo.perez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Los peces de cuevas de México a través de la sistemática filogenética

Mexican cave fish through phylogenetic systematics

Rodolfo Pérez-Rodríguez¹, Rosa Gabriela Beltrán-López², Omar Domínguez-Domínguez¹
y Juan Manuel Rivas-González³

¹Laboratorio de Biología Acuática, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, 58000, Morelia, Michoacán, México.

²Laboratorio de Ictiología, Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.

³Escuela de Estudios Superiores del Jicarero, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Jojutla, Morelos, México.

Resumen

Los peces de cuevas representan un excelente modelo para estudiar la evolución del fenotipo, debido a su alta asociación con el ambiente extremo en el que han evolucionado. La adaptación de estos organismos se ha dado como una respuesta a presiones de selección que se refleja en cambios fenotípicos asociados con su particular estrategia de vida en la oscuridad. Dentro del marco conceptual de la sistemática filogenética, estas adaptaciones se reconocen como convergencias o paralelismos evolutivos. Los peces de cuevas de México están representados en seis de los 10 órdenes de Actinopterygii; presentan diferentes niveles de troglomorfofismo asociado al tiempo de aislamiento en las cuevas, y aunque la mayoría son de origen dulceacuícola, también los hay de procedencia marina. Bajo este contexto, las filogenias han tenido importantes implicaciones para la taxonomía y el entendimiento de la evolución de estos peces.

Palabras clave: Sistemática filogenética, clasificación, convergencias y paralelismos, peces de cuevas, sistemas kársticos de México.

Abstract

Cave fishes are an excellent model for the study of phenotypic evolution, due to the high association between their phenotype and the extreme environment in which they evolved. Adaptation in these organisms has occurred as a response to selection pressures, reflecting in phenotypic changes associated with their particular strategy of life in darkness. Within a phylogenetic systematics framework, these adaptations are recognized as convergences or evolutionary parallelisms. Cave fishes from México are represented in six of 10 orders of Actinopterygii, presenting different degrees of troglomorfofism related to their isolation time within caves, and although most of them came from



freshwater, a few may be of marine origin. In this context, the phylogenies have had important implications for the taxonomy and evolution of these fishes.

Keywords: Phylogenetic systematic, classification, convergence and parallelism, Mexican cave-fish, Karst systems of México.

Introducción

Desde *El origen de las especies* publicado en 1859 por Darwin, los árboles filogenéticos son la representación gráfica por excelencia del cambio evolutivo a través del tiempo. Sus ramificaciones y especies terminales implican relaciones ancestrales en sus distintos niveles. Las agrupaciones derivadas de estas relaciones filogenéticas corresponden a lo que se conoce como clasificación natural, puesto que refleja el origen e historia evolutiva de los organismos (Morrone, 2000). En términos generales, se considera que las principales contribuciones de las filogenias son: 1) la inferencia de las relaciones genealógicas (genealogía taxonómica; ej. entre grupos reconocidos como taxa), 2) el establecimiento de patrones de diversidad en espacio y tiempo, 3) la determinación de caracteres ancestrales y recientes, y 4) la identificación de caracteres homólogos y homoplásicos. En relación con estas últimas, dentro del contexto filogenético se distinguen paralelismos, convergencias y reversiones (Arnedo, 1999; Futuyma y Kirkpatrick, 2017). Particularmente, los paralelismos y las convergencias adquieren relevancia para el estudio de la evolución que ocurre cuando las especies ocupan nichos ecológicos similares, pero que se da en especies de linajes evolutivamente distantes (convergencias), o bien en especies cercanas o poblaciones (paralelismos) (Futuyma y Kirkpatrick, 2017). Ambos términos refieren a la evolución independiente como resultado de una respuesta adaptativa a presiones de selección, como los cambios en el fenotipo asociados con una particular estrategia de vida (Wake *et al.*, 2011).

Existen varios ejemplos clásicos y notables de convergencias evolutivas como el caso del ojo en los cefalópodos y en los vertebrados; las alas de los murciélagos, aves y pterodáctilos; el plan corporal con forma de torpedo en los tiburones, delfines e ictiosaurios; la inteligencia en los primates, cuervos y delfines, y el caso de las glicoproteínas que circulan en la sangre de peces del Ártico y de la Antártida y que les sirve como

anticongelante para poder vivir en temperaturas extremadamente bajas (Gabora, 2013). Otro ejemplo notable es la pérdida o reducción de los ojos y pigmentación en los animales que habitan cuevas y cavernas en condiciones de obscuridad y que se conocen como troglomorfismos. En particular, los peces de cuevas son un excelente modelo de estudio, puesto que presentan una amplia variación en los rasgos troglomórficos, como distintos grados de reducción de ojos, de pigmentación y de presencia de escamas, con una vasta gama de formas intermedias y combinaciones (Romero, 2011).

México figura como el tercer país con la mayor riqueza de especies de peces de cuevas (Proudlove, 2010). Los estudios filogenéticos recientes han evidenciado una evolución independiente (como convergencias y paralelismos) de estos organismos (Wilcox *et al.*, 2004; Ornelas *et al.*, 2008; Strecker *et al.*, 2012; Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b). Así mismo, existen variaciones en el nivel de troglomorfismo en los distintos grupos (Proudlove, 2010).

El propósito de la presente revisión es: 1) actualizar el inventario de peces de cuevas que se encuentran en México; 2) destacar algunos aspectos biológicos relevantes de este grupo y 3) reconocer la importancia de la sistemática filogenética en la taxonomía y comprensión de los procesos evolutivos que han ocurrido en estos animales.

La ictiofauna de cuevas

En el estudio biológico de los organismos que habitan cuevas, el mundo se divide en ambientes epigeos (los que se encuentran sobre la superficie) e hipogeos (los que se encuentran por debajo de la superficie). Los primeros están expuestos de manera regular a la luz directa o indirecta, mientras que los segundos se encuentran ocultos, e incluyen los ambientes intersticiales del suelo, el freático y el de cuevas (Romero, 2011). A pesar de que éstas últimas presentan

un espacio relativamente pequeño, albergan representantes de prácticamente todos los taxa superiores (Romero, 2009).

Los rasgos troglomórficos típicos de los organismos de cuevas se consideran adaptaciones fenotípicas, fisiológicas, anatómicas y conductuales asociadas con la adaptación a un ambiente extremo. Tal es el caso de la pérdida de ojos, la despigmentación, una mayor longevidad y un bajo metabolismo, entre otras (Galán y Herrera, 1998). Si bien los troglomorfismos más recurrentes son la ceguera y la despigmentación, no hay predominio de un patrón general (Romero, 2009; Proudlove, 2010). Esto podría explicarse debido a que los ambientes de cuevas generan una enorme variabilidad entre especies que resulta imposible definir un fenotipo universal, aunado al hecho de que las cuevas representan refugios para organismos de la superficie (Wilkens, 2001; Romero, 2011).

La mayoría de las especies de peces de cuevas son dulceacuícolas, de las 22 familias conocidas solo las Bythitidae, Dinematchthyidae, Gobiidae y Eleotridae tienen un origen marino. De las aproximadamente 150 especies que se tienen registradas en 34 países, el 50% (76 especies) se concentran en tres países: China (42 especies), Brasil (23 especies) y México (12 especies) (Proudlove, 2010; Walsh y Chakrabarty, 2016).

Peces de cuevas en México

Dentro del territorio mexicano se encuentran 12 taxa de peces hipogeos, representando a seis órdenes y siete familias (Tabla 1) (Proudlove, 2010; Walsh y Chakrabarty, 2016).

En México, estos grupos habitan en su mayoría en cuevas continentales de la vertiente del Golfo de México y del Caribe, con la excepción de una población de *Astyanax* sp. que se encuentra en el sistema kárstico de Zacatecolotla-Las Granadas, dentro de la cuenca del Río Balas en la vertiente Pacífico (Espinasa *et al.*, 2001), desde las Sierras Transversales de Coahuila en el Norte de México, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre de Oaxaca, la Sierra Madre de Chiapas hacia la depresión Central de Chiapas, y la Península de Yucatán (Fig. 1). En estas regiones se localizan amplias zonas de sistemas kársticos de montaña y plataforma, formados por rocas calizas (dominadas por CaCO_3), yesos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dolomías [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] o sal (NaCl), que se caracterizan por tener formas negativas de relieve (dolinas, poljes, resumideros) y un sistema hidrológico subterráneo a través de cuevas; estos últimos como producto de procesos de disolución de aguas pluviales/fluviales o de corrosión por mezcla (Ford y Williams, 2007; Espinasa-Pereña y Nieto-Torres, 2015; Estrada *et al.*, 2019).

Otra de las características a destacar de estos peces es su amplia variabilidad en la expresión de los rasgos troglomórficos a lo largo de la región donde se distribuyen. Algunos taxa tienen troglomorfismo avanzado, es decir que carecen completamente de ojos y pigmento, entre otros rasgos que indican una completa restricción y adaptación a los ambientes de cuevas, mientras que otros peces poseen troglomorfismo incipiente donde solo se presenta reducción (no ausencia) del ojo y pigmentación, indicando una adaptación reciente. También se encuentran aquellos taxa que presentan distintos niveles de troglomorfismo

Tabla 1
Listado de los peces de cuevas de México.

Orden	Familia	Género	Especie
Siluriformes	Ictaluridae	<i>Prietella</i>	<i>P. phreatophila</i> y <i>P. lundbergi</i>
	Heptateridae	<i>Rhamdia</i>	<i>R. reddelli</i> , <i>R. zongolicensis</i> , <i>R. macuspanensis</i> y <i>R. laluchensis</i>
Characiformes	Characidae	<i>Astyanax</i>	<i>A. mexicanus</i> , <i>A. hubsii</i> y <i>Astyanax</i> sp.
Synbranchiformes	Synbranchidae	<i>Ophisternon</i>	<i>O. infernale</i>
Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Poecilia</i>	<i>P. mexicana</i>
Ophidiiformes	Dinematchthyidae	<i>Typhlias</i>	<i>T. pearsei</i>
Gobiiformes	Eleotridae	<i>Caecieleotris</i>	<i>C. morrisi</i>

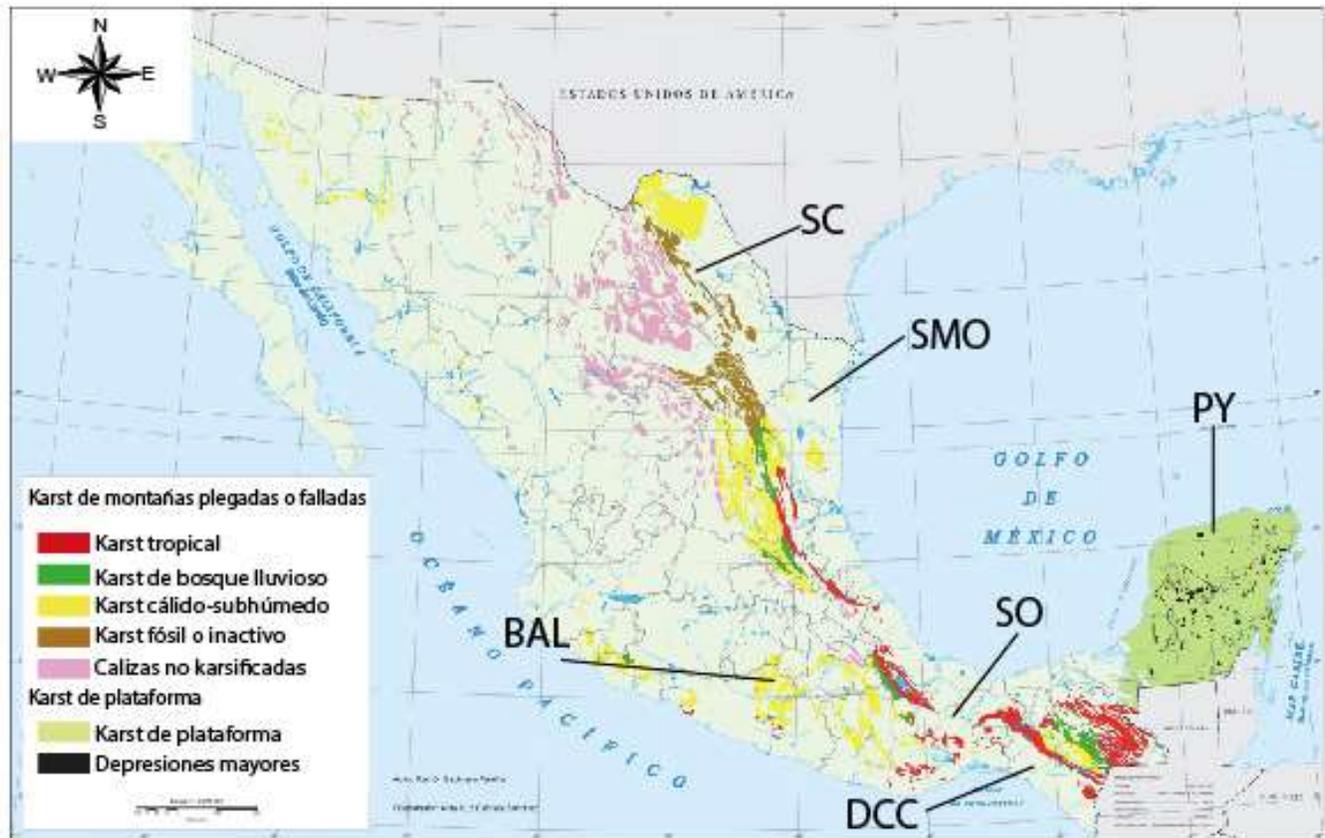


Figura 1. Área de estudio de los peces de cuevas en México. Tipos de karst dentro del área de estudio, modificado de Espinasa-Pereña (2007). Karst Península de Yucatán (PY), karst Sierra de Oaxaca (SO), karst Depresión Central de Chiapas (DCC), karst Sierra Madre Oriental (SMO), karst Sierras de Coahuila (SC) y karst de la cuenca del Balsas (BAL).

dentro de una misma localidad, incluso se pueden encontrar formas epigeas e hipogeas. Lo anterior convierte al territorio mexicano en un laboratorio natural para el estudio de los mecanismos y procesos evolutivos implicados en la colonización de cuevas. Con base en su nivel de troglomorfismo, que básicamente refleja su origen y nivel de asociación y aislamiento en los hábitats de cuevas, a continuación, se describen brevemente las distintas formas troglomórficas que habitan en el territorio mexicano.

Troglomorfismo avanzado

Para México se reconocen cinco grupos de peces con troglomorfismo avanzado, representando a los órdenes Siluriformes, Ophidiiformes, Synbranchiformes, Gobiiformes y Characiformes, aunque este último, debido a que también se presentan poblaciones con un troglomorfismo variable, se aborda en el siguiente apartado. Dentro de los siluriformes, se en-

cuentran los bagres ciegos *Prietella phreatophila* Carranza, 1954 y *Prietella lundbergi* Walsh y Gilbert, 1995, miembros de la familia Ictaluridae de origen neártico (Walsh y Gilbert, 1995; Arce *et al.*, 2017). La primera se distribuye en el Karst de las Sierras Transversales de Coahuila en el norte de México en colindancia con Texas (Fig. 2A), mientras que la segunda es endémica del Karst de la Sierra Madre Oriental, específicamente de la Sierra del Abra (Fig. 2B) (Walsh y Gilbert, 1995).

De acuerdo con las hipótesis filogenéticas donde se han incluido estos taxa (Wilcox *et al.*, 2004; Janzen *et al.*, 2023), cada una de las especies de *Prietella* tienen un origen independiente, sugiriendo incluso que mientras una especie deriva de un ancestro epigeo, otra deriva de un ancestro hipogeo (se discute más adelante). Se estima que el origen del género se re-

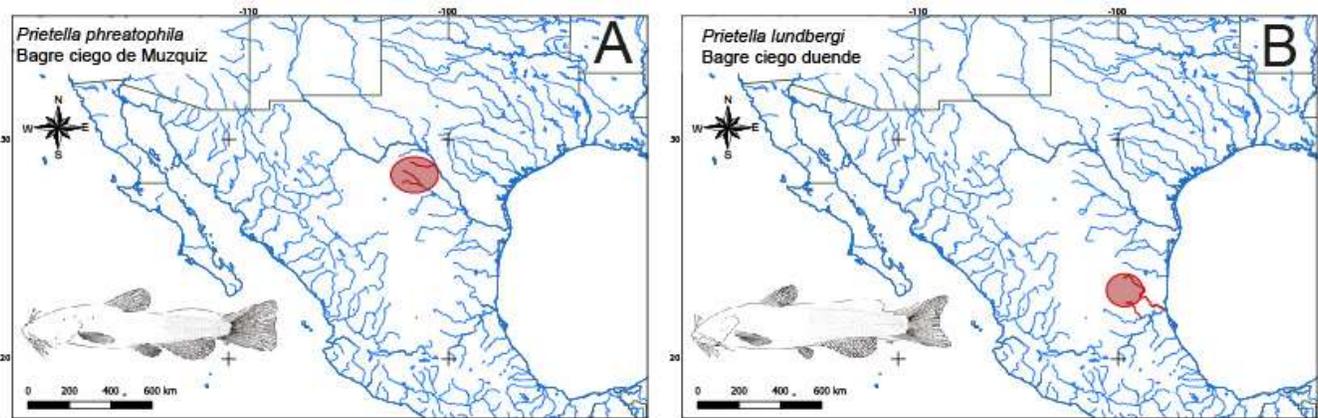


Figura 2. Área de distribución de *Prietella phreatophila* y *Prietella lundbergi* Tomado de Page (2007).

monta al Mioceno medio (Walsh y Gilbert, 1995; Jenzen *et al.*, 2023), indicando un origen considerablemente más antiguo en relación con otros peces de cuevas (Langecker y Longley, 1993).

Typhlias pearsei Hubbs, 1953 es un ophidiiforme de la familia Dinematchthyidae de origen marino (Fig. 3A), conocido como brótula ciega mexicana y corresponde a un género monotípico, que se restringe al

Karst de plataforma de la Península de Yucatán. Su grupo hermano corresponde a otro género, y aparentemente deriva de su ancestro de superficie. En este caso, se considera que el hábitat del ancestro eran los arrecifes de coral, a través de los que colonizó el medio subterráneo dulceacuícola de los cenotes en la península de Yucatán (Arroyave, 2020). La única aproximación temporal sobre su origen se asocia al Último

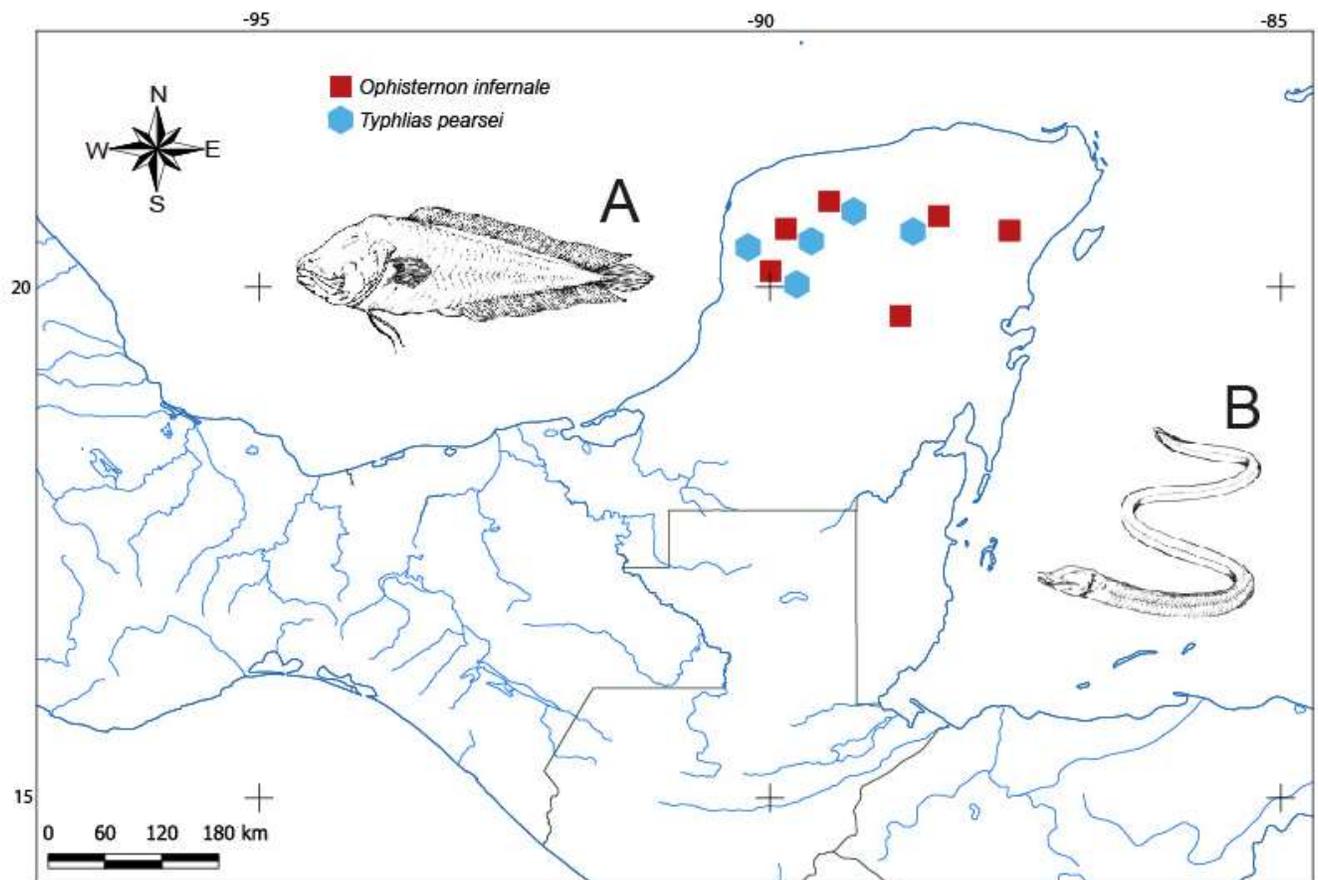


Figura 3. Área de distribución de *Typhlias pearsei* (A) y *Ophisternon infernale* (B). Tomado de Wilkens (1982); Chumba-Segura (1983); Chumba-Segura (1984); Mar-Silva *et al.* (2022).

Máximo Glacial (20,000 años aproximadamente; Arroyave, 2020); sin embargo, se considera este un origen muy reciente para el grado de troglomorfismo avanzado que presenta. Al igual que la brótula ciega mexicana (*T. pearsei*), la anguila ciega, *Ophisternon infernale* Hubbs, 1853, de la familia synbranchidae y orden synbranchiformes, es otro de los peces troglomórficos endémicos que habita permanentemente las aguas subterráneas oscuras y oligotróficas del acuífero kárstico de la península de Yucatán (Fig. 3B) (Arroyave *et al.*, 2020). A diferencia de *O. infernale* cuenta con una especie cercana (al menos nominalmente) de superficie: *Ophisternon aenigmaticum* Rosen y Greenwood, 1976 ampliamente distribuida en Centro América, incluyendo la Península de Yucatán, aunque no habita de manera sintópica con *O. infernale* (Navarro-Mendoza y Schmitter-Soto, 2016).

Esto sugiere que esta forma troglomórfica también derivó de un ancestro de vida hipogea. Al igual que la brótula ciega mexicana, se estima que su colonización a las cuevas de los cenotes ocurrió después del Último Máximo Glacial, con el incremento de humedad en el planeta por el descongelamiento, cuando las cuevas de los cenotes se comenzaron a llenar de agua (Mar-Silva *et al.*, 2022). No obstante, el grado de troglomorfismo en ambas especies no es consistente con este tiempo, por lo que el origen de ambos taxones es enigmático.

Por último, se encuentra la especie de cuevas descubierta y descrita recientemente, *Caecieleotris morrisi* Walsh y Chakrabarty, 2016 (Fig. 4) que pertenece a la familia Eleotridae y es el único caso de troglomorfismo del orden Gobiiformes en el continente americano. Al igual que *T. pearsei* es un género monotípico dulceacuícola de origen marino (Walsh y Chakrabarty, 2016). La única población hasta el momento registrada es una cueva sumergida en la Presa Miguel Alemán, en el poblado de Temascal, Oaxaca (Fig. 4).

El sistema kárstico corresponde al de las Sierras Orientales de Oaxaca. Actualmente no se conoce su afinidad con otros taxones hipogeos o epigeos de Eleotridae. Se ha inferido que comparte un linaje ancestral común con otras especies de eleotridos distribuidas en el Atlántico centro-occidental, particularmente en el Golfo de México y el Caribe, pero los caracteres morfológicos no brindan suficiente información sobre las posibles relaciones.

Troglomorfismo polimórfico

Los characiformes de cuevas, *Astyanax hubbsi* Alvarez, 1947 y *Astyanax mexicanus* De Filippi, 1853 (*sensu* Ornelas-García y Pedraza-Lara, 2016), se distribuyen en varias cuevas ubicadas en el Karst de la Sierra Madre Oriental (Fig. 5A); aunque cabe mencionar que se tiene registrada otra población en la vertiente Pacífico, sin embargo, debido a que ha sido poco estudiada, algunos autores simplemente la reconocen como *Astyanax* sp. (Espinasa *et al.*, 2001). Además de

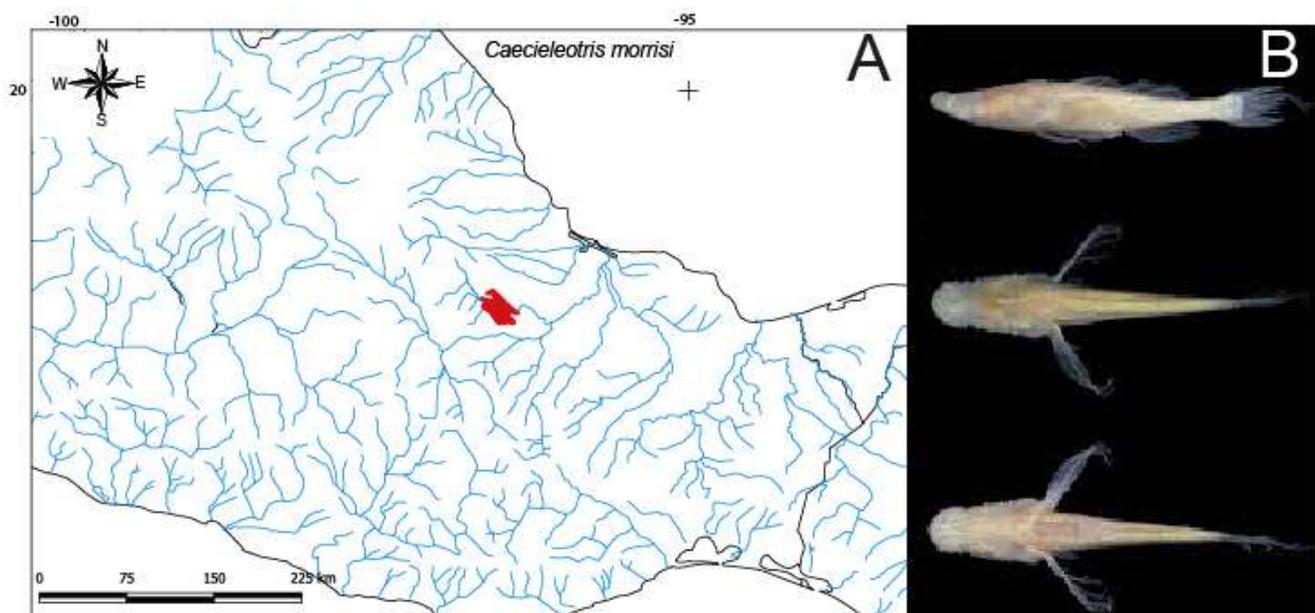


Figura 4. A) Distribución geográfica de *Caecieleotris morrisi*, B) *C. morrisi*. Tomado de Walsh y Chakrabarty (2016).

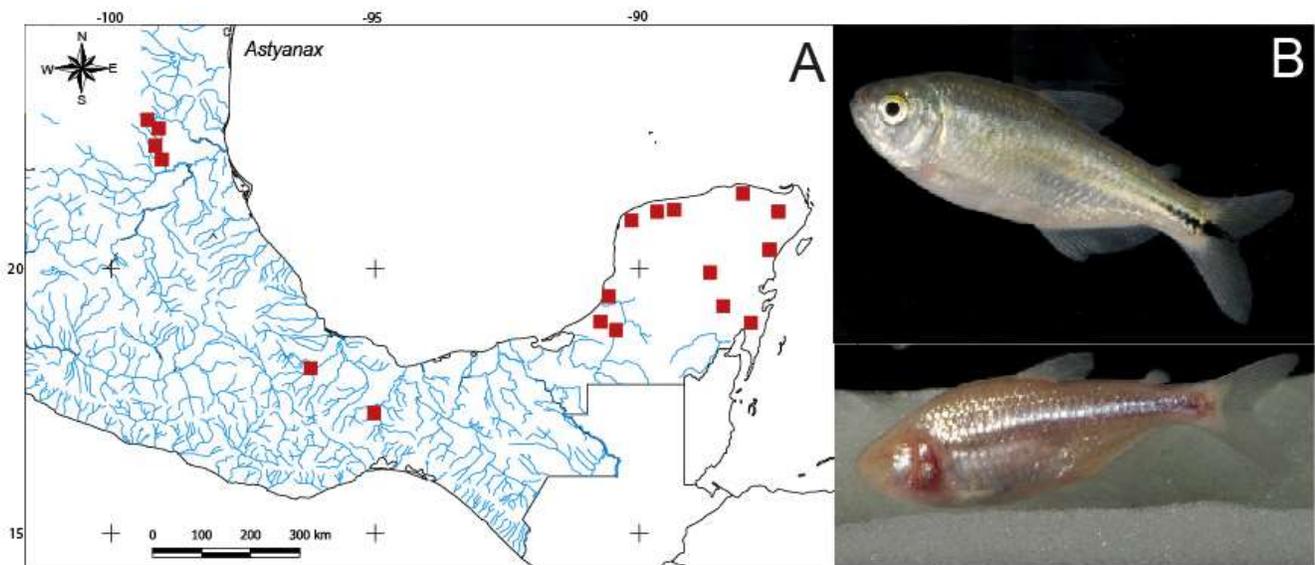


Figura 5. A) Área de distribución de *Astyanax*, B) Ejemplar de cueva y de superficie. Tomado de Hausdorf *et al.* (2011) y Gore *et al.* (2018).

presentar poblaciones con ambas formas, hipogea con troglomorfo avanzado y formas epigeas (Fig. 5B), también presentan formas con diferente grado de troglomorfo en distintas poblaciones, que van desde una reducción de ojos y pigmentación del cuerpo, hasta su absoluta ausencia (Bradic *et al.*, 2012).

Dicho patrón tan complejo en ambas especies se asocia a procesos de hibridación histórica y reciente, y a una plasticidad fenotípica que se ha manifestado

en múltiples ocasiones en una recurrente convergencia morfológica a los hábitats respectivos (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2021). Evidentemente, en ambas especies las distintas poblaciones de cuevas han resultado de una invasión de la superficie a través del tiempo, desde muy antiguos (millones años) hasta muy recientes (miles de años) (Gross, 2012; Fumey *et al.*, 2018).

Otros siluriformes de cuevas, pero de la familia Heptapteridae, bastante distante con relación a Ictaluridae, son los bagres neotropicales, representados

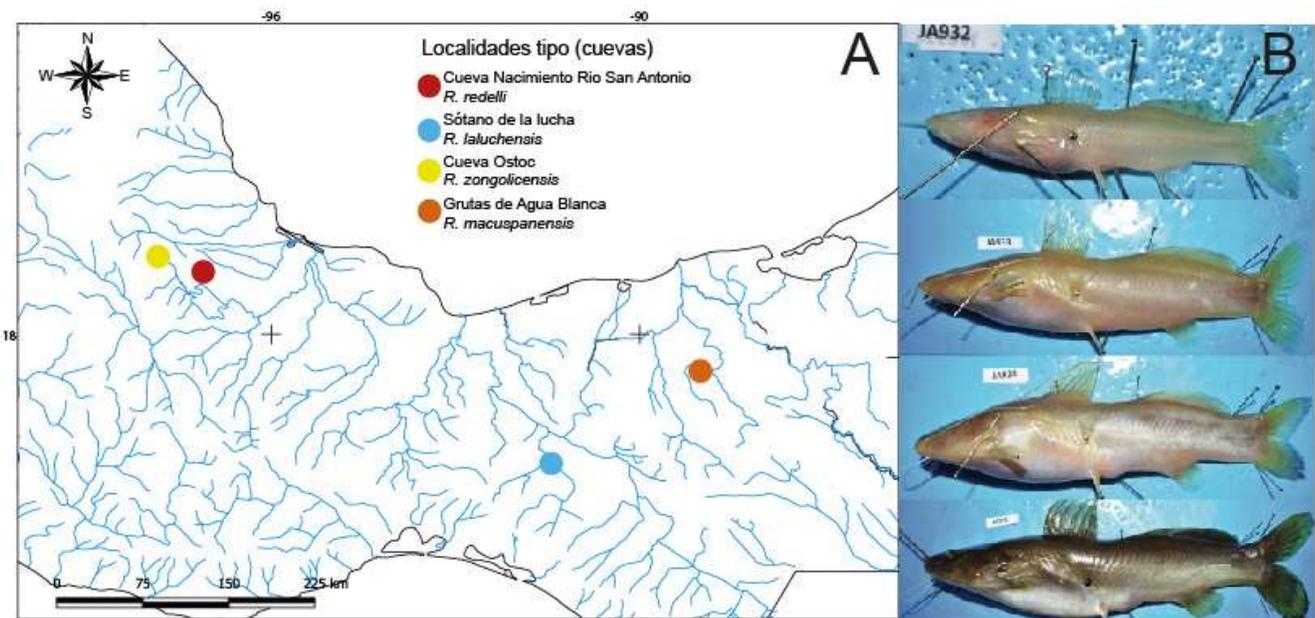


Figura 6. A) Área de distribución de las especies de cuevas de *Rhamdia*. B) Presencia de formas hipogea y epigea en simpatría en la especie *R. macuspanensis*; tomado de Arroyave (2021).

por las especies *Rhamdia reddelli* Miller, 1984, *R. zongolicensis* Wilkens, 1993, *R. macuspanensis* Weber y Wilkens, 1998, *R. laluchensis* Weber, Allegrucci y Sbordoni, 2003, que se distribuyen en los karst de las Sierras Orientales de Oaxaca y la Sierra de Madre de Chiapas-Depresión Central de Chiapas (Fig. 6A). Al igual que *Astyanax*, el troglomorfo se presenta desde su forma avanzada, como en *R. macuspanensis* (Fig. 6B; Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b), hasta la reducción del tamaño del ojo y pigmentación en diferentes niveles, presentándose el menor troglomorfo en *R. zongolicensis* (ojos más grandes) (Wilkens, 2001; Arroyave y Cruz-Fernández, 2021a).

En las cuatro especies se han observado especímenes con fenotipo epigeo (Fig. 6B), pero solo en *R. reddelli*, *R. zongolicensis*, y *R. laluchensis* ocurren cambios en el nivel de troglomorfo (Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b). Las distintas especies de *Rhamdia* se asocian a una reciente invasión de la superficie hacia las cuevas, durante el Último Máximo Glacial (Wilkens, 2001).

Troglomorfo incipiente

Un caso de troglomorfo incipiente se ha observado en *Poecilia mexicana* Steindachner, 1863, único cyprinodontiforme de cuevas de la familia Poeciliidae, (Proudlove, 2010), una especie epigea de amplia distribución en México y Centro América (Miller *et al.*,

2005), que además de las condiciones extremas de ausencia de luz, habitan en presencia de H₂S (sulfuro de hidrógeno) en cuevas del sistema kárstico entre la Sierra Madre de Chiapas y la Depresión Central de Chiapas (Fig. 7A). El troglomorfo que presentan consiste en una reducción de ojos, de pigmentación y tamaño del cuerpo (Fig. 7B), así como algunos rasgos de comportamiento como la inhibición de conductas agresivas y el nado en cardumen (Parzefall, 2001; Plath y Tobler, 2010; McGowan *et al.*, 2019).

En esta especie el tamaño del ojo está relacionado con la cantidad de luz donde habitan, y van desde las formas de superficie en la entrada de la cueva, que presentan un tamaño de ojos y pigmentación normal, a los distintos grados de alteración en estas características que siguen un gradiente hacia el interior de las cuevas (Plath *et al.*, 2007). Lo anterior sugiere que las formas troglomórficas de *P. mexicana* derivaron de una forma epigea en el pasado reciente (Parzefall, 2001).

Sistemática filogenética de los peces de cuevas de México: implicaciones en su taxonomía y evolución

Aunque no existe una filogenia completa de la clase Actinopterygii, la aproximación de Betancur *et al.* (2013), incluyó representantes de todos los linajes mayores y se basó en un gen mitocondrial y 20 genes

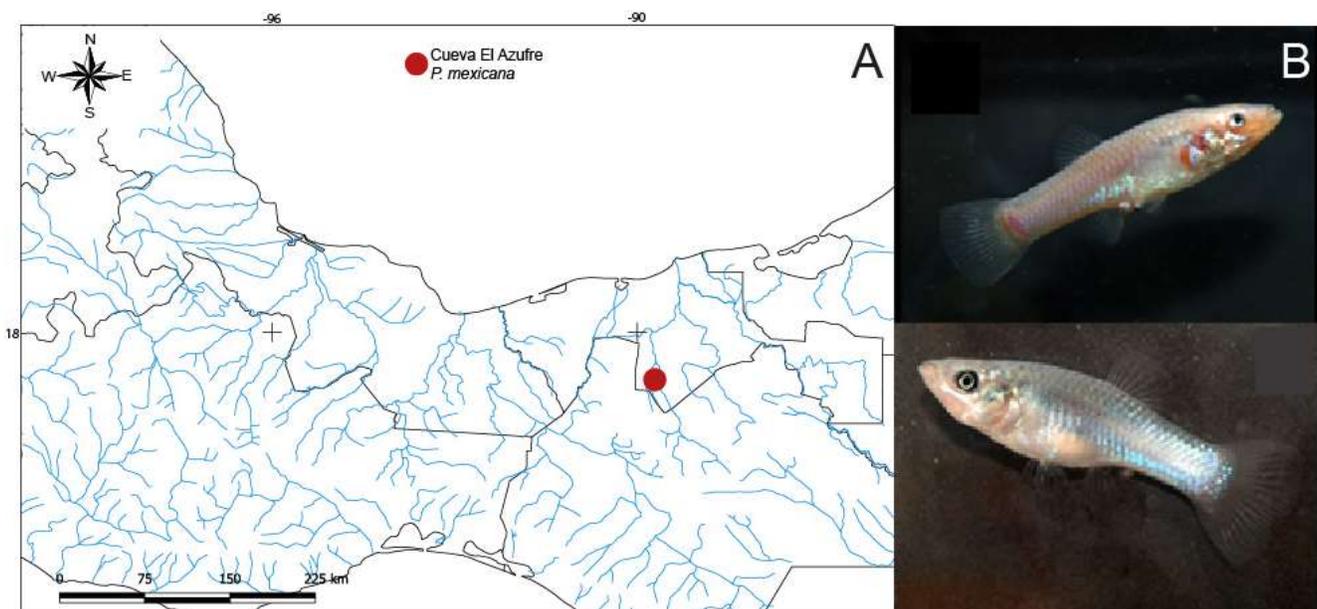


Figura 7. A) Distribución geográfica de *P. mexicana* de hábitat de cueva. B) Forma epigea (parte superior) y Forma hi-pogea (parte inferior); modificado de Bierbach *et al.* (2018).

nucleares. De acuerdo con esta hipótesis filogenética que actualmente es la base de la clasificación taxonómica propuesta en *The Fish Tree of Life* (<https://fish-treeoflife.org/>), se puede constatar que los órdenes representados por los distintos grupos de peces de cuevas en México son filogenéticamente lejanos entre sí, con una divergencia estimada de 250 a 150 millones de años (m.a.). Con base en lo anterior se podría considerar que los troglomorismos de los peces ocurren por adaptación a los hábitats de cuevas, representando convergencias evolutivas. Otro caso de convergencia por invasión a las cuevas se dio entre las dos familias de bagres americanas dentro del orden Siluriformes, Ictaluridae y Heptapteridae, que corresponde a dos grupos filogenéticamente lejanos entre sí, con una divergencia calculada de 70 m.a. (Rabosky *et al.*, 2018), además de presentar un origen biogeográfico distinto, Ictaluridae de la región neártica y Heptapteridae de la región neotropical. Los eventos de convergencia en los niveles filogenéticos posteriores se detallan en cada uno de los casos de peces de cuevas de México.

Siluriformes: Ictaluridae

Prietella phreatophila*, *P. lundbergi* y *Trogloglanis pattersoni

Las cuatro especies neárticas de bagres de cuevas *Trogloglanis pattersoni* Eigenmann, 1991, *Satan eurystomus* Hubbs y Bailey, 1947, *Prietella phreatophila* y *P. lundbergi* han tenido una historia taxonómica compleja. Las dos hipótesis filogenéticas con Máxima Parsimonia basadas en morfología que incluyen a los bagres de cuevas neárticos presentaron resultados totalmente diferentes. En la primera (Lundberg, 1992), las especies de cuevas no resultaron ser un grupo monofilético, mientras que en la otra (Arce *et al.*, 2016), si se recuperó la monofilia de estos bagres hipogeos, indicando que presentan un ancestro común, y que el troglomorismo avanzado es por descendencia, a partir del primer ancestro que se adaptó a las cuevas. No obstante, cabe destacar que, en esta última hipótesis, los caracteres morfológicos como ausencia de ojos y pigmento del cuerpo, reducción de la línea lateral del cuerpo, entre otros, a pesar de ser ampliamente reconocidas como adaptaciones a los ambientes de cuevas (Lundberg, 1982; 1992), se incluyeron como caracteres con el mismo peso e independencia que

el resto para la reconstrucción filogenética (Arce *et al.*, 2016). Lo anterior indica que la monofilia de estas especies hipogeas está determinada por el uso de caracteres adaptativos.

Por su parte, Wilcoxon *et al.* (2004) con base en marcadores mitocondriales, utilizando el método probabilístico de Máxima Verosimilitud, e incluyendo a la mayoría de los ictaluridos actuales, entre ellos a las dos especies de *Prietella*, encontraron que este género correspondía a un grupo polifilético. Por un lado, *P. phreatophila* presentó un parentesco más cercano con el género *Ameiurus*, mientras que *P. lundbergi* se relacionó más con el género *Ictalurus*. Esto implicaría que el origen de las especies de *Prietella* ocurrió en paralelo, y que la similitud morfológica, en apariencia y funcionalidad, es resultado de un proceso de evolución convergente que se estima ocurrió hace 15 m.a. Recientemente Jazen *et al.* (2023), utilizando nueve marcadores nucleares y dos mitocondriales, llega a la misma conclusión, que *Prietella* es un género polifilético. Además, incluyen a *T. pattersoni*, resultando la especie hermana de *P. phreatophila* y estas, a su vez, especies hermanas de *Ameiurus*. Esto sugiere no solo que los ictaluridos colonizaron los hábitats subterráneos al menos dos veces en su historia evolutiva, sino que *T. pattersoni* y *P. phreatophila* divergieron de un ancestro común que fue capaz de dispersarse por grandes sistemas de cavernas entre los acuíferos de Texas y Coahuila. Por su parte, la relación cercana de *P. lundbergi* y el género *Ictalurus*, un grupo de peces de superficie sugiere que *P. lundbergi* surge de la colonización de un ancestro de superficie a un ambiente de cuevas. Ninguno de los trabajos filogenéticos basados en marcadores moleculares incluye a *S. eurystomus*, por lo que aún falta por resolver sus relaciones filogenéticas e historia evolutiva.

Siluriformes: Heptapteridae

Rhamdia reddelli*, *R. zongolicensis*, *R. macuspanensis*, y *R. laluchensis

Para estos bagres neotropicales los marcadores moleculares utilizados limitan la resolución de la hipótesis filogenética que involucra a las cuatro especies hipogeas, además de las epigeas *Rhamdia parryi* Eigenmann y Eigenmann, 1888, *Rhamdia nica-raguensis* Günther, 1864 y distintas poblaciones de



Rhamdia laticauda Kner, 1858, especie epigea ampliamente distribuida en Centro América (Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b). Estos resultados, no permiten discernir entre dos escenarios con implicaciones taxonómicas contrastantes: 1) que las cuatro especies hipogeas en realidad representan poblaciones del taxon ampliamente distribuido *R. laticauda*, o 2) que estas cuatro formas hipogeas de *Rhamdia* son especies válidas de reciente diversificación. Este estudio indica que el origen de las formas troglomórficas de *Rhamdia* se asocia al menos a tres invasiones independientes por un ancestro epigeo, dando lugar a *R. laluchensis*, *R. macuspanensis* y *Rhamdia reddelli-R. zongolicensis*. A diferencia de *Prietella*, en este caso la profundidad filogenética donde aparecieron las convergencias sería menor, a nivel de especie, correspondiendo a un paralelismo (Futuyma y Kirkpatrick, 2017; Wake *et al.*, 2011).

La hipótesis filogenética basada en los marcadores mitocondriales que incluye a estas especies de cuevas (*sensu* Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b), reveló poca congruencia geográfica en los rangos de distribución de algunos de los clados formados dentro del complejo de especies *R. laticauda*, resultando en un patrón filogenético reticulado. Es razonable que dicho patrón se pueda asociar a procesos de hibridación histórica y reciente, como se ha registrado en el otro caso de troglomorfismo polimórfico de las especies de cuevas del género *Astyanax* (se discute a continuación). El troglomorfismo intermedio registrado en algunas de estas especies de *Rhamdia*, cuyas poblaciones presentan ambas formas (de manera sintópica), hipogeas del interior de la cueva y epigeas de la entrada de la cueva, también sugiere la ocurrencia de flujo génico (Arroyave y Cruz-Fernández, 2021b), por lo que no se descarta que dicho patrón reticulado se pueda asociar con eventos de contactos secundarios históricos entre distintos linajes. De acuerdo con lo anterior, es necesario utilizar otros marcadores, como microsátelites o polimorfismos de un solo nucleótido, incorporando también datos morfológicos en una aproximación de taxonomía integrativa para llevar a cabo una delimitación de especies, que incluya la valoración de flujo genético actual e histórico, y los tiempos de divergencia.

Characiformes: Characidae

***Astyanax mexicanus*, *Astyanax hubbsi* y *Astyanax* sp.**

Hasta el momento, debido a su cobertura taxonómica y geográfica, la hipótesis filogenética más completa es la de Ornelas-García *et al.* (2008), donde se reconocen dos especies de cuevas, *A. mexicanus* y *A. hubbsi*; incluyendo también diferentes especies y poblaciones de superficie. En esta investigación se concluye que han existido dos procesos de invasión de poblaciones epigeas, de Centro América hacia México en distintos tiempos evolutivos; en ambos casos ha existido la invasión a cuevas de poblaciones hipogeas, incluso, en el proceso de invasión más reciente, que se ha dado a partir de diferentes poblaciones ancestrales de superficie. Sin embargo, a pesar de que dicha hipótesis se considera relativamente resuelta, tiene una limitada representación del genoma, al estar basada en el gen mitocondrial citocromo b. Posteriormente, Coghill *et al.* (2014), utilizando polimorfismos de un solo nucleótido, obtuvo que la especie *A. hubbsi* (población de Sabinos) no corresponde al primer evento de invasión, en su lugar se ubica el linaje que incluye la población de *A. mexicanus* de la cueva el Molino. Nuevamente, este caso indica la ocurrencia de paralelismos evolutivos (Futuyma y Kirkpatrick, 2017; Wake *et al.*, 2011). A pesar de los distintos trabajos filogenéticos que se han publicado sobre las especies o linajes de cuevas de *Astyanax*, es necesario llevar a cabo una aproximación genómica con una cobertura taxonómica y geográfica adecuada, incluyendo la única población de cuevas de la vertiente del Pacífico, la cual aún está sin determinar (Espinasa *et al.*, 2001), para poder entender la evolución del grupo y sus implicaciones taxonómicas.

Sinbranchiformes: Synbranchidae

Ophisternum infernale

Uno de los principales hallazgos en *O. infernale* que se han generado recientemente en la sistemática filogenética es que las especies centroamericanas, *O. infernale* y *O. aenigmaticum*, resultaron filogenéticamente más cercanas con *Synbranchus* (también de centroamérica), que con *Ophisternon bengalense* McClelland, 1844 de la India y *Ophisternon candidum* Mees, 1962 de Australia (Perdices *et al.*, 2005; Mar-Silva *et al.*, 2022). La segunda implicación es de carácter evolutivo, y tiene que ver con la confirmación de

que el troglomorfismo de *O. infernale* y *O. candidum*, es una convergencia evolutiva, que junto con las especies del género *Monopterus* de India sugieren que la colonización de las cuevas se ha dado al menos tres veces de manera independiente dentro de la familia Synbranchidae (Proudlove, 2010).

Aunque se cuenta con un estudio filogeográfico de la especie ampliamente distribuida *O. aenigmaticum* (Perdices *et al.*, 2005), no se incluyó a ninguna población de *O. infernale*, por lo que se mantiene la incertidumbre de la relación que puedan tener estas dos especies, sobre todo porque *O. aenigmaticum* presenta cuatro linajes bien diferenciados, dentro de los que destaca el de la Península de Yucatán, donde se encuentra *O. infernale* (Perdices *et al.*, 2005).

Las hipótesis filogenéticas discutidas anteriormente (Perdices *et al.*, 2005; Mar-Silva *et al.*, 2022), plantean la necesidad de realizar estudios enfocados en los linajes de *O. aenigmaticum*, donde además se incluya a las distintas poblaciones de *O. infernale*. Por el nivel de linajes subespecíficos que presenta *O. aenigmaticum* y las distintas poblaciones de *O. infernale*, sería muy adecuado utilizar marcadores de tipo microsatélite y/o polimorfismos de un solo nucleótido, además de consideraciones fenotípicas en una aproximación de taxonomía integrativa.

Cyprinodontiformes: Poeciliidae

Poecilia mexicana

En una aproximación taxonómica integrativa, incorporando análisis morfométricos, genética de poblaciones y análisis filogenéticos, Palacios *et al.* (2013), determinó que las especies *Poecilia thermalis* Valenciennes, 1846, *Poecilia sulfuraria* Álvarez, 1948 y una población de *P. mexicana* que habita en cuevas (ecotipo de cuevas), todas ellas adaptadas a aguas sulfurosas, surgieron como linajes evolutivos independientes, confirmándose las primeras dos especies como taxa válidos (Palacios *et al.*, 2016). De acuerdo con lo anterior, un ancestro de superficie y agua dulce colonizó de manera independiente los hábitats sulfurosos, luego dicha adaptación llevó un proceso de especiación ecológica en respuesta a un ambiente contrastante, con bajo o nulo flujo genético, y de manera independiente en los tres linajes recuperados.

Al incorporar poblaciones de *P. mexicana* de superficie de otras cuencas más distantes, la población hipogea de la cueva del azufre resultó parafilética. Además, existe otra población de cueva de *P. mexicana* en la cueva Luna Azufre, que se encuentra en otra cuenca hidrológica independiente, y también corresponde a un hábitat sulfuroso. Esto indica que la invasión de las dos cuevas por parte de un ancestro de superficie parecido o relacionado con *P. mexicana* fue independiente, adquiriendo ambas poblaciones, mediante evolución paralela, los rasgos troglomórficos. Para poner a prueba una delimitación de especies para estas dos poblaciones de cuevas (cueva del Azufre y Luna Azufre), así como las formas de superficie emparentadas, se tendría que realizar una aproximación integrativa que incluya análisis morfométricos, genética de poblaciones y análisis filogenéticos, como la realizada en la delimitación de *P. thermalis* y *P. sulfuraria* (Palacios *et al.*, 2013), además de incluir un tamaño de muestra mayor y una más amplia representación geográfica.

Gobiiformes: Eleotridae

Caecieleotris morrissi

Corresponde a la cuarta especie dentro de la familia Eleotridae y la decimotercera especie dentro del orden Gobiiformes donde, de manera convergente, han evolucionado a una forma hipogea, con un troglomorfismo avanzado, que sugiere una historia antigua en un ambiente de cueva (Walsh y Chakrabarty, 2016). Hasta el momento no se cuenta con algún otro estudio comparativo donde se haya incluido a esta especie, por lo que no se tiene información sobre cuál es el taxon filogenéticamente más relacionado con *C. morrissi*. Los rasgos morfológicos que se conocen, dada su especialización morfológica, no proporcionan suficiente información sobre sus posibles relaciones con cualquiera de los géneros de la familia Eleotridae que habitan en el Caribe y Golfo de México, como son los géneros *Dormitator*, *Eleotris*, *Gobiomorus*, *Erotelis* y *Guavina* (Walsh y Chakrabarty, 2016). Para entender sus relaciones evolutivas y tiempos de divergencia, es necesario llevar a cabo una reconstrucción filogenética con base en marcadores moleculares y que incluya las distintas especies de los géneros mencionados que se distribuyen en las vertientes del Pacífico y Atlántico de México.



Ophidiiformes: Dinematchthyidae

Typhlias pearsei

Esta especie ha tenido cierta inestabilidad en su nomenclatura, puesto que después de describirse dentro del género monotípico *Typhlias pearsei* Hubbs, 1938, se cambió al género a *Typhliasina* Whitley, 1951, que luego fue considerada una sinonimia de *Ogilbia* (Nielsen, 1978). Sin embargo, recientemente se identificó un error nomenclatural al pasar del género *Typhlias* a *Typhliasina*, por lo que se retomó el nombre de *Typhlias* (Scharf, 2017). A partir de aproximaciones filogenéticas, estimación de tiempos de divergencia y mapeo de caracteres morfológicos en el orden Ophidiiformes, Møller et al. (2016) diagnosticaron a la familia Dinematchthyidae. Dicho taxón incluyó a *Typhlias pearsei* (considerada *Typhliasina* en Møller et al. 2016) como género monotípico cuyos taxa más cercanos son los géneros marinos *Ogilbichthys* y *Ogilbia*. Dicho estudio utilizó una reducida cobertura taxonómica. Aunque en este estudio no se incluyó a *Ogilbia galapagosensis* Poll y LeLeup, 1965 y a las otras especies de cuevas del género *Luciana* de la familia Bythidae, se deriva de este estudio que la condición troglomórfica entre las familias y al interior de Dinematchthyidae, evolucionó mediante convergencia evolutiva. De acuerdo con lo anterior, sería importante realizar una reconstrucción filogenética de la familia Dinematchthyidae con una mayor cobertura taxonómica, que, entre otros aspectos, infiera el parentesco más cercano de *T. pearsei* y su tiempo de divergencia, así como de las otras especies de peces de cuevas que se encuentran dentro de la familia.

Conclusiones

Derivado de esta síntesis de información, resulta claro que México es el país que cuenta con el mayor número de órdenes de la clase Actinopterygii que presentan peces de cuevas. Todas las especies de peces hipogeos de México habitan en cavernas de zonas kársticas de montaña y plataforma, que abarcan principalmente una considerable parte de la vertiente del Golfo de México y Caribe, además de un sistema kárstico en la vertiente del Pacífico.

Dada la amplia variabilidad de los rasgos troglomórficos presente en los distintos grupos de peces hipogeos en México, se proponen las siguientes catego-

rias de troglomorfismo: 1) avanzado, en aquellos animales que carecen completamente de ojos y pigmento, 2) incipiente, donde solo se presenta una reducción del ojo y la pigmentación, y 3) polimórfico, para aquellos que en una misma localidad se pueden encontrar distintos niveles de adaptaciones fenotípicas a la vida en cuevas. Los cambios en el fenotipo están asociados con variables ambientales, como el tiempo de aislamiento en las cuevas, así como patrones de oscuridad y contenido de azufre en el agua. Siguiendo el patrón general de distribución de los peces de cuevas en el mundo, en México la mayoría de las especies son de origen dulceacuícola, excepto dos taxones de procedencia marina.

Las hipótesis filogenéticas en las que se han incluido a estos grupos de peces presentaron implicaciones taxonómicas relevantes, que van desde la propuesta de sinonimias de varias especies, como en el caso de *Rhamdia*, hasta el reconocimiento de géneros monotípicos como *Thyphlias* y *Prietella*, y la asignación de *P. lundbergi* a un nuevo género. Así mismo, estas hipótesis han revelado la ocurrencia de evolución independiente del troglomorfismo por adaptación a los hábitats de cuevas, a distinta profundidad filogenética, desde convergencias evolutivas en las categorías de género, familia y orden, hasta los paralelismos a nivel de población y especie. Por lo anterior, los sistemas kársticos de México se consideran de gran relevancia biótica, debido a que representa un laboratorio natural único en el planeta para el estudio de los procesos y mecanismos evolutivos responsables de las convergencias y paralelismos evolutivos en peces.

Literatura consultada

- Alda, F., Reina R.G., Doadrio, I., Bermingham, E., 2013, Phylogeny and biogeography of the *Poecilia sphenops* species complex (Actinopterygii, Poeciliidae) in Central America. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 66, 1011-1026. ISSN 1055-7903, <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2012.12.012>
- Arce-H, M., Lundberg, J.G., O'Leary, M.A., 2017, Phylogeny of the North American catfish family Ictaluridae (Teleostei: Siluriformes) combining morphology, genes and fossils. *Cladistics*, 33, 406-428. ISSN 1096-0031, <https://doi.org/10.1111/cla.12175>

- Arendt, J., Reznick, D., 2008, Convergence and parallelism reconsidered: what have we learned about the genetics of adaptation?. *Trends in Ecology & Evolution*, 23, 26-32. ISSN 1872-8383, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.011>
- Arendt, J., Reznick, D., 2008, Moving beyond phylogenetic assumptions about evolutionary convergence: response to Leander. *Trends in Ecology & Evolution*, 23, 483-484. ISSN 1872-8383, doi: [10.1016/j.tree.2008.06.002](https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.06.002)
- Arnedo, M. A., 1999, Cladismo: La reconstrucción filogenética basada en parsimonia. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 26, 57-84. ISSN 1134-6094.
- Arroyave, J., De la Cruz-Fernández, D.A., 2021a, Cave-dwelling populations of *Rhamdia* (Siluriformes: Heptapteridae) from the Sierra de Zongolica, Veracruz, México: an evidence-based checklist with comments on their evolutionary history and taxonomy. *Journal of Fish Biology*, 99, 283-287. ISSN 1095-8649, doi: [10.1111/jfb.14713](https://doi.org/10.1111/jfb.14713)
- Arroyave, J., De la Cruz-Fernández, D.A., 2021b, Genetic and morphological evidence cast doubt on the validity of Mexican troglobitic species of the Neotropical catfish genus *Rhamdia* (Siluriformes: Heptapteridae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92. ISSN 2007-8706, <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3718>
- Arroyave, J., Lyons, T. J., Máiz-Tomé, L., Tognelli, M., Daniels, A., Meredith, C., y Harrison, I., 2020, The subterranean fishes of the Yucatan Peninsula. *The status and distribution of freshwater fishes in Mexico. IUCN and ABQ BioPark, Cambridge, UK and Albuquerque, New Mexico, USA*, 42-44.
- Arroyave, J., Martínez, C. M., Martínez-Oriol, F. H., Sosa, E., y Alter, S. E., 2020, Regional-scale aquifer hydrogeology as a driver of phylogeographic structure in the Neotropical catfish *Rhamdia guatemalensis* (Siluriformes: Heptapteridae) from cenotes of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Freshwater Biology*, 66, 332-348. ISSN 1365-2427, <https://doi.org/10.1111/fwb.13641>
- Arroyave, J., Mar-Silva, A. F., Díaz-Jaimes, P., 2022, The complete mitochondrial genome of the Mexican blind brotula *Typhlias pearsei* (Ophidiiformes: Dinematichthyidae): an endemic and troglomorphic cavefish from the Yucatán Peninsula karst aquifer. *Mitochondrial DNA Part B*, 7, 1151-1153. ISSN 2380-2359, DOI: [10.1080/23802359.2022.2087558](https://doi.org/10.1080/23802359.2022.2087558)
- Bergsten, J., 2005, A review of long-branch attraction. *Cladistics*, 21(2), 163-193. ISSN 1096-0031, <https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.2005.00059.x>
- Bernardi, G., 2013, Speciation in fishes. *Molecular Ecology*, 22(22), 5487-5502. ISSN 1365-294X, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091818>
- Betancur-R, R., Broughton, R.E., Wiley, E.O., Carpenter, K., López, J.A., Li, C., Ortí, G., 2013, The tree of life and a new classification of bony fishes. *PLoS Currents*, 5. ISSN 2157-3999, DOI: [10.1371/currents.tol.53ba26640df0ccee75bb165c8c26288](https://doi.org/10.1371/currents.tol.53ba26640df0ccee75bb165c8c26288)
- Bichuette, M.E., Trajano, E., 2010, Conservation of subterranean fishes, in E. Trajano, M.E. Bichuette and B.G. Kapoor, ed., *Biology of subterranean fishes*, Science Publishers, Enfield, 65-80. ISBN-978-1-57808-670-2.
- Bierbach, D., Lukas, J., Bergmann, A., Elsner, K., Höhne, L., Weber, C. Krause, J., 2018, Insights into the social behavior of surface and cave-dwelling fish (*Poecilia mexicana*) in light and darkness through the use of a biomimetic robot. *Frontiers in Robotics and AI*, 5. ISSN 22969144, <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00003>
- Bradic, M., Beerli, P., García-de León, F. J., Esquivel-Bobadilla, S., Borowsky, R. L., 2012, Gene flow and population structure in the Mexican blind cavefish complex (*Astyanax mexicanus*). *BMC Evolutionary Biology*, 12, 1-17. ISSN 1471-2148, <https://doi.org/10.1186/1471-2148-12-9>
- Brooks, D. R., Mayden, R. L., McLennan, D. A., 1992, Phylogeny and biodiversity: conserving our evolutionary legacy, *Trends in Ecology & Evolution*, 7, 55-59. ISSN 0169-5347, [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(92\)90107-M](https://doi.org/10.1016/0169-5347(92)90107-M)
- Carranza, J., 1954, Descripción del primer bagre anoftalmo y despigmentado encontrado en aguas mexicanas (Pisc., Ameiur.), *Ciencia*, 14, 120-136.
- Chumba-Segura, L., 1983, Brotulidae. *Typhliasina pearsei*, in J. Zamacona, ed., *Fauna de Los Cenotes de Yucatán 4*, Departamento de Acuicultura y Biología Marina, Universidad de Yucatán, Mérida, 1-8.
- Chumba-Segura, L., 1984, Synbranchidae. *Ophisternon infernale*, in J. Zamacona, ed., *Fauna de Los Cenotes de Yucatán 6*, Departamento de Acuicultura y Biología Marina, Universidad de Yucatán, Mérida, 1-10.
- Coghill, L.M., Hulse, C.D., Chaves-Campos, J., de León, F.J.G., Johnson, S.G., 2014, Next generation phylogeography of cave and surface *Astyanax mexicanus*, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 79, 368-374. ISSN

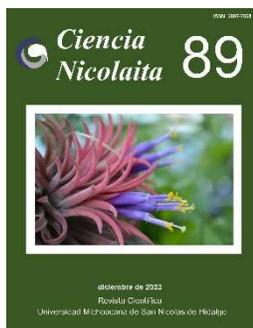


- 1055-7903,
<https://doi.org/10.1016/j.ympcv.2014.06.029>
- CONABIO, 2008, Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad: *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México*, p. 34. ISBN 978- 607-7607-03-8
- Culver, D., Pipan, T., 2015, Shifting paradigms of the evolution of cave life. *Acta Carsologica*, 44. ISSN 1580-2612, <https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1688>
- Dowling, T.E., Martasian, D.P., Jeffery, W.R., 2002, Evidence for multiple genetic forms with similar eyeless phenotypes in the blind cavefish, *Astyanax mexicanus*. *Molecular Biology and Evolution*, 19, 446-455. ISSN 1537-1719, DOI: [10.1093/oxfordjournals.molbev.a004100](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a004100)
- Espinasa, L., Rivas-Manzano, P., Pérez, H.E., 2001, A new blind cave fish population of genus *Astyanax*: geography, morphology and behavior. *Environmental Biology of Fishes*, 62, 339-344. ISSN 15735133, <https://doi.org/10.1023/A:1011852603162>
- Espinasa-Pereña, R., 2007, "El Karst de México", Mapa NA III 3, in Coll-Hurtado, A., Coord., "Nuevo Atlas Nacional de México", *Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Espinasa-Pereña, R., Nieto-Torres, A., 2015, "Análisis de la vulnerabilidad a fenómenos kársticos", Secretaría de Gobernación, Coordinación Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. [https://www.fies.cenapred.unam.mx/es/BibliotecaVirtual/BibliotecaVirtualSINAPROC/In-formes%20Blancos/RV Informe Vulnerabilidad Karst 2014.pdf](https://www.fies.cenapred.unam.mx/es/BibliotecaVirtual/BibliotecaVirtualSINAPROC/In-formes%20Blancos/RV%20Informe%20Vulnerabilidad%20Karst%202014.pdf), [consultado el 18 de agosto de 2022].
- Estrada Medina, H., Jiménez Osornio, J.J., Álvarez Rivera, O., Barrientos Medina, R.C., 2019, El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, 29, 1-18. ISSN 2007-9621, <https://doi.org/10.15174/au.2019.2292>
- Ford, D., Williams, P. D., 2007, *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. ISBN 9781118684986, DOI:10.1002/9781118684986.
- Fumey, J., Hinaux, H., Noirot, C., Thermes, C., Rétaux, S., Casane, D., 2018, Evidence for late Pleistocene origin of *Astyanax mexicanus* cavefish. *BMC Evolutionary Biology*, 18, 1- 19. ISSN 2730-7182, <https://doi.org/10.1186/s12862-018-1156-7>
- Futuyma, D. J., Kirkpatrick, M., 2017, *Evolution*, 4th, Sunderland, MA, Sinauer Associates, ISBN 978-0-87893-223-8.
- Gabora, L., 2013, Convergent Evolution, En: Brenner's Encyclopedia of Genetics, 2nd Edition. doi:10.1016/B978-0-12-374984-0.00336-3
- Galán, C., Herrera, F.F., 1998, Fauna cavernícola: ambiente, especiación y evolución. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, 32, 13-43. ISSN 0583-7731.
- García, C. L., 2017, Paralelismo, convergencia y homología profunda en la biología: una propuesta conceptual. *Metatheoria*, 8(1), 57-69. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2497>
- Garita-Alvarado, C.A., Barluenga, M., Ornelas-García, C.P., 2018, Parallel evolution of morphs of *Astyanax* species (Teleostei: Characidae) in México and Central America, *Biological Journal of the Linnean Society*, 124, 706-717. ISSN 1095-8312, <https://doi.org/10.1093/biolinnean/bly082>
- Gore, A. V., Tomins, K. A., Iben, J., Ma, L., Castranova, D., Davis, A. E., Parkhurst A., Jeffery W.R. Weinstein, B. M., 2018, An epigenetic mechanism for cavefish eye degeneration, *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1155-1160. ISSN 2397-334X, <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0569-4>
- Gross, J.B., 2012, The complex origin of *Astyanax* cavefish, *BMC Evolutionary Biology*, 12, 1-12. ISSN 2730-7182, <https://doi.org/10.1186/1471-2148-12-105>
- Halffter, G., 2017, La zona de transición mexicana y la megadiversidad de México: del marco histórico a la riqueza actual. *Dugesiana*, 24, 77-89. ISSN 1028-3420. <https://doi.org/10.32870/dugesiana.v24i2.6572>
- Hashemzadeh Segherloo, I., Normandeau, E., Benestan, L., Rougeux, C., Coté, G., Moore, J. S., Bernatchez, L., 2018, Genetic and morphological support for possible sympatric origin of fish from subterranean habitats, *Scientific Reports*, 8, 1-13. ISSN 2045-2322, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20666-w>
- Hausdorf, B., Wilkens, H., Strecker, U., 2011, Population genetic patterns revealed by microsatellite data challenge the mitochondrial DNA based taxonomy of *Astyanax* in Mexico (Characidae, Teleostei), *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 60, 89-97. ISSN 1055-7903, DOI: [10.1016/j.ympcv.2011.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ympcv.2011.03.009)

- Hendrickson, D. A., Krejca, J. K., & Martinez, J. M. R., 2001, Mexican blindcats genus *Prietella* (Siluriformes: Ictaluridae): an overview of recent explorations, *Environmental Biology of Fishes*, 62, 315-337. ISSN 1573-5133, <https://doi.org/10.1023/A:1011808805094>
- Herman, A., Brandvain, Y., Weagley, J., Jeffery, W. R., Keene, A. C., Kono, T. J., y McGaugh, S. E., 2018, The role of gene flow in rapid and repeated evolution of cave-related traits in Mexican tetra, *Astyanax mexicanus*, *Molecular Ecology*, 27, 4397-4416. ISSN 1365294X, DOI: [10.1111/mec.14877](https://doi.org/10.1111/mec.14877)
- Hernández, C. L., Ortega-Lara, A., Sánchez-Garcés, G. C., y Alford, M. H., 2015, Genetic and morphometric evidence for the recognition of several recently synonymized species of trans- Andean Rhamdia (Pisces: Siluriformes: Heptapteridae), *Copeia*, 103, 563-579. ISSN 1938-5110, <https://doi.org/10.1643/Ci-14-145>
- Jeffery, W. R., Strickler, A. G., y Yamamoto, Y., 2003, To see or not to see: evolution of eye degeneration in Mexican blind cavefish, *Integrative and Comparative Biology*, 43, 531-541. ISSN 1557-7023, <https://doi.org/10.1093/icb/43.4.531>
- Jeffery, W. R., 2005, Adaptive evolution of eye degeneration in the Mexican blind cavefish, *Journal of Heredity*, 96, 185-196. ISSN 1465-7333, DOI: [10.1093/jhered/esi028](https://doi.org/10.1093/jhered/esi028)
- Langecker, T. G., y Longley, G., 1993, Morphological adaptations of the Texas blind catfishes *Trogloglanis pattersoni* and *Satan eurystomus* (Siluriformes: Ictaluridae) to their underground environment. *Copeia*, 976-986. ISSN 1938-5110, <https://doi.org/10.2307/1447075>
- Leander, B. S., 2008, Different modes of convergent evolution reflect phylogenetic distances: a reply to Arendt and Reznick. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(9), 481-482. ISSN 0169-5347, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.04.012>
- Lundberg, J.G., 1982, The comparative anatomy of the toothless blindcat, *Trogloglanis pattersoni* Eigenmann, with a phylogenetic analysis of the ictalurid catfishes: *Miscellaneous publications, Museum of Zoology, University of Michigan*, 163. ISSN 0076-8405.
- Lundberg, J.G., 1992, The phylogeny of ictalurid catfishes: a synthesis of recent work, in R.L. Mayden, ed., *Systematics, Historical Ecology, and North American Freshwater Fishes*, Stanford University Press, Stanford, 392-420. ISBN-13:9780804721622.
- Lyons, T., Máiz-Tomé, L., Tognelli, M. F., Daniels, A., Meredith, C., Bullock, R., Harrison, I. J., ..., Mejía-Guerrero, 2020, The status and distribution of freshwater fishes in Mexico, Cambridge UK and Albuquerque, New Mexico, USA: UICN and ABQ BioPark.
- Mar-Silva, A. F., Arroyave, J., Díaz-Jaimes, P., 2022, The complete mitochondrial genome of the Mexican-endemic cavefish *Ophisternon infernale* (Synbranchiformes, Synbranchidae): insights on patterns of selection and implications for synbranchiform phylogenetics. *ZooKeys*, 1089, 1-23. ISSN 1313-2970, doi: [10.3897/zookeys.1089.78182](https://doi.org/10.3897/zookeys.1089.78182)
- McGowan, K.L., Passow, C.N., Arias-Rodriguez, L., Tobler, M., and Kelley, J.L., 2019, Expression analyses of cave mollies (*Poecilia mexicana*) reveal key genes involved in the early evolution of eye regression. *Biology Letters*, 15. ISSN 1744-957X, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0554>
- Miller, R.R., Minckley, W.L., Soto, S., Jacobo, J. (2009). *Peces dulceacuícolas de México*, CONABIO, México, D.F. ISBN 978-607-7607-20-5
- Møller, P. R., Knudsen, S. W., Schwarzshans, W., Nielsen, J. G., 2016, A new classification of viviparous brotulas (Bythitidae) - with family status for Dinematichthyidae - based on molecular, morphological and fossil data, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 100, 391-4. ISSN 1055-7903, <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2016.04.008>
- Morrone, J. 2000, *Sistemática, biogeografía y evolución: Los patrones de la biodiversidad en tiempo-espacio*, México: UNAM. ISBN 978-968-36-8600-8.
- Navarro-Mendoza, M., Schmitter-Soto, J., 2016, *Ogilbia pearsei* [*Typhliasina pearsei*] (Hubbs, 1938): Dama blanca ciega, Mexican Blind Brotula. En: Ceballos, G., Pardo, E. D., Estévez, L. M., y Pérez, H. E., *Los peces dulceacuícolas de México en peligro de extinción*. Fondo de Cultura Económica, ISBN 6071657199-9786071657190.
- Niven, J. E., 2008, Evolution: convergent eye losses in fishy circumstances. *Current Biology*, 18(1), R27-R29. ISSN 0960-9822, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.020>
- Ornelas-García, C.P., Domínguez-Domínguez, O., and Doadrio, I., 2008, Evolutionary history of the fish genus *Astyanax* Baird & Girard (1854) (Actinopterygii, Characidae) in Mesoamerica reveals multiple morphological homoplasies. *BMC Evolutionary Biology*, 8, 1-17. ISSN 2730-2148, doi: [10.1186/1471-2148-8-340](https://doi.org/10.1186/1471-2148-8-340)
- Ornelas-García, C.P., Bastir, M., Doadrio, I., 2014, Morphometric variation between two morphotypes within the

- Astyanax* Baird and Girard, 1854 (Actinopterygii: Characidae) genus, from a Mexican tropical lake. *Journal of Morphology*, 275, 721-731. ISSN 1097-4687, DOI: [10.1002/jmor.20252](https://doi.org/10.1002/jmor.20252)
- Ornelas-García, C. P., Pedraza-Lara, C., 2016, Phylogeny and evolutionary history of *Astyanax mexicanus*, in A., Keene, M., Yoshizawa, and S., McGaugh, ed., Biology and evolution of the Mexican cavefish, Academic Press, San Diego, 77-90. ISBN 978-0-12-802148-4.
- Page, L., 2007, *Prietella phreatophila* Carranza 1954. Mexican Blindact. Version 23 May 2007 (under construction). http://tolweb.org/Prietella_phreatophila/69913/2007.05.23 in The Tree of Life Web Project, <http://tolweb.org/>
- Page, L., 2007, *Prietella lundbergi* Walsh & Gilbert 1995. Phantom Blindcat. Version 23 May 2007 (under construction). http://tolweb.org/Prietella_lundbergi/69912/2007.05.23 in The Tree of Life Web Project, <http://tolweb.org/>
- Palacios, M., Arias-Rodríguez, L., Plath, M., Eifert, C., Lerp, H., Lamboj, A., Tobler, M., 2013, The rediscovery of a long-described species reveals additional complexity in speciation patterns of poeciliid fishes in sulfide springs. *PLoS One*, 8. ISSN 1545-7885, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071069>
- Palacios, M., Voelker, G., Rodríguez, L. A., Mateos, M., Tobler, M., 2016, Phylogenetic analyses of the subgenus *Mollienesia* (Poecilia, Poeciliidae, Teleostei) reveal taxonomic inconsistencies, cryptic biodiversity, and spatio-temporal aspects of diversification in Middle America. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 103, 230-244. ISSN 1055-7903, <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2016.07.025>
- Parzefall, J., 2001, A review of morphological and behavioural changes in the cave molly, *Poecilia mexicana*, from Tabasco, Mexico. *Environmental Biology of Fishes* 62, 263–275. ISSN 1573-5133, <https://doi.org/10.1023/A:1011899817764>
- Perdices, A., Bermingham, E., Montilla, A., and Doadrio, I., 2002, Evolutionary history of the genus *Rhamdia* (Teleostei: Pimelodidae) in central America. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 25, 172-189. ISSN 1055-7903, DOI: [10.1016/s1055-7903\(02\)00224-5](https://doi.org/10.1016/s1055-7903(02)00224-5)
- Perdices, A., Doadrio, I., and Bermingham, E., 2005, Evolutionary history of the synbranchid eels (Teleostei: Synbranchidae) in Central America and the Caribbean islands inferred from their molecular phylogeny. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 37, 460-473. ISSN 1055-7903, DOI: [10.1016/j.ympev.2005.01.020](https://doi.org/10.1016/j.ympev.2005.01.020)
- Pérez-Rodríguez, R., Esquivel-Bobadilla, S., Orozco-Ruiz, A. M., Olivas-Hernández, J. L., García-De León, F. J., 2021, Genetic structure and historical and contemporary gene flow of *Astyanax mexicanus* in the Gulf of Mexico slope: a microsatellite-based analysis, *PeerJ*, 9. ISSN 2167-8359, DOI: [10.7717/peerj.10784](https://doi.org/10.7717/peerj.10784)
- Plath, M., Hauswaldt, J. S., Moll, K., Tobler, M., García de León, F. J., Schlupp, I., Tiedemann, R., 2007, Local adaptation and pronounced genetic differentiation in an extremophile fish, *Poecilia mexicana*, inhabiting a Mexican cave with toxic hydrogen sulphide, *Molecular Ecology*, 16, 967-976. ISSN 1365-294X, DOI: [10.1111/j.1365-294X.2006.03212.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.03212.x)
- Plath, M., Tobler, M., 2010, Subterranean fishes of Mexico (*Poecilia mexicana*, Poeciliidae), in E. Trajano, M.E. Bichuette and B.G. Kapoor, ed., The biology of subterranean fishes, Science publishers, Enfield, 281-330. ISBN 978-1-57808-670-2.
- Proudlove, G.S., 2010, Biodiversity and distribution of the subterranean fishes of the world, in E. Trajano, M.E. Bichuette and B.G. Kapoor, ed., The biology of subterranean fishes, Science publishers, Enfield, 41-64. ISBN978-1-57808-670-2.
- Rabosky, D.L., Chang, J., Cowman, P.F., Sallan, L., Friedman, M., Kaschner, K., Alfaro, M.E., 2018, An inverse latitudinal gradient in speciation rate for marine fishes. *Nature*, 559, 392-395. ISSN 1476-4687, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0273-1>
- Romero, A., Paulson, K.M., 2001, It's a wonderful hypogean life: a guide to the troglomorphic fishes of the world, *Environmental Biology of Fishes*, 62, 13-41. ISSN 1573-5133, <https://doi.org/10.1023/A:1011844404235>
- Romero, A., 2009, Cave biology: life in darkness. Cambridge University Press. ISBN-13 978- 0-511-59644-5.
- Romero, A., 2011, Peces cavernícolas: nuevos conceptos ponen en duda las ideas tradicionales acerca de la vida subterránea. *Investigación y Ciencia*, 42-48. ISSN 0210-136X.
- Rosen, D.E., Greenwood, P.H., 1976, A fourth Neotropical species of synbranchid eel and the phylogeny and systematics of synbranchiform fishes, *Bulletin of the AMNH*, 157, 1-70. ISSN 0003-0090, URI: <http://hdl.handle.net/2246/620>

- Scharpf, C., 2017, *Typhliasina* Whitley 1951, an unneeded replacement name for *Typhlias* Hubbs 1938 (Ophiidiiformes: Dinematchthyidae), *Zootaxa*, 4319, 371-372. ISSN 1175-5334, doi: <https://doi.org/10.11646/Zootaxa.4319.2.6>
- Seehausen, O., Wagner, C.E., 2014, Speciation in freshwater fishes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 621-651. ISSN 0066-4162, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091818>
- Strecker, U., Faúndez, V. H., Wilkens, H., 2004, Phylogeography of surface and cave *Astyanax* (Teleostei) from Central and North America based on cytochrome b sequence data, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 33, 469-481. ISSN 1055-7903, doi: [10.1016/j.ympev.2004.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ympev.2004.07.001)
- Tobler, M., Schlupp, I., Heubel, K.U., Riesch, R., García-de León, F.J., Giere, O., Plath, M., 2006, Life on the edge: hydrogen sulfide and the fish communities of a Mexican cave and surrounding waters. *Extremophiles*, 10, 577-585. ISSN 1433-4909, doi: [10.1007/s00792-006-0531-2](https://doi.org/10.1007/s00792-006-0531-2)
- Tobler, M., Riesch, R., García-de León, F. J., Schlupp, I., Plath, M., 2008, A new and morphologically distinct population of cavernicolous *Poecilia mexicana* (Poeciliidae: Teleostei), *Environmental Biology of Fishes*, 82, 101-108. ISSN 1573-5133, <https://doi.org/10.1007/s10641-007-9258-x>
- Wake, D.B., Wake, M.H., Specht, C.D., 2011, Homoplasy: from detecting pattern to determining process and mechanism of evolution, *Science*, 331, 1032-1035. ISSN 1095-9203, doi: [10.1126/science.1188545](https://doi.org/10.1126/science.1188545)
- Walsh, S. J., Chakrabarty, P., 2016, A new genus and species of blind sleeper (Teleostei: Eleotridae) from Oaxaca, Mexico: first obligate cave gobiiform in the Western Hemisphere. *Copeia*, 104(2), 506-517.
- Walsh, S. J., Gilbert, C. R., 1995, New species of troglobitic catfish of the genus *Prietella* (Siluriformes: Ictaluridae) from northeastern México. *Copeia*, pp. 850-861. <https://doi.org/10.2307/1447033>
- Weber, A., Wilkens, H., 1998, *Rhamdia macuspanensis*: a new species of troglobitic pimelodid catfish (Siluriformes; Pimelodidae) from a cave in Tabasco, Mexico, *Copeia*, 1998, 998-1004. ISSN 1938-5110, <https://doi.org/10.2307/1447347>
- Wilcox, T.P., García-de León, F., Hendrickson, D.A., Hillis, D.M., 2004, Convergence among cave catfishes: long-branch attraction and a Bayesian relative rates test, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 31, 1101-1113. ISSN 1055-7903, DOI: [10.1016/j.ympev.2003.11.006](https://doi.org/10.1016/j.ympev.2003.11.006)
- Wilkens, H., 1982, Regressive evolution and phylogenetic age: the history of colonization of freshwaters of Yucatan by fish and crustacea. *Texas Memorial Museum Bulletin*, 28, 237-243.
- Wilkens, H., 2001, Convergent adaptations to cave life in the *Rhamdia laticauda* catfish group (Pimelodidae, Teleostei), *Environmental Biology of Fishes*, 62, 251-261. ISSN 1573-5133, <https://doi.org/10.1023/A:1011897805681>



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Avifauna del área natural protegida “Reserva estatal Cerro del Águila”, Municipio de Morelia, Michoacán

Avifauna of the protected natural area "Cerro del Águila State Reserve", Municipality of Morelia, Michoacán

Javier Salgado Ortiz, Brenda Elizabeth Arteaga Salgado y José Fernando Villaseñor Gómez

Para citar este artículo: Salgado Ortiz Javier, Arteaga Salgado Brenda Elizabeth y Villaseñor Gómez José Fernando, 2023. Avifauna del área natural protegida “Reserva estatal Cerro del Águila”, Municipio de Morelia, Michoacán. Ciencia Nicolaita no. 89, 71-91. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.723>



Historial del artículo:

Recibido: 15 de junio de 2023

Aceptado: 1 de agosto de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: javier.salgado@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Avifauna del área natural protegida “Reserva estatal Cerro del Águila”, Municipio de Morelia, Michoacán

Avifauna of the protected natural area "Cerro del Águila State Reserve", Municipality of Morelia, Michoacán

Javier Salgado Ortiz, Brenda Elizabeth Arteaga Salgado y José Fernando Villaseñor Gómez

Laboratorio de Investigación en Ornitología, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resumen

El Cerro del Águila, ubicado dentro del municipio de Morelia, Michoacán, fue recientemente decretado como reserva estatal. Con base en muestreos de aves en los tres principales tipos de vegetación, en este trabajo reportamos un inventario con un total de 182 especies, de las cuales el 72.6% son residentes permanentes y 27.4% migratorias. El 21% presentan endemismo; seis se encuentran en riesgo según la NOM-089 y tres son exóticas. Dada la diversidad y especies en riesgo, concluimos que el Cerro del Águila representa un refugio muy importante para la conservación de la avifauna.

Palabras clave: Riqueza, gradiente altitudinal, similitud.

Abstract

The “Cerro del Águila”, was recently decreed as a state reserve within the municipality of Morelia, Michoacán. Based on bird sampling within the three main types of vegetation, we report a total of 182 species for the area, of which 72.6% are permanent residents and 27.4% are migratory. 21% of the species present endemism; six are at risk according to the NOM-089 and three are exotic. Given the diversity and species of concern found, we conclude that “Cerro del Águila” represents a very important refuge for the conservation of the avifauna.

Keywords: Diversity, altitudinal gradient, similarity.



Introducción

Michoacán ocupa el quinto lugar en biodiversidad a nivel nacional, pero es uno de los estados con menor proporción de superficie bajo protección (Villaseñor Gómez, 2005). La entidad cuenta con once áreas naturales protegidas (ANP) de carácter federal, que cubren 369,292.52 ha y representan 6.3% con respecto a la superficie estatal, mientras que a nivel estatal se han decretado 38 ANP y 12 áreas destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC), con una cobertura de 67,574.62 ha, lo que representa aproximadamente 1.2% de la superficie estatal (Raya Lemus, 2017). Estas últimas, con base al ordenamiento ecológico de Michoacán (OTM 2012), son en su mayoría pequeñas (rango entre 2.8 a 700 ha) y además no necesariamente protegen ecosistemas con vegetación nativa original. Siendo Michoacán un estado con gran diversidad biológica y alta concentración de endemismos con un 48% del total de aves endémicas de México de acuerdo con Villaseñor-Gómez (2005) y Navarro-Sigüenza *et al.* (2014), es imperante la necesidad de ampliar la superficie bajo protección con la creación de nuevas ANP a nivel federal o estatal, o bien, promover la creación de mayor número de áreas de conservación de carácter privado o comunal con base en la modalidad de ADVC.

El municipio de Morelia cuenta actualmente con 12 áreas protegidas que incluyen una superficie de poco más de 24,000 ha, con 23,107 ha exclusivas del área de protección ambiental Pico azul-la Escalera. La reciente declaratoria del Cerro del Águila como reserva estatal y subcategoría de reserva de captación y recarga de mantos acuíferos (Gobierno de Michoacán, Periódico oficial No. 91, 11-mayo-2023), junto también con la recién creada área protegida del Cerro del Quinceo, el Cerro del Punhuato y el área protegida de Pico azul-la Escalera, integran todas un importante anillo periférico, no solo para la captación y recarga de los mantos acuíferos vitales para el municipio, sino también para la conservación regional de la biodiversidad (Marín-Togo y Blanco-García, 2009; Garduño-Monroy *et al.*, 2014).

Como parte del ETJ para el Cerro del Águila (Periódico oficial del Gobierno de Michoacán, No 51, 16-marzo-2023) la información relativa a componentes bióticos, en el apartado de fauna, incluyó un listado

de aves con 58 especies de 28 familias. De acuerdo al IMPLAN (2018), dentro del municipio de Morelia se registran 313 especies de aves, repartidas en 20 órdenes, 53 familias y 181 géneros. En un análisis sobre la avifauna presente en ANPs del municipio de Morelia, Villaseñor-Gómez *et al.* (2017), reportan 230 especies de aves, que representan el 41% del total conocido en el estado de Michoacán. Entre otros estudios adicionales, destacan aquellos realizados como tesis de licenciatura dentro del Laboratorio de Ornitología de la Facultad de Biología de la UMSNH, como los del Parque Estatal Cerro del Punhuato (área aledaña al noroeste de la zona urbana que integra ambientes perturbados o modificados), en la que se han registrado 140 especies en los hábitats de matorral subtropical y plantaciones de eucalipto (Pérez-Cossio, 1995; Lázaro-García, 1996; Almanza-Ochoa *et al.*, 2017). Por otra parte, se cuenta con un inventario de la loma de Santa María y depresiones aledañas, en la que se han registrado 120 especies dentro de los hábitats de matorral subtropical, bosque de pino-encino, bosque de galería, pastizal y plantaciones de eucalipto y casuarina (Arzate-Alcázar *et al.*, 2017). García-Peña (2009) registró 133 especies dentro de seis tipos de vegetación que incluyen bosque de pino-encino, bosque de galería, bosque mesófilo de montaña, matorral subtropical, pastizal y vegetación perturbada, ubicados en la porción del sitio conocido como los filtros de Morelia y la localidad de Jesús del Monte, dentro de la microcuenca del Río Chiquito. Como parte de un estudio técnico justificativo realizado en Atécuaro, López-González (2005) reportó 76 especies de aves, algunas de ellas de importancia económica como la paloma huilota (*Zenaida macroura*) usada para autoconsumo o el gavilán de Cooper (*Accipiter cooperii*) considerada como especie nociva por los habitantes. Pimentel-Belmares *et al.* (2017), registraron 127 especies de aves en la zona sujeta a preservación ecológica Piedra del Indio y ex Escuela Agrícola La Huerta, al sureste de la Tenencia Morelos. En el área protegida y manantial la Mintzita, Soto-Rojas (2005) registró 112 especies de aves, incluyendo especies acuáticas en un ambiente con una mezcla de bosque de galería y matorral subtropical. Estos estudios, destacan la diversidad avifaunística del municipio de Morelia, a pesar de que en la mayoría de las áreas naturales del municipio predomi-

nan ambientes perturbados y con frecuencia con presencia de vegetación no nativa, como las plantaciones de eucaliptos.

El Cerro del Águila, localizado al suroeste de Morelia presenta un rango altitudinal de los 1,900 a 3,080 msnm, ubicándolo como el de mayor elevación del municipio de Morelia (Zacarías-Eslava *et al.*, 2011). En este, existen tres pisos altitudinales caracterizados por diferentes tipos de vegetación (Cortés-Flores *et al.*, 2011; Zacarías-Eslava *et al.*, 2011; Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013) incluyendo matorral subtropical de los 2000-2300 msnm, bosque de encino de los 2200-2800 msnm y bosque de pino-encino de los 2500-3080 msnm, que junto con un mosaico diverso de áreas integradas por parches de vegetación secundaria y superficie dedicada a la agricultura y ganadería, predicen una alta diversidad de aves a nivel local. Como parte de la planeación y toma de decisiones en la conservación de la biodiversidad, las aves constituyen un grupo excelente como indicadores ambientales debido a que responden rápidamente a cambios que ocurren en los hábitats naturales causados por factores de origen natural o por actividades humanas, como por ejemplo, cambio de uso de suelo, incendios forestales, cambio climático, urbanización, contaminación por pesticidas agrícolas o industriales y capacidad de carga de turismo entre otras (Mekonen, 2017; Grant *et al.*, 2000; Salas-Correa y Mancera-Rodríguez, 2020).

Las aves han recibido un creciente interés por la ciudadanía que cada vez más se involucra en actividades de aviturismo, generando así, fuentes de economía para comunidades asentadas en las ANP (Galicia *et al.*, 2018), ayudando a reducir actividades ilegales como la tala forestal y extracción de flora y fauna silvestre (González Kuk y Muñoz-Márquez Trujillo, 2022). Este trabajo, representa el primer estudio descriptivo sobre la avifauna del área natural protegida Cerro del Águila y tiene como objetivo describir: 1) la riqueza y diversidad de aves con relación a los cambios de la vegetación en los diferentes pisos altitudinales, y 2) coadyuvar sobre la importancia del área natural protegida para la conservación regional de las aves y la biodiversidad a nivel regional.

Métodos

Ubicación geográfica

El estudio se llevó a cabo en el Cerro del Águila, ubicado aproximadamente a 15 km al suroeste de la ciudad de Morelia y a 7 km al noreste de la cabecera municipal de Lagunillas, entre los 19°32'30" y 19°40'30" de latitud norte y los 101°16'39" y 101°26'16" de longitud oeste. Su extensión es de 163.2 km², de los cuales una cuarta parte corresponde al municipio de Lagunillas y tres cuartas partes pertenecen al municipio de Morelia; su rango altitudinal va de 1,900 msnm a 3,080 msnm, ubicándolo como el de mayor elevación del municipio de Morelia (Zacarías-Eslava *et al.*, 2011).

En los alrededores del cerro se ubican los asentamientos humanos de Capula, Tacícuaro, Cuanajillo Grande, San Nicolás Obispo, Joya de la Huerta, Joya de Buenavista, La Estancia, El Reparó, Isaac Arriaga, Tiripetío, San José Coapa, Huatzangio, La Caja, Las Pilas, El Correo e Iratzio. Las principales vías de acceso están en las carreteras federales no.14 Morelia-Pátzcuaro y no. 15 Morelia-Guadalajara a la altura del km 7, con desviación hacia la localidad de Cointzio (Figura 1; Gobierno de Michoacán PO no. 51, 2023).

Clima

Con base en los datos climáticos obtenidos de la estación meteorológica Presa Cointzio (por su proximidad) y siguiendo la clasificación climática de Köpen, modificada por García (1988), el tipo de clima en el sitio de estudio es C(w₁)(w)b(i')g, que es templado subhúmedo con verano fresco y largo, como poca oscilación térmica e intertropical. La temperatura media anual es de 17.6°C y la precipitación anual total oscila entre 791 a 810 mm, con una marcada estación de lluvias entre los meses de junio a octubre (INEGI 2007; Cortés-Flores *et al.*, 2011).

Vegetación

Los estudios de vegetación en el Cerro del Águila reportan una alta riqueza florística, representada por 455 especies comprendidas en 241 géneros y 81 familias (Cortés-Flores *et al.*, 2011; Zacarías-Eslava *et al.*, 2011; Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013), y reconocen cinco tipos de vegetación:

1) Bosque de pino-encino, situado entre los 3,080 y 2,500 msnm, está integrado por un estrato arbóreo

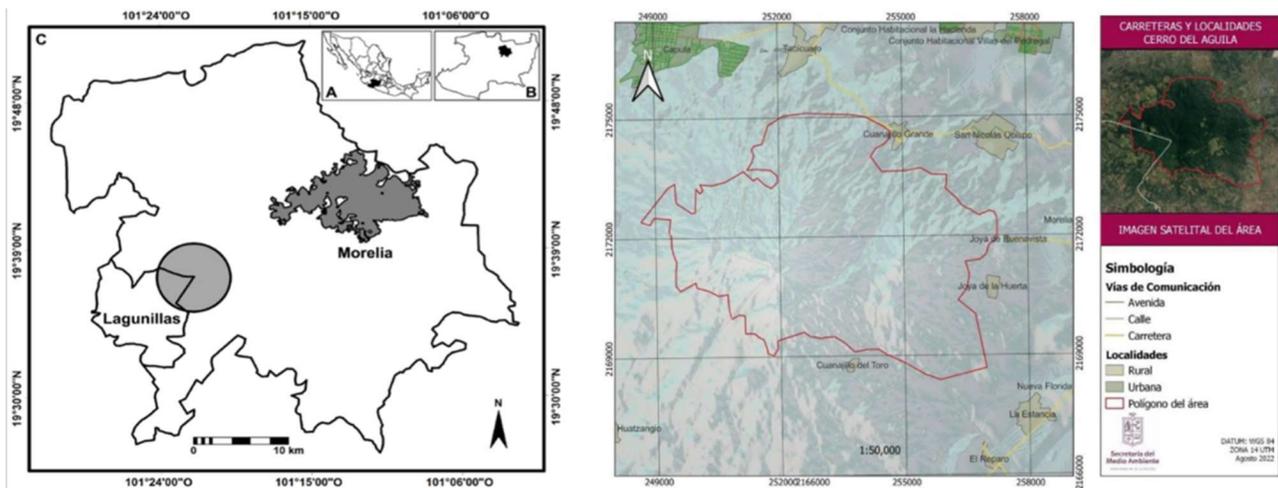


Figura 1. Izquierda; ubicación geográfica del Cerro del Águila (circunferencia gris), dentro de los municipios de Lagunillas y Morelia, Michoacán, México (tomado de Zacarías-Eslava *et al.*, 2011). Derecha. Ubicación del polígono del área protegida y ubicación de asentamientos humanos y carreteras aledañas (tomado de periódico oficial del GM no. 51).

de gran altura (10 -20 m) donde dominan especies como *Quercus laurina*, *Q. rugosa* y *Pinus pseudostrobus*, combinado con un estrato arbustivo y herbáceo dispuestos en patrones sumamente cerrados, casi impenetrables.

2) Bosque de encino, ubicado entre los 2,800 y 2,200 msnm compuesto por árboles de altura media (4-7 m) cuyas especies principales son *Quercus deserticola*, *Q. castanea* y *Q. rugosa*, junto con estratos herbáceo y arbustivo menos densos.

3) Bosque tropical caducifolio, conocido también como **matorral subtropical**, localizado entre los 2,300 a 2,000 msnm, está formado por una comunidad heterogénea y severamente fragmentada, dominada por árboles caducifolios de baja estatura (2-5 m), que pertenecen a especies como *Acacia pennatula*, *Bursera cuneata* y *Condalia velutina*, entremezclados con individuos de *Quercus deserticola*, *Q. castanea* y *Q. obtusata*, y con fragmentos dispersos de otros elementos paisajísticos como el pastizal, potreros y parcelas agrícolas dedicadas al cultivo de maíz.

4) Pastizal, se localiza de forma discontinua desde los 2,800 a 2,550 msnm en claros o bordes de los bosques, principalmente entre encinares y matorral subtropical. Se trata de una comunidad constantemente perturbada por el fuego, principalmente resultado de actividades humanas, por lo que su estructura y composición florística es muy heterogénea. En algunas zonas lo representan especies amacolladas de hasta 80 cm de alto como *Muhlenbergia dubia*, *M. macroura* y

M. robusta, mientras que en otros lugares lo caracterizan especies que generalmente no sobrepasan los 50 cm de alto como *Aegopogon cenchrroides*, *Agalinis peduncularis*, *Halenia brevicornis*, entre otras. Cerca de los pastizales se observan matorrales dominados por *Baccharis heterophylla*, *Barkleyanthus salicifolius* y *Lupinus exaltatus*.

5) Vegetación secundaria, constituida por un estrato herbáceo estacional con especies de flores vistosas como *Castilleja ternuifolia*, *Cosmos bipinnatus*, *Lupinus exaltatus* y *Phytolacca icosandra*, entre otras especies asociadas a los campos de cultivo, caminos de terracería o áreas que presentan alguna clase de perturbación antrópica.

Muestreo

Para fines de este estudio, se muestrearon solamente las comunidades de aves dentro de los tres primeros tipos de vegetación, que representan la vegetación nativa. Los otros dos tipos (pastizal y vegetación secundaria), se encuentran asociados como parches del paisaje mezclado dentro de los otros tipos de vegetación, y como tal se integran como parte del componente principal de vegetación arbórea que los rodea.

Realizamos muestreos de aves entre abril 2015 y junio 2016, cubriendo los períodos estacionales de lluvias (mayo a septiembre) y secas (octubre a abril). Utilizamos la técnica de censos por puntos de radio fijo (Hutto *et al.*, 1986), método que permite la descripción eficiente de la riqueza, abundancia y asociación

de las especies en hábitats de interés (Ralph *et al.*, 1996). Este método consiste en el conteo de las especies e individuos observados y escuchados dentro de una parcela circular con un radio de distancia de 50 m por un tiempo de cinco minutos. Una vez cumplido el tiempo, el observador se desplaza a otro punto separado del anterior por una distancia mínima de 200 m para repetir el procedimiento (Hutto *et al.*, 1986). Los muestreos se realizaron entre las 07:00 a 11:00 h, que representa el periodo de mayor actividad de las aves. Se realizaron cinco visitas a cada una de cuatro localidades 1) Cuanajillo, con matorral y encinar; 2) Joyas de la Huerta, con matorral, encinar y pino-encino; 3) Lagunillas, con matorral, encinar y pino-encino y 4) Villa Magna, con matorral (Figura 2).

Las visitas fueron intercaladas mensualmente entre localidades y para cada tipo de vegetación, establecimos un mínimo de diez puntos que fueron muestreados repetidamente en las visitas mensuales para asegurar un registro lo más completo posible de las especies y su variación en abundancia entre tipos de vegetación y por estaciones. Cada punto fue georreferenciado (latitud, longitud) y ubicado en altitud con ayuda de un GPS para asociarlo al tipo de vegetación

y piso altitudinal. Para asegurar un listado lo más completo posible se registraron, además, las especies observadas fuera de los censos durante el tiempo de desplazamiento entre puntos de conteo o bien durante el recorrido en vehículo entre sitios de muestreo y vegetación de interés. Para la identificación de las aves se utilizaron guías especializadas de campo (Howell y Webb, 1995; National Geographic, 2011; Sibley, 2000), además de la aplicación digital “Merlin vs 2.1.4” (Cornell Lab of Ornithology 2022), que cuenta con material digital visual y auditivo.

Con los registros de campo obtenidos en los censos y entre puntos de conteo, se generó la lista global de especies (Anexo I), la cual se presenta siguiendo la nomenclatura actualizada sugerida por la AOU (1998) y suplementos (Chesser *et al.*, 2020). La información sobre nombres comunes, endemismo, ocurrencia estacional y estado de conservación (NOM-059-SEMARNAT-2010), se obtuvo de la propuesta de Berlanga *et al.* (2019; Anexo I).

Determinación de riqueza específica

La riqueza específica definida como el número total de especies presentes en un área (Moreno, 2001), se determinó tanto a nivel general como por tipo de



Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo donde las líneas de color indican la ubicación de rutas indicando la sección asociada al tipo de vegetación; matorral subtropical (rojo), bosque de encino (naranja) y bosque de pino-encino (amarillo).

vegetación. Debido a variaciones ambientales y de la fenología de la vegetación, así como variaciones estacionales en la presencia de aves, es posible que no se registren todas las especies en su totalidad, por lo que utilizamos el estimador no paramétrico Chao 1, cuyo algoritmo basado en la abundancia (Chao *et al.*, 2005), permite comparar la riqueza observada con la esperada y calcula el número probable de especies que potencialmente pueden estar presentes en un sitio pero que no son registradas por el observador, así como definir la eficiencia del muestreo de especies (Moreno, 2001; Villarreal *et al.*, 2004).

Se estimó la abundancia relativa utilizando el total de registros acumulados para las especies registradas durante los conteos por puntos para cada tipo de vegetación. A la especie con mayor número de registros se le asignó la mayor abundancia (100%) y fue tomada como referencia para calcular los valores proporcionales de las demás especies a las cuales se asignaron categorías como sigue: C (común), MC (moderadamente común), NC (no común) y R (rara; **Anexo I**). Para determinar variaciones en la estructura de la comunidad, se construyeron curvas de rango-abundancia por tipo de vegetación, donde se graficaron las especies ordenadas de mayor a menor abundancia, para comparar las variaciones en la dominancia y composición de especies entre los tres tipos de vegetación. Para determinar diferencias de riqueza y abundancia entre los tipos de vegetación comparamos el promedio de especies e individuos detectados por punto de conteo con base en una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Fowler *et al.*, 1998).

Además de la riqueza y abundancia, se calcularon índices de diversidad alfa y beta. Para fines de este estudio se empleó el índice de Alfa de Fisher, que destaca la importancia de la riqueza de especies, es poco influenciado por el tamaño de muestra y tiene buena capacidad para diferenciar entre sitios con niveles de diversidad similares (Magurran, 1988). La diversidad beta o diversidad entre hábitats es el grado de cambio o reemplazo de especies entre diferentes hábitats o gradientes ambientales, y describe qué tan similares o diferentes son en cuanto a su composición y abundancia (Moreno, 2001). Para su evaluación se utilizó el índice cualitativo de Whittaker y el cuantitativo de similitud de Morisita-Horn; el primero compara las diferencias en el reemplazo de especies usando datos de

presencia-ausencia, mientras que el segundo relaciona las abundancias específicas y aunque es sensible a las especies más abundantes, es poco influenciado por la riqueza y tamaño de muestra (Magurran, 1988). Realizamos además un análisis de escalamiento dimensional no métrico (NMDS), método de clasificación de análisis de gradiente, basado en la distancia de una matriz de disimilitud para determinar la variación espacial entre los puntos de muestreo asociados a cada hábitat con su pool de especies e individuos, usando en este caso el índice de Morisita. Para los análisis estadísticos y cálculo de índices de diversidad, se utilizaron los programas Estimates 9.1 (Colwell, 2013) y Past (Hammer *et al.*, 2001).

Resultados

Incluyendo los registros de censos y registros generales, detectamos un total de 182 especies de aves pertenecientes a 43 familias y 15 órdenes (**Anexo 1**). Las familias mejor representadas fueron Parulidae (chipes), Tyrannidae (mosqueros, papamoscas, tiranos) y Passerellidae (semilleros, zacatoneros, gorriones) con 20, 19 y 17 especies, respectivamente. Del total de especies, 133 (72.6%) son residentes permanentes, 43 (23.5%) son visitantes de invierno, cuatro (2.2%) son residentes de verano y tres (1.6%) son migratorias en tránsito (**Anexo 1**). Del total, 38 especies (20.7%) corresponden a algún patrón de endemismo, con 12 endémicas estrictas, 16 semiendémicas y nueve cuasiendémicas (**Anexo 1**). Con relación al estado de riesgo según la NOM-059, seis especies; Gavilán pecho canela (*Accipiter striatus*), Gavilán de Cooper (*A. cooperi*), Codorniz de Moctezuma (*Cyrtonyx montezumae*), Aguillilla cola blanca (*Geranoaetus albicaudatus*), Jilguero (*Myadestes occidentalis*) y el Mirlo azteca (*Ridgwayia pinicola*) se consideran en protección especial y por otra parte, el Chipe de lores negros (*Geothlypis tolmiei*) como amenazada. Tres especies, el Gorrión doméstico (*Passer domesticus*), la Paloma doméstica (*Columba livia*) y la Paloma de collar turca (*Streptopelia decaocto*), son especies exóticas.

Excluyendo especies no registradas en los conteos, la riqueza de especies varió entre los tipos de vegetación (**Cuadro 1**), existiendo mayor número de especies en el bosque de encino (BE) y menor en el de pino-encino (BPE). Con base al estimador de Chao1, se tuvo que la eficiencia del muestreo fue de entre el 87 a 93%

de la riqueza esperada, con un registro global de especies estimado del 97.7% (**Cuadro 1**). Los intervalos de confianza para cada tipo de vegetación muestran una buena relación entre el número de especies observadas y las esperadas, considerando el intervalo de confianza bajo (**Cuadro 1**). No obstante, las diferencias en riqueza acumulada entre tipos de vegetación, el número promedio de especies registradas por punto de conteo en BPE ($9.2 \pm DE 4.6$), BE (8.1 ± 3.6) y MS (8.7 ± 3.0) no varió significativamente entre hábitats ($X^2 = 2.56, P = 0.27$).

Con base en la abundancia de las especies, encontramos una distribución típica de comunidades, donde se presentaron pocas especies muy abundantes en contraste con una proporción alta de especies raras (**Figura 3**). Las curvas de rango-abundancia sugieren que la estructura de las comunidades es muy similar entre los bosques de pino-encino y encino, mostrando una distribución de abundancias más equitativa en contraste con el matorral, donde se observa

una comunidad donde destaca la dominancia de pocas especies en comparación con la mayoría, que presentan bajas abundancias (**Figura 3**). La abundancia a nivel de puntos de conteo varió significativamente entre hábitats ($X^2 = 9.77, df = 2, P = 0.0075$); sin embargo, las diferencias sólo se presentaron entre el Bosque de Pino-Encino (12.87 ± 6.7 ind por punto) en comparación con los otros dos hábitats (Encino, 18.16 ± 14.5 y Matorral, 19.10 ± 11.5), no habiendo diferencias entre estos dos últimos.

Los índices de diversidad alfa mostraron que el bosque de encino fue el de mayor diversidad (**Cuadro 2**). La prueba de pares para diversidad de T de student muestra que el valor de diversidad H fue significativamente diferente para el Bosque de Encino en comparación con el valor de H de Pino-Encino ($P = 0.0046$) y de Matorral ($P = 0.0001$). No hubo diferencias significativas entre los valores de diversidad H entre Matorral y Pino-encino ($P = 0.58$).

Con base en el análisis de diversidad beta, tanto en el análisis de similitud basado en el índice cualitativo

Cuadro 1

Riqueza de especies de aves observada, esperada, intervalos de confianza bajo-alto y porcentaje de eficiencia del muestreo de especies por tipo de vegetación de acuerdo al estimador Chao1.

Vegetación*	Observadas	Esperadas	Intervalos de confianza 95%	Eficiencia de registro de especies (%)
BPE	92	99	94-116	92.9
BE	142	163	150-195	87.1
MS	108	119	112-142	90.8
Total	172	176	173-189	97.7

*Vegetación: BPE= Bosque de pino-encino, BE= Bosque de encino y MS= Matorral subtropical

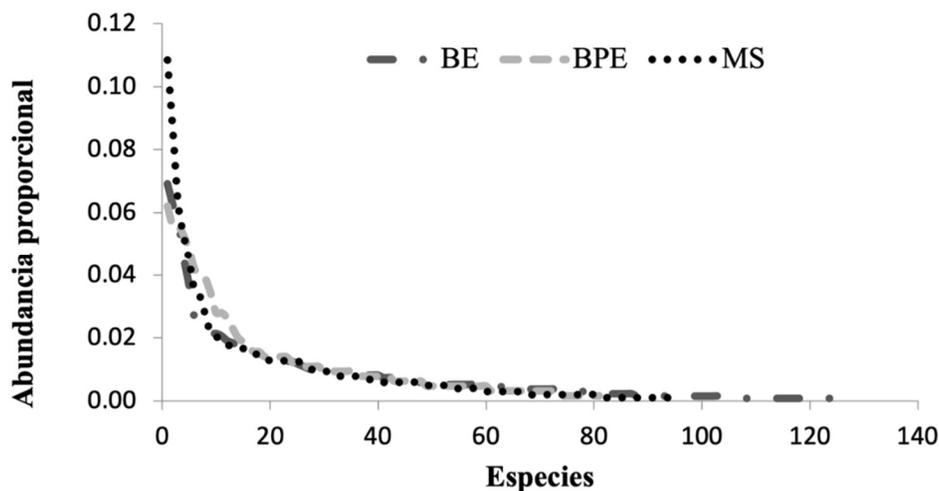


Figura 3. Curvas de rango abundancia para las comunidades de aves de los tres tipos de vegetación principales en el Cerro del Águila, Morelia, Michoacán (BE= Bosque de encino, BPE= Bosque de Pino-encino, MS= Matorral subtropical).



de Whittaker, como en el cuantitativo de Morisita-Horn, se encontró que el bosque de encino y matorral comparten mayor similitud entre ellos (**Cuadro 3**), compartiendo 88 especies, mientras que hay poca similitud entre el bosque de pino-encino y el matorral subtropical con sólo 41 especies compartidas. Entre el bosque de pino-encino y bosque de encino se compartieron 82 especies.

La comparación de las diez especies más comunes por hábitat (**Cuadro 4**), muestra que las comunidades difieren en composición. Aunque, entre pares de hábitats se comparten de dos a tres especies, el resto son únicas para cada tipo de hábitat, indicando asociaciones específicas de la avifauna con respecto al tipo de hábitat. Lo anterior se ve reforzado por la distribución espacial de puntos de muestreo (**Figura 4**); el análisis de escalamiento dimensional no métrico,

Cuadro 2

Índices de diversidad alfa de Fisher (cualitativo) y de Shannon (cuantitativo) para los tres tipos de vegetación del Cerro del Águila, Morelia, Michoacán.

Índice	Pino-Encino	Encino	Matorral
Alfa Fisher	28.7	37.5	28.6
Shannon-H	4.01	4.20	3.96

Cuadro 3

Matriz de similitud entre hábitats con base en el método cualitativo de Jaccard y Cuantitativo de Morisita-Horn.

Jaccard Clásico (Cualitativo)			
	Encino-Pino	Encino	Matorral subtropical
Pino-Encino		0.539	0.258
Encino			0.543
Matorral subtropical			
Morisita-Horn (Cuantitativo)			
	Encino-Pino	Encino	Matorral subtropical
Pino-Encino		0.519	0.291
Encino			0.668
Matorral subtropical			

Cuadro 4

Comparación de la composición de especies entre tipos de hábitat con base a las diez especies con mayor abundancia para cada tipo de vegetación.

Rango de abundancia	BPE	BE	MS
1	<i>Basilinna leucotis</i>	<i>Haemorhous mexicanus</i>	<i>Haemorhous mexicanus</i>
2	<i>Cortilio calendula</i>	<i>Spizella passerina</i>	<i>Spizella passerina</i>
3	<i>Pipilo maculatus</i>	<i>Oriturus superciliosus</i>	<i>Psaltriparus minimus</i>
4	<i>Aphelocoma ultramarina</i>	<i>Tyrannus vociferans</i>	<i>Melospiza fusca</i>
5	<i>Sitta carolinensis</i>	<i>Ptiliogonys cinereus</i>	<i>Tyrannus vociferans</i>
6	<i>Colibri thalassinus</i>	<i>Spinus psaltria</i>	<i>Passerina caerulea</i>
7	<i>Melanerpes formicivorus</i>	<i>Vireo gilvus</i>	<i>Campylorhynchus gularis</i>
8	<i>Myioborus miniatus</i>	<i>Cortilio calendula</i>	<i>Molothrus aeneus</i>
9	<i>Troglodytes aedon</i>	<i>Aphelocoma ultramarina</i>	<i>Spizella atrogularis</i>
10	<i>Setophaga townsendi</i>	<i>Sialia sialis</i>	<i>Pyrocephalus rubinus</i>

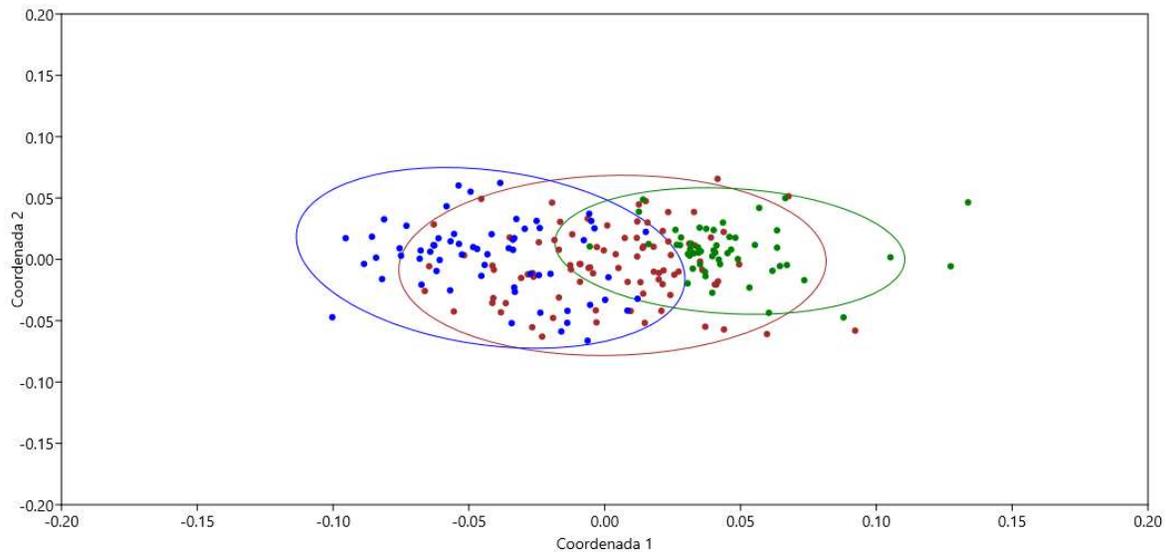


Figura 4. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico de la relación espacial de las comunidades de aves en los tipos de vegetación del Cerro del Águila. El color azul (matorral subtropical), en café (bosque de encino) y en verde (bosque de pino-encino). Para la ordenación se utilizó el índice de similitud de Morisita que integra la relación de presencia-ausencia de especies y la variación de abundancia de las mismas. Los puntos están representados por los puntos de conteo donde se realizaron los muestreos para cada hábitat.

muestra que, aunque hay un traslape de puntos que identifican al tipo de hábitat, hay una diferenciación clara de la distribución de estos, particularmente de aquellos asociados a los hábitats extremos en el gradiente altitudinal, observándose la separación de puntos de matorral subtropical con relación a los de bosque de pino-encino.

Discusión

Dentro del municipio de Morelia la avifauna ha sido relativamente bien estudiada, destacando el interés por las áreas protegidas, donde Villaseñor Gómez *et al.* (2017) reportan 230 especies de aves dentro de 10 áreas protegidas del municipio, que representan el 41% del total conocido en el estado de Michoacán. Entre las áreas más estudiadas destaca el Parque Estatal Cerro Punhuato, aledaño a la zona urbana hacia el oriente de la ciudad que incluye principalmente un ambiente muy modificado con respecto a la vegetación original (mezcla de encino-pino y matorral subtropical) donde se han registrado 140 especies en los hábitats remanentes de matorral subtropical y plantaciones de eucalipto (Pérez-Cossío, 1995; Lázaro-García, 1996; Almanza-Ochoa *et al.*, 2017). Destaca también los estudios de la Piedra del Indio con 127 especies (Pimentel-Belmares *et al.*, 2017) y el de la Loma de Santa María y depresiones aledañas,

donde se han registrado 120 especies (Arzate-Alcázar *et al.*, 2017) dentro de un paisaje integrado por matorral subtropical, bosque de pino-encino, bosque de galería, pastizal y plantaciones de eucalipto y casuarina. En el área protegida manantial La Mintzita, que se encuentra en la parte baja del Cerro del Águila, se reportaron 112 especies de aves, incluyendo acuáticas en un ambiente con una mezcla de bosque de galería y matorral subtropical (Soto-Rojas, 2005). Con respecto a otras áreas de bosque templado, Villaseñor-Gómez y Villaseñor Gómez (2018) reportan 146 especies para el área del Volcán Paricutín, mientras que Chávez-León (2007) reporta 128 especies para el Parque Nacional Barranca del Cupatitzio en Uruapan; para el oriente del estado, en los bosques templados de coníferas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Villaseñor-Gómez (2013) con base a monitoreo y registros históricos, compiló una lista de 215 especies, mientras que hacia el lado opuesto al poniente del estado, para el área de protección de flora y fauna Pico de Tancitaro se registran 241 especies (CONANP 2014). La riqueza de especies (182) que registramos para el Cerro del Águila, representa el 79% con respecto a lo reportado por Villaseñor *et al.*, (2017) para el conjunto de las áreas protegidas dentro del municipio y representa el 32% con respecto al total de especies de Michoacán (Villaseñor-Gómez, 2005). En comparación con la reserva de la Mariposa monarca y Pico

de Tancítaro la avifauna del Cerro del águila se traduce en un 16 y 24% menos especies, considerando que ambas áreas protegidas cuentan con superficies mayores y cubren un rango altitudinal mayor que el del Cerro del Águila. Claramente, la riqueza de especies del Cerro del Águila contribuye con un porcentaje significativo de la avifauna de bosques templados superando en buena medida lo reportado en otras áreas protegidas del municipio, resaltando su relevancia para la conservación a nivel municipal y regional.

A diferencia de las áreas protegidas del municipio de Morelia, donde la vegetación en gran parte se integra por una mezcla de vegetación introducida (eucaliptos), parches de vegetación secundaria, áreas degradadas de matorral y pastizales inducidos, con frecuencia aledaños a la zona urbana, el Cerro del Águila contiene aún una extensión importante de vegetación nativa de pino-encino, encino y matorral subtropical, incluyendo también un mosaico heterogéneo con áreas agrícolas ganaderas y asentamientos humanos (Gobierno de Michoacán; ETJ, 2023). Esta rica mezcla del paisaje junto con la variación de vegetación a lo largo del gradiente altitudinal, explica la mayor riqueza de especies para el área.

Dada la cercanía del Cerro del Águila a la ciudad de Morelia y la consecuente y continua expansión de la zona urbana, junto con el incremento en la superficie demandada para la agricultura y ganadería, la vegetación nativa remanente está seriamente amenazada. Actualmente, la extensión boscosa (principalmente en la cima) presenta un nivel moderado de perturbación (Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013); sin embargo, la extracción de madera y leña y los incendios forestales están afectando y modificando la estructura forestal. Por otra parte, en la última década, la conversión del bosque a huertos de aguacate en las faldas del cerro, ha surgido como una de las principales amenazas.

Nuestro trabajo pone en evidencia que además de una alta riqueza de especies de aves, el Cerro del Águila aloja también un número importante de especies endémicas como el zacatonero rayado (*Oriturus superciliosus*), el Rascador nuca canela (*Melozona kienneri*), el Chipe rojo (*Cardellina rubra*) y el Mirlo pinto (*Ridgwaia pinicola*), especies afines a bosques templados y vegetación nativa en buen estado de conservación (Chávez-León, 2007). Se registraron también especies como la Paloma encinera de collar (*Patagioenas fasciata*), trogones (Trogón elegante y mexicano,

Trogon elegans y *T. mexicanus*) y tecolotes (como el Tecolote occidental (*Megascops kennicottii*) y el Tecolote oyamelero (*Aegolius acadicus*), cuyas poblaciones han disminuido drásticamente a lo largo de su distribución geográfica en México (Berlanga *et al.*, 2010).

Cabe destacar también un número importante de especies migratorias, particularmente colibríes, como el Zumbador rufo (*Selasphorus rufus*) y chipes (Parulidae) presentes con diferentes especies en los varios tipos de vegetación dentro del gradiente altitudinal. Resalta por otro lado la abundancia de especies residentes, como el Colibrí oreja violeta (*Colibri thalassinus*), la Euphonia capucha azul (*Euphonia elegantissima*) y el Rascador moteado (*Pipilo maculatus*) que se registraron como comunes en el Cerro del Águila en comparación con otras áreas del municipio, donde son más bien raras. De igual forma, se registraron especies que son afines a pastizales nativos y cuyas poblaciones están disminuyendo en su área de distribución, como el caso del Alcaudón verdugo (*Lanius ludovicianus*), varias especies de gorriones como el Zacatonero de Botteri (*Peucaea botteri*), Gorrión chapulín (*Ammodramus savannarum*), el Zacatonero rayado (*Oriturus superciliosus*) y el Pradero Tortilla con chile (*Sturnella magna*), esta última recientemente separada taxonómicamente (Beam *et al.*, 2021), lo que podría incluir también a la especie ahora identificada como *Sturnella lilianae*, cuya distribución disyunta en México la hace una especie de gran interés en la filogeografía y de necesidad prioritaria de conservación.

Los análisis de diversidad beta arrojaron que la similitud de la composición avifaunística fue baja entre hábitats extremos en el gradiente y apenas moderada entre hábitats vecinos. Lo anterior denota una separación entre comunidades de aves que demuestra que muchas especies presentan una fuerte afinidad al uso de hábitat reflejada con relación a los recursos a los cuales se especializan y evitar la competencia.

En el contexto de la rápida pérdida de bosques dentro del municipio de Morelia y regiones aledañas, el Cerro del Águila representa actualmente uno de los últimos refugios para especies de interés como las arriba mencionadas. A pesar de su condición de aislamiento con respecto a otras áreas boscosas dentro del municipio de Morelia (dado el crecimiento de la mancha urbana), el cerro del Águila cuenta aún con un gran potencial para fines de conservación de biodiversidad. Nuestro estudio destaca, no sólo la importante

riqueza de especies de aves en el sitio, sino además se integra dentro de una de las regiones de mayor endemismo de especies en México (Sistema Volcánico Transversal; Navarro-Sigüenza *et al.*, 2014), resaltando aún más su potencial para considerar en iniciativas de protección del área natural protegida.

Nuestro estudio demuestra que la riqueza de aves en el Cerro del Águila se relaciona con la rica mezcla del mosaico de vegetación y otros componentes del paisaje asociados a actividades humanas (terrenos agrícolas y ganaderos), por lo que sería recomendable además de lo que incluye el polígono del área protegida, se consideren estrategias de conservación que incluyan la participación de los dueños de las tierras aledañas para integrar corredores biológicos que incluya los diversos tipos de vegetación a lo largo del gradiente altitudinal y con ellos conectar hacia el área protegida Cerro del Quinceo y la Mintzita, la Presa de Cointzio y hacia la región de Atécuaro y Umécuaro. El bosque de encino que fue el de mayor riqueza de aves, se considera en general como uno de los hábitats que más rápidamente están desaparecido a lo largo de las montañas de México (CONABIO 2009). Los bosques de encino se identifican como ambientes de transición que resultan en una alta biodiversidad, dada su ubicación entre ecosistemas aledaños que permiten el acomodo de especies de los ecosistemas vecinos abajo y arriba del gradiente altitudinal. La conservación de hábitats nativos a lo largo del gradiente altitudinal es primordial para asegurar la conservación de la mayoría de especies de aves, así como también de muchas otras especies de flora y fauna asociadas. Los análisis de diversidad demuestran que hay baja similitud en la composición de la avifauna entre los tipos de vegetación extremos en el gradiente altitudinal (matorral subtropical y pino-encino), mientras que el encino comparte un número importante de especies entre hábitats, además de sus especies únicas. Para lograr una conservación efectiva de la diversidad de aves en el área natural protegida y áreas aledañas, se requiere entonces integrar un esquema de conectividad entre las diferentes asociaciones vegetales a lo largo del gradiente. Esto permitiría no solamente la conservación de especies, sino también mantener funciones ecológicas, como la de captación de agua, disminución de erosión y mitigación de cambio climático. Un diseño de estas características, resultaría en diversos beneficios a los habitantes de Municipio de

Morelia y otros aledaños, por ejemplo, para fines de ecoturismo, la observación de aves y de naturaleza y la capacitación en diversos temas ambientales.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado con apoyo financiero de la Coordinación de investigación científica en el 2015 (proyecto ID 522441) y como parte del programa de formación de recursos humanos del Laboratorio de Investigación en Ornitología de la Facultad de Biología de la UMSNH. Agradecemos a estudiantes del laboratorio, por la asistencia en el campo.

Literatura citada

- Almanza-Ochoa, M.D., J. Salgado-Ortiz, A. Ceja-Madrigal y L. E. Villaseñor-Gómez. 2017. Avifauna del Área Natural Protegida Cerro del Punhuato (ANPCP), Morelia, Michoacán, México: Actualización a más de veinte años del primer inventario. Memoria del XV Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C. Morelia, Michoacán, México. pp. 192.
- Arzate-Alcázar, L.E. Villaseñor-Gómez y G. Pimentel-Belmares. 2017. Inventarios biológicos y ciencia ciudadana: Avifauna de la zona sujeta a restauración y protección ambiental Loma de Santa María y depresiones aledañas, Morelia, Michoacán. Memoria del XV Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C. Morelia, Michoacán, México. pp. 86.
- Beam, J. K., E. R. Funk, y S. A. Taylor. 2021. Genomic and acoustic differences separate Lillian's Meadowlark (*Sturnella magna liliana*) from Eastern (*S. magna*) and Western (*S. neglecta*) meadowlarks. *Ornithology*. Vol 138, 2021, pp. 1–13. DOI 10.1093/ornithology/ukab004
- Berlanga, H., H. Gómez de Silva, V. M. Vargas-Canales, V. Rodríguez-Contreras, L. A. Sánchez-González, R. Ortega-Álvarez y R. Calderón-Parra. 2019. Aves de México: Lista actualizada de especies y nombres comunes. CONABIO, México D.F.
- Berlanga, H., J. A. Kennedy, T. D. Rich, M. C. Arizmendi, C. J. Beardmore, P. J. Blancher, G. S. Butcher, A. R. Couturier, A. A. Dayer, D. W. Demarest, W. E. Easton, M. Gustafson, E. Iñigo-Elias, E. A. Krebs, A. O. Panjabi, V. Rodríguez Contreras, K. V. Rosenberg, J. M. Ruth, E.



- Santana Castellón, R. Ma. Vidal, T. Will. 2010. Saving Our Shared Birds: Partners in Flight Tri-National Vision for Landbird Conservation. Cornell Lab of Ornithology: Ithaca, NY.
- Chao, A., R. L. Chazdon, R. K. Colwell y T. Shen. 2005. Un nuevo método estadístico para la evaluación de la similitud en la composición de especies con datos de incidencia y abundancia. pp. 85-96. En: G. Halffter, J. Sobe-rón, P. Koleff y A. Melic. (eds.). *Sobre diversidad biológica: el significado de las diversidades alfa, beta y gamma*. Monografías Tercer Milenio. Zaragoza, España.
- Chávez-León, G. 2007. Riqueza de aves del parque nacional Barranca del Cupatitzio, Michoacán, México. *Acta Zoológica Mexicana* 23(2):11-29.
- Check-list of North American Birds (online). American Ornithological Society. 1998. <http://checklist.aou.org/taxa> (Accesada en Julio de 2019).
- Chesser, R. T., S. M. Billerman, K. J. Burns, C. Cicero, J. L. Dunn, A. W. Kratter, I. J. Lovette, N. A. Mason, P. C. Rasmussen, J. V. Remsen, Jr., D. F. Stotz, K. Winker. 2020. Sixty-first supplement to the American Ornithological Society's Check-list of North American Birds. *The Auk Ornithological Advances* Vol. 137: 1-24.
- Colwell, R. K. 2013. Statistical estimation of species richness and shared species for samples (Estimates v 9.1.0). University of Connecticut, USA.
- CONABIO. 2009. Capital natural de México, vol. II : Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México
- CONANP. 2014. Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Gobierno de México.
- Cornejo-Tenorio, G., E. Sánchez-García, M. Flores-Tolentino, F. J. Santana-Michel y G. Ibarra-Manríquez. 2013. Flora y vegetación del cerro El Águila, Michoacán, México. *Botanical Sciences* 91 (2): 155-180.
- Cortés-Flores, J., G. Cornejo-Tenorio y G. Ibarra-Manríquez. 2011. Fenología reproductiva de las especies arbóreas de un bosque neotropical. *Interciencia* 36 (8): 608-613.
- De Graff, R.M., N. G. Tilghman., y S. H. Anderson. 1985. Foraging Guilds of North American Birds. *Environmental Management* Vol. 9, No. 6. Pp 493-536.
- Fowler, J., L. Cohen y P. Jarvis. 1998. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons. 259 pp.
- Galicia, E., E. Torres-Irineo y E. Gasca-Leyva. 2018. Economic value of Caribbean Flamingo (*Phoenicopterus ruber*) at Celestun Biosphere Reserve, Yucatan, Mexico: A birdwatching tourism approach. *Ornitología Neotropical* 29: 135-141.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. México. 217 pp.
- García-Peña, I.N. 2009. Aves residentes de la microcuenca del río Chiquito, municipio de Morelia: riqueza, estacionalidad, distribución y conservación. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 247 pp.
- Guarduño-Monroy, V.H., N. Giordano, J.A., Ávila-Olivera, V.M., Hernández-Madrugal, A., Sámano-Nateras y J.E., Díaz-Salmerón. 2014. Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. pp. 197-222. En Vieyra, A. y A. Larrazabal (eds.) *Urbanización, Sociedad y Ambiente*. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Gobierno de Michoacán 2023. Periódico Oficial, No. 91, Tomo CLXXII. Jueves 11 de Mayo de 2023. Decreto por el que se declara Área natural protegida en la categoría de Reserva estatal y subcategoría de Reserva de captación y recarga de mantos acuíferos al lugar conocido como "Cerro del Águila", ubicado en los municipios de Morelia y Lagunillas, Michoacán de Ocampo.
- Gobierno de Michoacán 2023. Periódico Oficial, No. 51, Tomo CLXXII. Jueves 16 de Marzo de 2023. Estudio técnico justificativo del área natural protegida con el carácter de Reserva estatal, con la subcategoría de Reserva de captación y recarga de mantos acuíferos, Cerro del Águila.
- González-García, F. y H. Gómez de Silva. 2002. Especies endémicas: riqueza, patrones de distribución y retos para su conservación. pp. 150-194. En: Gómez de Silva, H. y A. Oliveras de Ita. (eds.) *Conservación de aves: experiencias en México*. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, National Fish and Wildlife Foundation. México.
- González Kuk, G. M. y R. A. Muñoz-Márquez Trujillo 2022. El ecoturismo como estrategia de conservación de un paisaje transformado en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. xxii, núm. 68,

- 2022, 1-21. DOI: <http://dx.doi.org/10.22136/est20221719>
- Grant, E. C., T. E. Martin, D. R. Petit., L. J. Petit., D. F. Bradford. 2000. Bird Communities and Habitat as Ecological Indicators of Forest Condition in Regional Monitoring. *Conservation Biology*, Volume 14, No. 2. Pages 544–558.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST. Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica* 4 (1): 9pp.
- Howell, S.N. y S. Webb. 1995. A guide to the birds of Mexico and northern Central America. Oxford University Press. 851 pp.
- Hutto, R. L., S. M. Pletschet y P. Hendricks. 1986. A fixed-radius point count method for nonbreeding and breeding season use. *The Auk* (103): 593-602.
- Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN). 2018. Programa Municipal de Gestión de Riesgos y Ordenamiento Territorial de Morelia 2018. H. Ayuntamiento de Morelia.
- INEGI . 2007. Carta fisiográfica del estado de Michoacán. Escala 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Lázaro-García, M. M. 1996. Las especies de aves residentes en dos tipos de hábitat en el Cerro Punhuato, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Levins, R., 1968. Evolution in changing environments. Princeton Univ. Press. Princeton.
- López-González, A. S. 2005. Diagnóstico de la fauna silvestre como contribución al ordenamiento ecológico territorial del Ejido de Atécuaro, Municipio de Morelia, Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 57 pp.
- Magurran, A. E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. 179 pp.
- Marín-Togo, M. C. y A. Blanco-García. 2009. Ficha informativa de los humedales de Ramsar (FIR) Versión 2009-2012: La Mintzita. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). México. 14pp.
- Mekonen, S. 2017. Birds as Biodiversity and Environmental Indicator. *Journal of Natural Sciences Research*. Vol.7, No.21, 2017. ISSN 2225-0921 (Online)
- Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. MyT-Manuales y Tesis SEA. Zaragoza, España. 84 pp.
- Navarro-Sigüenza, A. G., M. F. Rebón-Gallardo, A. Gordillo-Martínez, A. Townsend Peterson, H. Berlanga-García y L. A. Sánchez-González. 2014. Biodiversidad de aves en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 476-495.
- National Geographic. 2011. Field Guide to the birds of North America. Seventh Edition. Geographic Society. Washington D.C. 480 pp.
- NOM-059-ECOL-2010. Norma Oficial Mexicana que determina la protección ambiental de especies nativas de México de flora y fauna silvestres, categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio y lista de especies en riesgo. 2010. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Pérez-Cossío, V. 1995. Análisis comparativo de la abundancia y distribución vertical de la avifauna residente en matorral subtropical y plantación de eucalipto del Cerro Punhuato, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Pimentel-Belmares, G., L.E. Villaseñor-Gómez y Y. Arzate-Alcázar. 2017. Inventarios biológicos y ciencia ciudadana: Avifauna de la zona sujeta a preservación ecológica Piedra del Indio, Morelia, Michoacán. Memoria del XV Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C. Morelia, Michoacán, México. pp. 86.
- Ralph, C. J., G. R. Geupel, P. Pyle, T. E. Martin, D. F. DeSante y B. Milá. 1996. Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Pacific Southwest Research Station Albandi, California. EUA. 46 pp.
- Raya Lemus. 2017. Áreas de conservación voluntaria: Esquemas alternativos en la conservación de tierras forestales en Michoacán. MSc tesis. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 240 p.
- Salas Correa, A.D. y Mancera-Rodríguez, N. J. 2020. Aves como indicadoras ecológicas de etapas sucesionales en un bosque secundario, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68 (1), 23-39.
- Sibley, D.A. 2000. The Sibley guide to birds. National Audubon Society. New York. 545 pp.
- Soto-Rojas, O. 2005. Avifauna de la presa de la Mintzita, municipio de Morelia, Michoacán, México. Tesis de li-



- cenciatura. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 65 pp.
- Villarreal H., M. Álvarez, S. Córdoba, F. Escobar, G. Fagua, F. Gast, H. Mendoza, M. Ospina y A.M. Umaña. 2004. Métodos para el análisis de datos: una aplicación para resultados provenientes de caracterizaciones de biodiversidad. pp. 185-226. En: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (ed.). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Panamericana Formas e Impresos S.A. Bogotá, Colombia.
- Villaseñor-Gómez, L. E. 2005. Biodiversidad: Aves. pp. 101-103. En Villaseñor G., L. E. (ed.) *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Villaseñor-Gómez, L. E. 2013. Informe del monitoreo de aves en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Convenio No. CONANP/PROMOBI/RBMM/001/2013.
- Villaseñor-Gómez J.F., y Villaseñor Gómez L.E. 2018. Avifauna del Volcán Parícutín: Perspectiva histórica y conocimiento actual. *Ciencia Nicolaita* 74. Pp. 185-208. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Villaseñor-Gómez, L.E., F.R. Pineda-Huerta y J. Salgado-Ortiz. 2017. Inventario de la avifauna de las áreas naturales protegidas estatales en el Municipio de Morelia, Michoacán. *Memorias del XV Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México*. Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C. Morelia, Michoacán, México. pp. 61.
- Zacarías-Eslava, L.E., G. Cornejo-Tenorio, J. Cortés-Flores, N. González-Castañeda y G. Ibarra-Manríquez. 2011. Composición, estructura y diversidad del cerro El Águila, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 854-869.

Anexo I. Listado taxonómico de aves del área natural protegida Cerro del Águila, Municipio de Morelia y Lagunillas, Michoacán. El listado sigue el orden taxonómico propuesto por la AOS (1998) y suplementos hasta el 2021. Los superíndices en los títulos de columnas describen como sigue:

- 1 Propuesta de nombres comunes estandarizada de Berlaga-García *et al.* (2019).
- 2 Categorías establecidas por Howell y Webb (1995): **RP**, residente permanente; **RV**, residente de verano; **VI**, visitante de invierno, **MT**, migrante transitorio.
- 3 De acuerdo a DeGraff *et al.* (1985): **Carn**, carnívoro; **Fru**, frugívoro; **Gran**, granívoro; **Ins**, insectívoro; **Omn**, omnívoro; **Nec**, nectarívoro.
- 4 Propuesta de González-García y Gómez de Silva (2002): **EN**, endémico; **SE**, semi endémico; **CE**, cuasi endémico.
- 5 Con base en la NOM-059-SEMARNAT-2010: **Pr**, sujeta a protección especial; **A**, amenazada; **P**, en peligro de extinción; **E**, probablemente extinta en el medio silvestre.
- 6 Tipo de vegetación dónde se registró cada especie. **BPE**, bosque de pino encino, **BE**, bosque de encino, **MS**, matorral subtropical.
- 7 Abundancia relativa por tipo de vegetación: **C**, común, **MC**, medianamente común, **NC**, no común, **R**, rara.

Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷
Anseriformes	Anatidae	<i>Spatula discors</i>	Cerceta alas azules	VI	Omn			BE	R
		<i>Spatula clypeata</i>	Pato cucharón norteño	VI	Omn			BE	R
Galliformes	Odontophoridae	<i>Cyrtonyx montezumae</i>	Codorniz de Moctezuma	RP	Omn		Pr	BPE	NC
Columbiformes	Columbidae	<i>Columba livia</i>	Paloma doméstica	RP	Omn	Ex		MS	NC
		<i>Patagioenas fasciata</i>	Paloma de collar	RP	Fru			BPE	NC
		<i>Streptopelia decaocto</i>	Paloma turca	RP	Gran	Ex		MS	NC
		<i>Columbina inca</i>	Tórtola cola larga	RP	Gran			MS	MC
		<i>Columbina passerina</i>	Tortolita pico rojo	RP	Gran			BE/MS	R/R
		<i>Leptotila verreauxi</i>	Paloma arroyera	RP	Gran			BPE/BE/MS	R/NC/NC
		<i>Zenaida asiatica</i>	Paloma alas blancas	RP	Gran			BE/MS	NC/NC
		<i>Zenaida macroura</i>	Paloma huilota	RP	Gran			BPE/BE/MS	R/NC/NC
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Garrapatero pijuy	RP	Ins			MS	NC
		<i>Geococcyx velox</i>	Correcaminos tropical	RP	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Geococcyx californianus</i>	Correcaminos norteño	RP	Ins			MS	R
Caprimulgiformes	Caprimulgidae	<i>Chordeiles acutipennis</i>	Chotacabras menor	RP	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Anrostomus arizonae</i>	Tapacaminos cuerporryúin Mexicano	RP	Ins			BPE/BE	MC/NC
Apodiformes	Apodidae	<i>Aeronautes saxatalis</i>	Vencejo pecho blanco	RP	Ins			BE/MS	NC/NC
	Trochilidae	<i>Colibri thalassinus</i>	Colibrí oreja violeta	RP	Nec			BPE	MC
		<i>Eugenes fulgens</i>	Colibrí magnífico	RP	Nec			BE/MS	NC/R
		<i>Lampornis clemenciae</i>	Colibrí garganta azul	RP	Nec	SE		BE	R
		<i>Calothorax lucifer</i>	Colibrí lucifer	RV	Nec	SE		BE	R
		<i>Selasphorus rufus</i>	Zumbador rufo	VI	Nec			BPE/BE/MS	R/MC/R
		<i>Selasphorus platycercus</i>	Zumbador cola ancha	RP	Nec	SE		BPE/BE/MS	MC/MC/R
<i>Cyananthus latirostris</i>	Colibrí pico ancho	RP	Nec	SE		BE/MS	NC/NC		



Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷
		<i>Basilinna leucotis</i>	Zafiro oreja blanca	RP	Nec			BPE/BE	C/NC
		<i>Ramosomyia violiceps</i>	Colibrí corona violeta	RP	Nec	SE		BE/MS	NC/NC
		<i>Saucerottia beryllina</i>	Colibrí berilo	RP	Nec			BPE/BE/MS	R/NC/MC
Charadriiformes	Charadriidae	<i>Charadrius vociferus</i>	Chorlo tildío	RP	Ins			BE/MS	R/NC
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Egretta thula</i>	Garza dedos dorados	RP	Carn			MS	R/R
		<i>Bubulcus ibis</i>	Garza ganadera	RP	Ins			BE/MS	NC/MC
		<i>Plegadis chihi</i>	Ibis ojos rojos	RP	Omn			MS	R
Cathartiformes	Cathartidae	<i>Coragyps atratus</i>	Zopilote común	RP	Carn			BE/MS	MC/MC
		<i>Cathartes aura</i>	Zopilote aura	RP	Carn			BPE/BE/MS	MC/MC/MC
Accipitriformes	Accipitridae	<i>Elanus leucurus</i>	Milano cola blanca	RP	Carn			BE/MS	R/NC
		<i>Circus hudsonius</i>	Gavilán rastrero	VI	Carn			MS	NC
		<i>Accipiter striatus</i>	Gavilán pecho rufo	RP	Carn		Pr	BPE/BE	R/NC
		<i>Accipiter cooperii</i>	Gavilán de cooper	VI	Carn		Pr	BPE	R
		<i>Geranoaetus albicaudatus</i>	Aguililla cola blanca	RP	Carn		Pr	BE/MS	NC/NC
		<i>Buteo jamaicensis</i>	Aguililla cola-roja	RP	Carn			BPE/BE/MS	NC/MC/MC
Strigiformes	Tytonidae	<i>Tyto alba</i>	Lechuza de campanario	RP	Carn			MS	NC
	Strigidae	<i>Megascops trichopsis</i>	Tecolote rítmico	RP	Ins			BPE/BE	MC/NC
		<i>Megascops kennicottii</i>	Tecolote occidental	RP	Ins			BPE/BE	NC/MC
		<i>Bubo virginianus</i>	Búho cornudo	RP	Carn			BPE/BE	NC/NC
		<i>Glaucidium gnoma</i>	Tecolote serrano	RP	Ins			BPE/BE	R/R
		<i>Aegolius acadicus</i>	Tecolote oyamelero norteño	RP	Carn			BPE/BE	R/R
Trogoniformes	Trogonidae	<i>Trogon elegans</i>	Trogón elegante	RP	Omn			BPE/BE	NC/R
		<i>Trogon mexicanus</i>	Trogón mexicano	RP	Ins			BPE/BE	NC/R
Piciformes	Picidae	<i>Melanerpes formicivorus</i>	Carpintero bellotero	RP	Ins			BPE/BE/MS	MC/C/R
		<i>Melanerpes aurifrons</i>	Carpintero cheje	RP	Ins			BE/MS	NC/MC
		<i>Sphyrapicus varius</i>	Chupasavia maculado	VI	Ins			BPE/BE/MS	NC/R/R
		<i>Dryobates scalaris</i>	Carpintero mexicano	RP	Ins			BPE/BE/MS	NC/NC/NC
		<i>Dryobates villosus</i>	Carpintero veloso mayor	RP	Ins			BPE	R
		<i>Colaptes auratus</i>	Carpintero de pechera	RP	Ins			BPE/BE	NC/R
Falconiformes	Falconidae	<i>Caracara cheriway</i>	Caracara quebrantahuesos	RP	Carn			MS	R
		<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo americano	RP	Carn			BE/MS	MC/MC
Passeriformes	Tityridae	<i>Pachyramphus aglaiae</i>	Mosquero-cabezón degollado	RP	Ins			BPE/BE	R/R

Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷
	Tyrannidae	<i>Camptostoma imberbe</i>	Mosquero lampiño	RP	Ins			BE/MS	R/NC
		<i>Myiopagis viridicata</i>	Elenia verdosa	RP	Ins			BPE/BE/MS	R/R/R
		<i>Myiarchus tuberculifer</i>	Papamoscas triste	RP	Ins			BPE/BE/MS	NC/MC/NC
		<i>Myiarchus cinerascens</i>	Papamoscas cenizo	VI	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Myiarchus nuttingi</i>	Papamoscas de nutting	RP	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Tyrannus vociferans</i>	Tirano gritón	RP	Fru	SE		BPE/BE/MS	NC/C/MC
		<i>Mitrephanes phaeocercus</i>	Mosquero copetón	RP	Ins			BPE/BE	MC/R
		<i>Contopus cooperi</i>	Pibí boreal	MT	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Contopus pertinax</i>	Pibí tengofrío	RP	Ins			BPE/BE	MC/NC
		<i>Contopus sordidulus</i>	Pibí occidental	RV	Ins			BE/MS	NC/R
		<i>Empidonax albigularis</i>	Papamoscas garganta blanca	VI	Ins			BE	R
		<i>Empidonax minimus</i>	Mosquero mínimo	VI	Ins			BPE/BE/MS	R/R/R
		<i>Empidonax hammondi</i>	Mosquero de hammond	MT	Ins			BPE/BE	NC/R
		<i>Empidonax oberholseri</i>	Mosquero oscuro	VI	Ins	SE		BPE/BE/MS	NC/R/R
		<i>Empidonax affinis</i>	Mosquero pinero	RP	Ins	CE		BPE/BE	NC
		<i>Empidonax occidentalis</i>	Mosquero barranqueño	RP	Ins	SE		BPE/BE/MS	MC/R/R
		<i>Empidonax fulvifrons</i>	Mosquero pecho leonado	RP	Ins			BPE/BE	R/R
		<i>Sayornis nigricans</i>	Papamoscas negro	RP	Ins			MS	NC
		<i>Sayornis saya</i>	Papamoscas llanero	VI	Ins			BE/MS	R/R
		<i>Pyrocephalus rubinus</i>	Mosquero cardenal	RP	Ins			BE/MS	NC/MC
	Furnariidae	<i>Lepidocolaptes leucogaster</i>	Trepatroncos escarchado	RP	Ins	E		BPE/BE	MC/R
	Vireonidae	<i>Vireolanius melitophrys</i>	Vireón arlequín	RP	Omn	CE		BPE	NC
		<i>Vireo hypochryseus</i>	Vireo Amarillo	RP	Ins	E		BPE	R
		<i>Vireo huttoni</i>	Vireo reyezuelo	RP	Ins			BPE/BE	MC/R
		<i>Vireo cassinii</i>	Vireo de cassin	VI	Ins	SE		BPE/BE/MS	NC/NC/R
		<i>Vireo plumbeus</i>	Vireo plumizo	VI	Ins			BPE	NC
		<i>Vireo gilvus</i>	Vireo gorjeador	RP	Ins			BPE/BE/MS	NC/MC/R
	Laniidae	<i>Lanius ludovicianus</i>	Alcaudón verdugo	RP	Carn			BE/MS	NC/MC
	Corvidae	<i>Cyanocitta stelleri</i>	Chara crestada	RP	Omn			BPE/BE	R/R
		<i>Aphelocoma ultramarina</i>	Chara pecho gris	RP	Omn	E		BPE/BE	C/MC
		<i>Corvus corax</i>	Cuervo común	RP	Omn			BPE/BE/MS	MC/MC/MC
	Paridae	<i>Poecile sclateri</i>	Carbonero mexicano	RP	Ins	CE		BE	NC
		<i>Baeolophus wollweberi</i>	Carbonero embridado	RP	Ins			BE	R

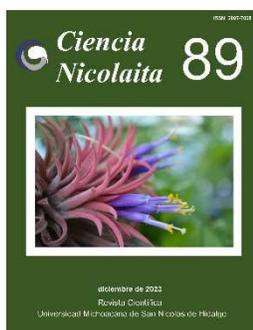


Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷
	Hirundinidae	<i>Tachycineta thalassina</i>	Golondrina verdemar	VI	Ins			BE	MC
		<i>Stelgidopteryx serripennis</i>	Golondrina alas aserradas	RP	Ins			BPE/BE/MS	R/NC/NC
		<i>Hirundo rustica</i>	Golondrina tijereta	RV	Ins			BE/MS	C/C
		<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	Golondrina risquera	RV	Ins			BE/MS	MC/MC
	Aegithalidae	<i>Psaltriparus minimus</i>	Sastrecillo	RP	Ins			BPE/BE/MS	R/MC/MC
	Regulidae	<i>Cortilio calendula</i>	Reyezuelo de rojo	VI	Ins			BPE/BE/MS	C/MC/R
	Bombycillidae	<i>Bombycilla cedrorum</i>	Chinito	VI	Fru			BE/MS	NC/NC
	Ptiliogonatidae	<i>Ptiliogonys cinereus</i>	Capulinerio gris	RP	Ins	CE		BE/MS	MC/NC
	Sittidae	<i>Sitta carolinensis</i>	Sita pecho blanco	RP	Gran			BPE/BE	C/R
	Certhiidae	<i>Certhia americana</i>	Trepador americano	RP	Ins			BPE/BE	NC/R
	Poliptilidae	<i>Poliptila caerulea</i>	Perlita azul-gris	VI	Ins			BE/MS	R/R
	Troglodytidae	<i>Catherpes mexicanus</i>	Chivirín barranqueño	RP	Ins			MS	R
		<i>Campylorhynchus gularis</i>	Matraca serrana	RP	Ins	E		BPE/BE/MS	NC/NC/MC
		<i>Thryomanes bewickii</i>	Chivirín cola oscura	RP	Ins			BE/MS	NC/NC
		<i>Troglodytes aedon</i>	Chivirín saltapared	RP	Ins	CE		BPE/BE/MS	MC/MC/R
	Mimidae	<i>Melanotis caerulescens</i>	Mulato azul	RP	Omn	E		BPE/BE/MS	NC/MC/MC
		<i>Toxostoma curvirostre</i>	Cuitlacoche pico curvo	RP	Omn			BE/MS	NC/MC
		<i>Mimus polyglottos</i>	Centzontle norteño	RP	Omn			BE/MS	R/NC
	Turdidae	<i>Sialia sialis</i>	Azulejo garganta canela	RP	Ins			BE/MS	MC/NC
		<i>Myadestes occidentalis</i>	Clarín jilguero	RP	Ins		Pr	BPE/BE/MS	MC/NC/R
		<i>Catharus aurantiirostris</i>	Zorzal pico naranja	RP	Ins			BPE/BE/MS	NC/R/R
		<i>Catharus occidentalis</i>	Zorzal mexicano	RP	Ins	E		BPE/BE/MS	NC/R/R
		<i>Catharus ustulatus</i>	Zorzal de swainson	MT	Omn			BPE/BE	R/R
		<i>Catharus guttatus</i>	Zorzal cola canela	VI	Ins			MS	R
		<i>Turdus assimilis</i>	Mirlo garganta blanca	RP	Ins			BPE/BE	NC/R
		<i>Turdus rufopalliatu</i>	Mirlo dorso rufo	RP	Ins	CE		BPE/BE/MS	R/NC/NC
		<i>Turdus migratorius</i>	Mirlo primavera	RP	Ins			BPE/BE	NC/NC
		<i>Ridgwayia pinicola</i>	Mirlo pinto	RP	Ins	E	Pr	BPE	R
	Peucedramidae	<i>Peucedramus taeniatus</i>	Ocotero enmascarado	RP	Ins			BPE/BE	MC/R
	Passeridae	<i>Passer domesticus</i>	Gorrión Casero	RP	Gran	Ex		MS	R
	Fringillidae	<i>Chlorophonia elegantissima</i>	Eufonia capucha azul	RP	Fru			BE/MS	MC/NC
		<i>Coccothraustes abeillei</i>	Picogrueso encapuchado	RP	Gran	CE		BPE	R

Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷
		<i>Haemorhous mexicanus</i>	Pinzón mexicano	RP	Omn			BE/MS	C/C
		<i>Spinus notatus</i>	Jilguero encapuchado	RP	Omn			BPE/BE	NC/R
		<i>Spinus psaltria</i>	Jilguero dominico	RP	Gran			BPE/BE/MS	R/MC/MC
	Passerellidae	<i>Peucaea botterii</i>	Zacatonero de botteri	RP	Omn			BE/MS	NC/NC
		<i>Ammodramus savannarum</i>	Gorrión chapulín	VI	Omn			MS	NC
		<i>Chondestes grammacus</i>	Gorrión arlequín	VI	Omn			MS	MC
		<i>Spizella passerina</i>	Gorrión ceja blanca	RP	Omn			BE/MS	C/C
		<i>Spizella pallida</i>	Gorrión pálido	VI	Omn	SE		BE/MS	NC/NC
		<i>Spizella atrogularis</i>	Gorrión barba negra	RP	Omn			BE/MS	R/NC
		<i>Junco phaeonotus</i>	Junco ojo de lumbre	RP	Omn	CE		BPE/BE	MC/NC
		<i>Oriturus superciliosus</i>	Zacatonero rayado	RP	Omn	E		BE	C
		<i>Pooecetes gramineus</i>	Gorrión cola blanca	VI	Omn			BE/MS	NC/NC
		<i>Passerculus sandwichensis</i>	Gorrión sabanero	VI	Omn			BE/MS	NC/R
		<i>Melospiza lincolni</i>	Gorrión de lincoln	VI	Omn			BE/MS	MC/NC
		<i>Melospiza kieneri</i>	Rascador nuca canela	RP	Omn	E		BE/MS	R/R
		<i>Melospiza fusca</i>	Toquí pardo	RP	Omn			BE/MS	NC/MC
		<i>Aimophila rufescens</i>	Zacatonero rojizo	RP	Omn			BE/MS	NC/MC
		<i>Aimophila ruficeps</i>	Zacatonero corona rufa	RP	Omn			BE/MS	NC/NC
		<i>Pipilo maculatus</i>	Rascador moteado	RP	Omn			BPE/BE	C/NC
		<i>Atlapetes pileatus</i>	Atlapetes gorra rufa	RP	Gran	E		BPE/BE	NC/R
	Icteriidae	<i>Icteria virens</i>	Buscabreña	VI	Omn			BE/MS	NC/NC
	Icteridae	<i>Sturnella liliana</i>	Pradero tortilla-conchile	RP	Ins			MS	NC
		<i>Icterus wagleri</i>	Bolsero de wagler	RP	Omn			BE/MS	NC/NC
		<i>Icterus spurius</i>	Bolsero castaño	VI	Ins			MS	R
		<i>Icterus cucullatus</i>	Calandria dorso negro menor	VI	Omn	SE		BE/MS	R/NC
		<i>Icterus pustulatus</i>	Bolsero dorso rayado	RP	Omn			BE/MS	R/NC
		<i>Icterus bullockii</i>	Bolsero calandria	RP	Omn	SE		BPE/BE/MS	NC/NC/R
		<i>Icterus abeillei</i>	Bolsero dorsioscuro	RP	Omn	E		BE	NC
		<i>Icterus parisorum</i>	Bolsero tunero	RP	Omn	SE		BE/MS	NC/NC
		<i>Molothrus aeneus</i>	Tordo ojo rojo	RP	Omn			BPE/BE/MS	R/NC/MC
		<i>Molothrus ater</i>	Tordo cabeza café	RP	Omn			BPE/BE/MS	R/R/R
		<i>Quiscalus mexicanus</i>	Zanate mexicano	RP	Omn			MS	MC



Orden	Familia	Nombre científico	Nombre común ¹	Ocurrencia estacional ²	Gremio alimentario ³	Endemismo ⁴	Categoría de riesgo ⁵	Tipo de vegetación ⁶	Abundancia relativa ⁷	
	Parulidae	<i>Seiurus aurocapilla</i>	Chipe suelero	VI	Ins			BPE/BE/MS	R/R/R	
		<i>Mniotilta varia</i>	Chipe trepador	VI	Ins			BPE/BE	NC/NC	
		<i>Oreothlypis superciliosa</i>	Parula ceja blanca	RP	Ins			BPE/BE	NC/NC	
		<i>Leiothlypis celata</i>	Chipe corona naranja	VI	Ins			BPE/BE/MS	NC/R/R	
		<i>Leiothlypis ruficapilla</i>	Chipe cabeza gris	VI	Ins			BPE/BE	MC/MC	
		<i>Geothlypis poliocephala</i>	Mascarita pico grueso	RP	Ins			BE/MS	R/R	
		<i>Geothlypis tolmiei</i>	Chipe de tolmie	VI	Ins			A BPE/BE	NC/R	
		<i>Setophaga petechia</i>	Chipe amarillo	VI	Ins			BE	NC	
		<i>Setophaga coronata</i>	Chipe coronado	VI	Ins			BPE/BE/MS	NC/MC/MC	
		<i>Setophaga graciae</i>	Chipe ceja amarilla	RP	Ins			BPE/BE/MS	NC/R/R	
		<i>Setophaga nigrescens</i>	Chipe negro-gris	VI	Ins		SE	BE/MS	MC/MC	
		<i>Setophaga townsendi</i>	Chipe negro-amarillo	VI	Ins			BPE/BE/MS	MC/R/R	
		<i>Setophaga occidentalis</i>	Chipe cabeza amarilla	VI	Omn			BPE/BE/MS	NC/R/R	
		<i>Basileuterus rufifrons</i>	Chipe Gorra Rufa	RP	Ins		CE	BPE/BE/MS	NC/NC/R	
		<i>Basileuterus belli</i>	Chipe Ceja Dorada	RP	Ins			BPE	R	
		<i>Cardellina pusilla</i>	Chipe Corona Negra	VI	Ins			BPE/BE	MC/MC	
		<i>Cardellina rubrifrons</i>	Chipe Cara Roja	VI	Ins		SE	BPE/BE	NC/R	
		<i>Cardellina rubra</i>	Chipe Rojo	RP	Ins		E	BPE/BE	NC/R	
		<i>Myioborus pictus</i>	Chipe Ala Blanca	RP	Ins			BPE/BE	NC/R	
		<i>Myioborus miniatus</i>	Chipe de Montaña	RP	Ins			BPE/BE	MC/NC	
		Cardinalidae	<i>Piranga flava</i>	Tángara Encinera	RP	Ins			BPE/BE/MS	MC/NC/R
			<i>Piranga rubra</i>	Tángara Roja	VI	Ins			BPE/BE/MS	R/NC/R
			<i>Piranga ludoviciana</i>	Tángara Capucha Roja	VI	Omn			BE/MS	NC/R
	<i>Pheucticus melanocephalus</i>		Picogordo Tigrillo	RP	Omn		SE	BPE/BE	NC/NC	
	<i>Passerina caerulea</i>		Picogordo Azul	RP	Omn			BE/MS	NC/MC	
	<i>Passerina cyanea</i>		Colorín azul	VI	Gran			BE/MS	NC/MC	
	<i>Passerina versicolor</i>		Colorín morado	RP	Gran			BE/MS	NC/NC	
	Thraupidae	<i>Volatinia jacarina</i>	Semillero Brincador	RP	Gran			MS	NC	
		<i>Sporophila torqueola</i>	Semillero de Collar	RP	Gran			MS	MC	



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estado y tendencias sobre la investigación de un humedal al occidente de México

Status and trends on the investigation of a wetland in western Mexico

Esperanza Fuentes-Gutiérrez*, Roberto Lindig-Cisneros y Martina Medina-Nava

Para citar este artículo: Fuentes-Gutiérrez Esperanza*, Lindig-Cisneros Roberto y Medina-Nava Martina, 2023. Estado y tendencias sobre la investigación de un humedal al occidente de México. Ciencia Nicolaita no. 89, 92-113. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.711>



Historial del artículo:

Recibido: 24 de marzo de 2023
Aceptado: 30 de mayo de 2023
Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: esperanzafuentes.gu@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Estado y tendencias sobre la investigación de un humedal al occidente de México

Status and trends on the investigation of a wetland in western Mexico

Esperanza Fuentes-Gutiérrez^{1*}, Roberto Lindig-Cisneros¹ y Martina Medina-Nava²

¹Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701-No. 8701, IIES-UNAM, 58190, Morelia, Michoacán.

²Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Gral. Francisco J. Múgica S/N A-1, Felicitas de Río, 58030 Morelia, Michoacán.

Resumen

La evaluación de ecosistemas a mediano y largo plazo es indispensable para su manejo y restauración, siendo particularmente importante para aquellos que aportan servicios clave como los humedales. En este trabajo, se revisaron los resultados y tendencias de la investigación de un sitio de enorme importancia para el estado de Michoacán, el manantial de “La Mintzita”, que, entre otras funciones ecosistémicas, aportó cerca del 40% del agua de Morelia en el período de 1995 a 2022, mediante una recopilación de información a partir de 66 documentos. Los resultados revelaron cinco temáticas, en las que se pueden dividir los documentos encontrados: fauna, vegetación, hidrología, y aspectos sociales y normativos. Las temáticas mejor documentadas se relacionan con la vegetación y la fauna, en particular la ictiofauna, mientras que otros grupos de animales han sido poco evaluados. El establecer cómo se ha llevado a cabo la investigación en este ecosistema, nos permite identificar áreas de oportunidad, al igual que sus necesidades, para un mejor manejo socioambiental.

Palabras clave: Revisión bibliográfica, revisión bibliométrica, socio-ecosistema, sistema acuático, manantial, biodiversidad.

Abstract

The medium and long-term assessment of ecosystems is essential for their management and restoration, being particularly important for those that provide key ecosystem services such as wetlands. The results and trends of the investigation of one of the most important wetlands for the state of Michoacán, the Mintzita spring, which among other ecosystem functions contributes about 40% of Morelia's water, for the period 1995-2022, were reviewed. Data was collected from 66 documents. The results revealed that there are five themes into which the found documents can be

divided: fauna, vegetation, hydrology, social aspects and official normative documents. The most documented aspects are related to the vegetation and fauna, particularly the ichthyofauna, while other animal groups have received little evaluation. Being able to establish how research has been carried out in this ecosystem makes it possible to identify areas of opportunity, as well as needs for better management of ecosystems that are of great socio-environmental importance.

Keywords: bibliographical review, bibliometric review, socio.ecosystem, aquatic system, spring, biodiversity.

Introducción

Los humedales representan uno de los ecosistemas más importantes del mundo, por sus diversas funciones y la biodiversidad que albergan, pero también están entre los más amenazados. Estos desempeñan un papel insustituible en la regulación del clima mundial, el mantenimiento del ciclo hidrológico, la protección de la diversidad y la salvaguardia del bienestar humano (Hu *et al.*, 2017). Los humedales no solo brindan servicios indirectos a los seres humanos, sino también recursos de alto valor agregado (Costanza *et al.*, 1997; Smardon, 2009).

En la Ciudad de Morelia, Michoacán, existe un sistema de manantiales denominado “La Mintzita”. Este humedal ha llamado la atención de académicos desde hace más de 20 años. Ubicado a una altitud de 1950 m.s.n.m., con las coordenadas geográficas: Latitud, 19°38’43” N; Longitud 101°17’00” O (INEGI, 1998), es relevante para todo el estado, principalmente porque distribuye cerca del 40% del agua que se consume en el Valle de Guayangareo. Desde el año 2005, “La Mintzita” es considerada Área Natural Protegida con el carácter de zona sujeta a preservación ecológica, y como sitio Ramsar desde el año 2009.

Hasta el momento, no existe un documento que considere todos los estudios académicos que se han llevado a cabo en el humedal, por lo que resulta pertinente realizar análisis bibliográficos-bibliométricos con información actualizada. Los análisis bibliográficos funcionan como una herramienta de trabajo que favorece una fácil y rápida búsqueda de referencias de un tema o sitio específico, mientras que los análisis bibliométricos permiten explorar y analizar grandes volúmenes de datos científicos, desentrañando los matices evolutivos de un campo específico y arrojando luz sobre las áreas emergentes (Donthu *et al.*, 2021; Ortega y Paracuellos, 2003). La información que resulta

de ambos análisis es de ayuda tanto para científicos como para gestores, para definir líneas de investigación y manejo, y así alcanzar una mejor comprensión del ámbito de trabajo.

En este artículo se expone el estado actual del humedal “La Mintzita”. A lo largo de los años, se han realizado numerosos proyectos de investigación, incluyendo tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Las temáticas de dichos documentos han sido diversas, entre ellas destacan las relacionadas con fauna, vegetación, hidrología, y aspectos sociales y normativos. En el periodo del año 1995 al año 2022, ya que antes del año 1995 no se encontró registro alguno, se pudieron obtener 66 documentos relacionados con el humedal (**Anexo 1**). Con los datos obtenidos del análisis bibliográfico-bibliométrico, se realizó una estimación de la diversidad de especies vegetales y animales que coexisten. Este análisis permite reconocer necesidades y perspectivas a futuro, y realizar recomendaciones puntuales para el manejo de los humedales.

Metodología

Se realizó una búsqueda en los repositorios de información Scopus®, Redalyc®, Google Scholar® y Web of Science®, y en repositorios universitarios como Tesiunam, Colmex y Biblioteca Virtual Umich. El método que se usó para la búsqueda de los documentos, fue mediante el uso de la palabra clave “Mintzita”, se descartaron todos aquellos documentos que, aunque mencionan la palabra, no estaban directamente relacionados o no presentaban datos sobre el humedal. Los criterios que se usaron para seleccionar los documentos fueron: (1) que se hablara de “La Mintzita”, (2) que tuviera al menos un apartado exclusivo del humedal, y (3). que su sitio de estudio fuera este, o bien, que la información que proporcionara fuera relevante

para el manejo o entendimiento de los procesos socio-ambientales. Se seleccionaron todos los documentos que presentaban datos originales hasta octubre del 2022 y se clasificaron, según su contenido, en cinco temáticas principales; vegetación, fauna, hidrología, y aspectos sociales y normativos, incluyendo artículos, tesis, libros y programas.

El análisis de los datos recopilados consideró las siguientes variables para cada una de las referencias encontradas: (1) año de publicación, referido como el año en el que aparece publicado el trabajo; y (2) ámbito temático; como vegetación, fauna, hidrología, aspectos sociales y normativos. Se graficó el número promedio de estudios por año, encontrado para cada una de las temáticas tratadas, así como la relación entre el año y el número de estudios encontrados. De igual forma, se obtuvo el porcentaje de documentos publicados por temática, al igual que el porcentaje de documentos publicados por año y temática, con la finalidad de realizar un análisis bibliométrico más detallado. En tercer lugar, se realizó un análisis de la diversidad de especies animales y vegetales con los datos que se encontraron en los artículos, de tal manera que, el grupo de fauna se dividió en los subgrupos peces, aves, mamíferos y anfibios y reptiles. Para el subgrupo de peces se graficó la diversidad que ha habido en el humedal a lo largo de los años, y se tomaron los datos más precisos para la realización de la gráfica. Para los subgrupos de aves, mamíferos, anfibios, reptiles, y plantas, no fue posible hacer un análisis de este

tipo, debido a que no existen datos suficientes o porque existen publicaciones recientes sobre el tema (Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros, 2023; Rodríguez-Arias y Gómez-Romero, 2018). Finalmente, se analizaron los documentos encontrados de las temáticas de vegetación y fauna, y se graficó el número de especies que se han registrado en el humedal desde el año 2004 al 2021.

Resultados

Las temáticas más estudiadas son las de fauna (22 documentos) y vegetación (18 documentos), seguidas de aspectos sociales (12 documentos) e hidrología (10 documentos), en tanto que la menos abordada, tiene que ver con aspectos normativos (5 documentos). Los resultados se muestran con el número promedio de estudios por año, para cada una de las temáticas (**Figura 1**). Es de resaltar que, el trabajo académico dentro del humedal comenzó en el año 1995, sin embargo, no fue hasta inicios del año 2000 que la investigación científica tuvo un desarrollo considerable, que perdura hasta hoy en día (**Figura 2**). De igual forma, se obtuvo el porcentaje de documentos publicados por temática, y el porcentaje de documentos publicados por año y temática (**Tablas 1 y 2**).

Fauna

Respecto a la fauna, los peces han sido el grupo más estudiado, todos los documentos encontrados

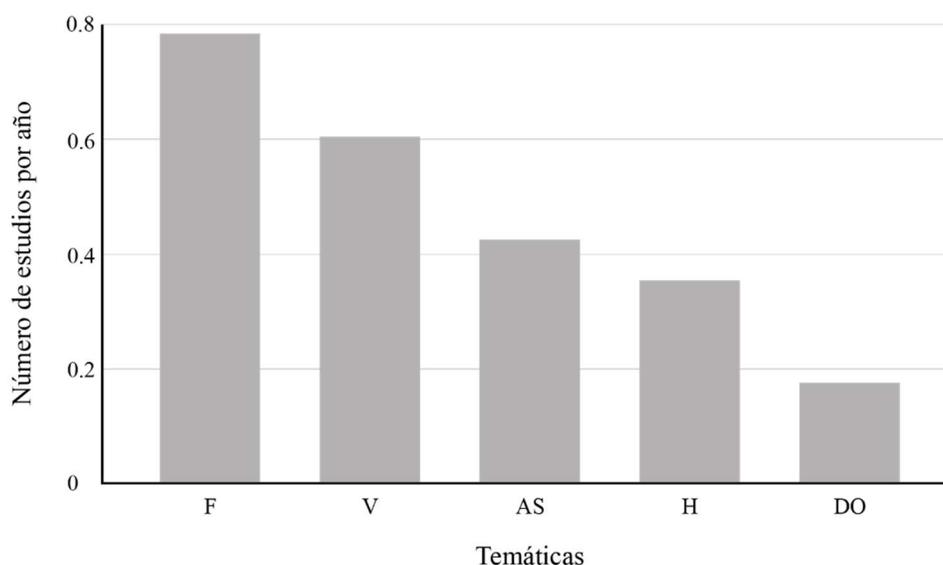


Figura 1. Gráfica comparativa entre el número promedio de estudios por año encontrado para cada una de las temáticas tratadas en el humedal “La Mintzita”. Temáticas: F, fauna; V, vegetación; AS, aspectos sociales; H, hidrología; DO, documentos oficiales.

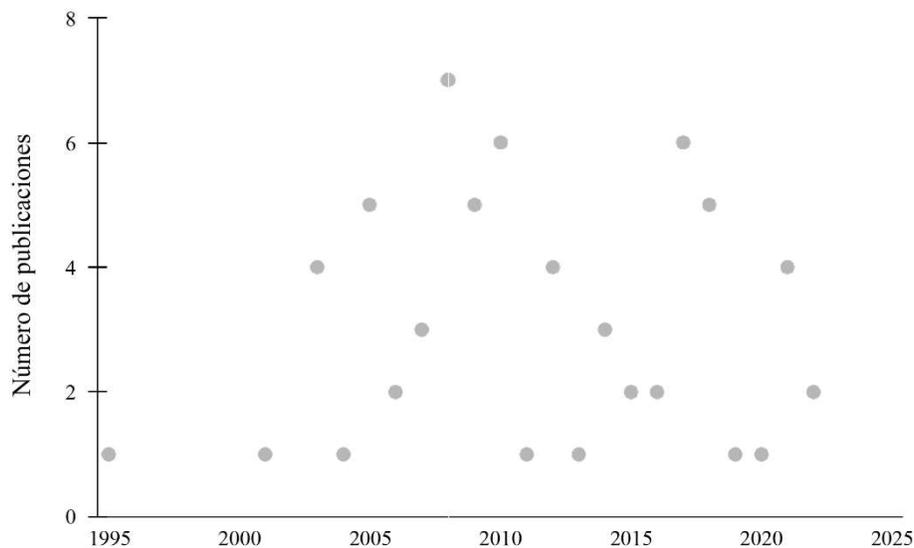


Figura 2. Relación entre el año y el número de estudios encontrados sobre “La Mintzita”.

corresponden a este grupo salvo seis: uno de la avifauna (Soto-Rojas y Gómez, 2005), uno de tolerancia térmica de *Hetaerina americana*, el caballito escarlata común (Isarrarás-Hernández, 2020), uno sobre la descripción de nuevas especies de *Caecidotea* (García-Vázquez *et al.*, 2021), dos de la ecología poblacional de *Kinosternon hirtipes murrayi*, la tortuga pecho que-

brado o pata rugosa (Enríquez-Mercado, 2017; Enríquez-Mercado *et al.*, 2018) y uno donde se documenta la diversidad de mamíferos, anfibios y reptiles (Bahena-Fraga, 2010).

Los peces de “La Mintzita” comenzaron a ser estudiados en el año 2004 y su investigación ha continuado hasta el año 2021. En este periodo se han identificado un total de 18 especies, de las cuales 13 son

Tabla 1

Porcentaje de documentos publicados por temática para cada año. Temáticas: F, fauna; V, vegetación; AS, aspectos sociales; H, hidrología; DO, documentos oficiales.

	1995	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
AS	0	0	0	0	0	0	0	8.3	0	8.3	0	0	0	8.3	8.3	8.3	16.7	8.3	8.3	0	16.7	8.1	100
DO	0	2	0	0	0	20	0	0	0	20	20	0	20	0	0	0	20	0	0	0	0	0	100
F	0	0	13.6	4.5	18.2	4.5	9.1	9.1	9.1	9.1	0	0	0	0	0	0	9.1	4.5	0	4.5	4.5	0	100
H	10	10	10	0	0	10	10	10	0	10	0	0	10	0	0	0	20	0	0	0	0	0	100
V	0	0	0	0	0	0	0	11.8	11.8	5.9	5.9	17.6	0	11.8	5.9	0	0	17.6	0	0	5.9	5.9	100

Tabla 2

Porcentaje de documentos publicados por año y temática. Temáticas: F, fauna; V, vegetación; AS, aspectos sociales; H, hidrología; DO, documentos oficiales.

	1995	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AS	0	0	0	0	0	0	0	16.7	0	16.7	0	0	0	33.3	50	50	33.3	20	100	0	50	50
DO	0	0	0	0	20	0	0	0	20	16.7	0	25	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0
F	0	0	75	100	80	50	66.7	33.3	40	33.3	0	0	0	0	0	0	33.3	20	0	100	25	0
H	100	100	25	0	0	50	33.3	16.7	0	16.7	0	0	100	0	0	0	33.3	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	33.3	40	16.7	100	75	0	66.7	50	0	0	60	0	0	25	50
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

nativas (**Anexo 2**). Las especies más estudiadas corresponden a la familia Goodeidae, seguida de la familia Poeciliidae y Cyprinidae. Los estudios de peces que se han realizado, tienen que ver con la helmintofauna, hábitos alimenticios, análisis comparativos, morfológicos y genéticos, aspectos reproductivos, el impacto humano sobre las poblaciones, estado de conservación, patrones de riqueza-endemismo y biogeografía.

Con los datos recabados de 12 estudios (García-Andrade, 2017; Camacho Cervantes y Lindig Cisneros, 2020; Domínguez-Domínguez *et al.*, 2007, 2008, 2009, 2010; Lara *et al.*, 2006; Lyons, 2004; Martínez-Aquino *et al.*, 2007; Romero-Tejeda *et al.*, 2008; Romero-Tejeda, 2005; Ramsar, 2009), fue posible observar en términos generales el cambio en la diversidad de los peces a lo largo de los años (**Figura 3**).

Respecto a la avifauna del humedal, se identificaron dos documentos (Soto-Rojas y Gómez, 2005; Bahena-Fraga, 2010) teniendo un registro total de 117 especies (**Anexo 3**). Para otros grupos de fauna como mamíferos, anfibios y reptiles, existen comparativamente pocos registros (Enríquez-Mercado, 2017; Enríquez-Mercado *et al.*, 2018; Bahena-Fraga, 2010).

Vegetación

En diecisiete años de estudio, se han registrado un total de 67 especies (**Anexo 4**). Las más estudiadas han sido *Typha domingensis*, seguida de *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* (Rodríguez-Arias y Gómez-Romero, 2018; Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros, 2023). Esto puede estar relacionado con su abundancia dentro del humedal. Una especie no

obligada de humedal que también ha tenido interés científico es *Diospyros xolocotzii* (zapote prieto). Se han escrito un par de documentos de esta especie (SEMARNAT, 2018; Torres y Arizaga, 2014). El tipo de documentos que se encontraron para esta categoría tiene que ver con el manejo de fuegos, restauración ecológica, control poblacional y ensayos de efecto por el cambio en las condiciones ambientales, por mencionar los más importantes.

Fauna y vegetación

Para la caracterización de la diversidad de especies animales y vegetales del humedal, se realizó un aglomerado del número total de especies por grupo en “La Mintzita”. Para el grupo de las aves se consideraron los estudios de Soto-Rojas y Gómez (2005), Bahena-Fraga (2010) y García-Vázquez *et al.* (2021). Para el grupo de vegetación, se tomaron en cuenta los estudios de Rodríguez-Arias y Gómez-Romero (2018) y Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros (2023). Para los grupos de mamíferos, anfibios y reptiles, se usaron los datos de muestreo de Bahena-Fraga (2010), mientras que para el grupo de peces se usaron los estudios de Lyons (2004); Romero-Tejeda (2005); Lara *et al.* (2006); Martínez-Aquino *et al.* (2007); Domínguez-Domínguez *et al.* (2007, 2008, 2009, 2010); Romero-Tejeda *et al.* (2008); Ramsar, 2009; García-Andrade, 2017; Camacho Cervantes y Lindig Cisneros 2020) (**Figura 4**).

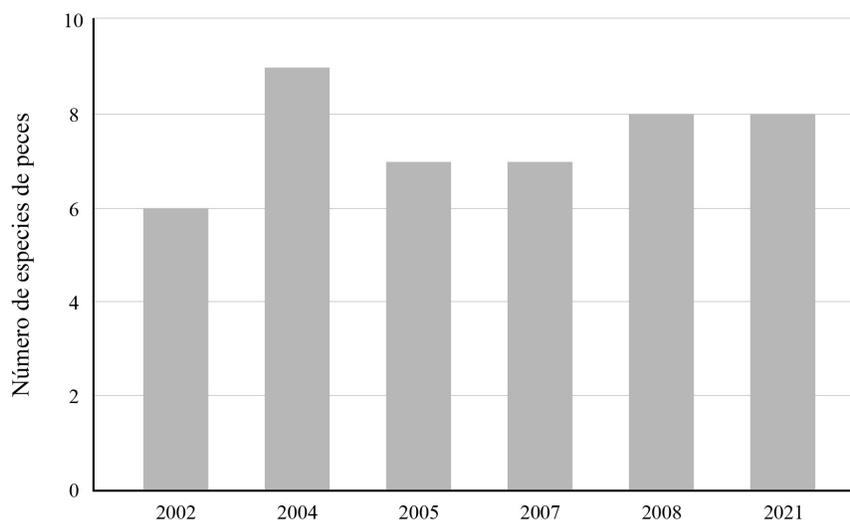


Figura 3. Número de especies de peces registradas por año.

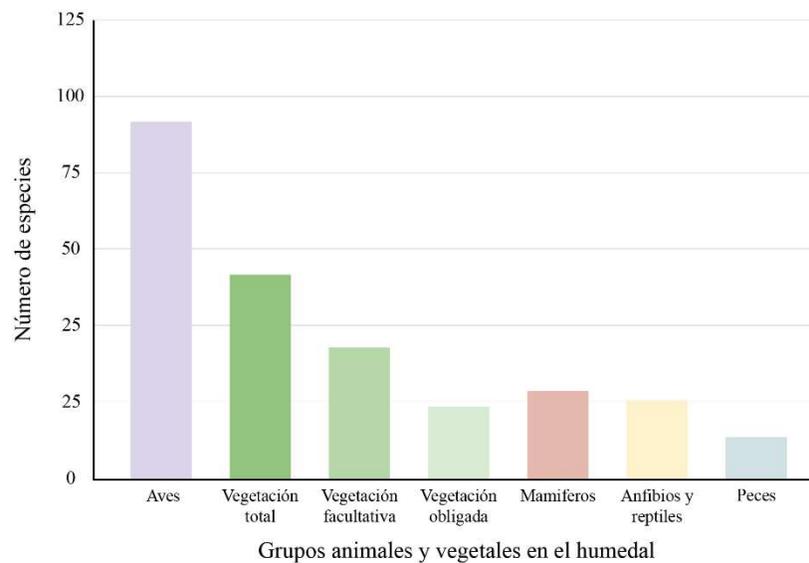


Figura 4. Diversidad de especies para el humedal “La Mintzita” del año 2004 al 2021.

Hidrología

Respecto a la hidrología, se encontraron 10 documentos, la mayoría están relacionados con la calidad del agua e incluyen tesis que documentan información, no solo de “La Mintzita”, sino también de otros sistemas acuáticos, entre los que se abordan temas como la calidad y la vulnerabilidad del agua subterránea (Organista-Mota, 2017; Pedraza-Pérez, 2017), la limnología (Aguirre y Abel, 2008), y actividades económicas relacionadas (Arroyo-Zambrano, 2013).

Aspectos sociales

Se encontraron 12 documentos relacionados con los aspectos sociales, que discuten temas como la gobernanza, la gestión sustentable del territorio, la innovación social y los impactos del crecimiento urbano, construidos de manera transdisciplinaria, trabajando en conjunto con la “Comunidad Ecológica Jardines de La Mintzita”, compuesta por cinco familias y varios individuos con objetivos dirigidos hacia la sustentabilidad del humedal (Orozco-Meléndez y Paneque-Gálvez, 2022).

Documentos oficiales

Se encontraron cuatro documentos oficiales relacionados con el humedal. En el año 2005 se publicó en el Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo el decreto que declara Área Natural Protegida, con el carácter de zona sujeta a preservación ecológica, el lugar conocido como

“Manantial La Mintzita”, y su zona de amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán de Ocampo (Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, 2005). Cuatro años después, en 2009, el Área Natural Protegida “Manantial La Mintzita” es declarada sitio Ramsar, en ese mismo año se publica la ficha que lo avala como tal (Bahena-Fraga, 2010). En el año 2010, se publicó el Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Preservación Ecológica “Manantial La Mintzita” y su Zona de Amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán, avalado por el gobierno estatal y la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático (Ramsar, 2009) y para el año 2016 se publicó en el Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, el resumen del Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Preservación Ecológica “Manantial La Mintzita” y su Zona de Amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán (Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, 2016).

Necesidades y perspectivas

El estudio de “La Mintzita” a lo largo de los últimos veintiocho años, ha generado importantes conocimientos sobre la fauna y la vegetación, principalmente de peces y de especies vegetales, y los temas relacionados con el agua y los aspectos sociales, que han ido cobrando mayor relevancia con el paso de los años.

En cuanto a los estudios de fauna, se requiere una actualización sobre la avifauna de “La Mintzita”, que podría servir como un indicador del estado actual del ecosistema. Las aves son indicadores efectivos porque responden a los cambios de hábitat, debido a sus vínculos con taxones que responden a perturbaciones en pequeña y gran escala (Mekonen, 2017), excelentes bioindicadores de la salud de la biodiversidad, así como de un hábitat en particular y su productividad, también son importantes en el seguimiento de los cambios ambientales (Mekonen, 2017). De igual manera, sería pertinente integrar la investigación con el estudio de otras poblaciones de animales.

Por otra parte, el monitoreo de la calidad del agua del humedal, debe llevarse a cabo de manera continua, sobre todo, para determinar los niveles de coliformes, ya que se considera que el cuerpo de agua avanza hacia un proceso eutrófico (Murillo y Villanueva, 2007). Se recomienda continuar con el monitoreo de peces y vegetación para obtener información que permita conocer las condiciones ambientales precisas, así como el manejo de especies introducidas, potencialmente invasoras.

Este documento busca promover el avance de investigaciones del tipo social, que relacione a la “Comunidad Ecológica Jardines de La Mintzita” con el medio ecosistémico, y que, además de involucrar a los beneficiarios del agua de abastecimiento que llega a Morelia, posibilite un programa sustentable de manejo enfocado a su restauración ecológica (Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros, 2023). Además, es importante considerar la investigación sobre los procesos de desarrollo y sostenibilidad urbana, como una valiosa área. Se debe enfatizar la necesidad de intensificar los esfuerzos de divulgación científica, para que el conocimiento generado pueda ser aprovechado por la sociedad, permitiendo así alcanzar el impacto deseado y beneficiar a la comunidad en general. Es necesario llevar a cabo estudios que integren los conocimientos previamente adquiridos, con el objetivo de abordar de manera transdisciplinaria los desafíos que se enfrentan, ya que, “La Mintzita” es, sin duda, un laboratorio vivo, que ofrece la oportunidad de investigar las dinámicas de los ecosistemas de humedales y la conservación de especies nativas. La gran cantidad de especies endémicas y los niveles significativos de biodiversidad aquí presentes, representan un tesoro que debe ser preservado para las generaciones

futuras, no obstante, esta tarea se vuelve especialmente difícil debido a la fragilidad del ecosistema.

La presión ejercida por la población en términos de uso del agua, ya sea para consumo humano, actividades agrícolas u otros fines, es extremadamente elevada. La degradación ecológica que experimenta “La Mintzita” conlleva la pérdida de múltiples servicios ecosistémicos, por lo que es fundamental tomar medidas para frenar este deterioro y evitar su destrucción, ya que estos servicios son vitales para el bienestar de la comunidad y el equilibrio del entorno natural.

Referencias

- Arroyo-Zambrano, T. I. (2013). Economic and carbon management benefits of rainwater harvesting in México. Tesis de Maestría, *Universidad de Glasgow*. Reino Unido.
- Bahena-Fraga, A. (2010). Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Preservación Ecológica “Manantial La Mintzita” y su Zona de Amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán. https://www.iies.unam.mx/laboratorios/restauracion-ambiental/wp-content/uploads/2022/10/programa_manejo.pdf.
- Bucio-Mendoza, S., Solís-Navarrete, J. Paneque-Gálvez, J. (2019). Innovación social y sustentabilidad: El caso de la Comunidad Ecológica Jardines de la Mintzita, Michoacán. En Guadarrama-Atrizco, V., Calderón-García, R. y Nava- Preciado, J. (Eds) *Innovación social: Desarrollo teórico y experiencias en México*. (pp. 79- 92). Grupo Editorial Proceso.
- Camacho-Cervantes, M., Lindig-Cisneros, R. A. (2020). Elaboración de guía de identificación de peces vivíparos y taller virtual de colecta de datos de biodiversidad dulceacuícola para fortalecer los programas de enseñanza de ecología. <http://innovacioneducativa.unam.mx:8080/jspui/handle/123456789/7225>.
- Costanza, R., d’Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O’Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., van den Belt, M. (1997). The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630), 253–260.
- Domínguez-Domínguez, O., Boto, L., Alda, F., Pérez-Ponce De León, G., Doadrio, I. (2007). Human impacts on drainages of the Mesa Central, Mexico, and its genetic

- effects on an endangered fish, *Zoogoneticus quitzeoensis*. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 21(1), 168-180.
- Domínguez-Domínguez, O., Pedraza-Lara, C., Gurrola-Sánchez, N., Pérez-Rodríguez, R., Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Doadrio, I., Pérez-Ponce de León, G., Brooks, D. R. (2010). "Historical biogeography of the Goodeinae (Cyprinodontiforms)". Uribe-Aranzabal, M. C. y H. Grier. *Viviparous fishes II*. Florida, New Life Publications 2010, 19- 61. ISBN: 0-9645058-9-1.
- Domínguez-Domínguez, O., Pérez-Rodríguez, R., Doadrio, I. (2008). Morphological and genetic comparative analyses of populations of *Zoogoneticus quitzeoensis* (Cyprinodontiformes: Goodeidae) from Central Mexico, with description of a new species. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79(2), 373–383.
- Domínguez-Domínguez, O., Pérez-Rodríguez, R., Escalera-Vázquez, L. H., Doadrio, I. (2009). Two new species of the genus *Notropis* Rafinesque, 1817 (Actinopterygii, Cyprinidae) from the Lerma River Basin in Central Mexico. *Hidrobiológica*, 19(2), 159–172.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.
- Enríquez-Mercado, I. (2017). Ecología Poblacional de *Kinosternon integrum* y *Kinosternon hirtipes murrayi* en el estado de Michoacán. Tesis de Licenciatura, *Bene mérita Universidad de Puebla*.
- Enríquez-Mercado, I., Montiel-Ugalde, A., Aparicio, Á., Gaona-Murillo, E., Butterfield, T., Macip-Ríos, R. (2018). Population ecology and home range of the Mexican Rough-footed Mud Turtle (*Kinosternon hirtipes murrayi*) in Central Mexico. *Acta Herpetologica*, 13(2), 109–115.
- Fuentes-Gutiérrez, E., Lindig-Cisneros, R. (2023). Biocultural, Productive, and Ecocentric Restoration in La Mintzita Spring-fed Wetland, Michoacán, México. *Ecological Restoration*, 41(1), 44-54. <https://doi.org/10.3368/er.41.1.44>
- García-Andrade, B. (2017). Patrones de riqueza, endemismo y diversidad beta para la conservación de las especies y linajes de peces del centro de México. Tesis de Maestría, *Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México.
- García-Vázquez, L., Pedraza-Lara, C., Rodríguez-Almaraz, G. (2021). Six new epigeal species of Caecidotea/ (Isopoda: Asellidae) distributed along the Trans-Mexican Volcanic Belt in Central México. *Zootaxa*, 4965(1), zootaxa.4965.1.2.
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L., Zhang, H. (2017). Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *The Science of the Total Environment*, 586, 319–327.
- INEGI. 1998. Carta Topográfica. Morelia, E14-1. Escala 1:250,000. Michoacán, México.
- Isarrarás-Hernández, L. (2020). Efecto de la temperatura ambiental en los rangos de tolerancia térmica de *Hetaerina americana* (Odonata: Calopterygidae). Tesis de Maestría, *Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México.
- Lara, J. O. A., Medina-Nava, M., Rojas, T. Z. (2006). Hábitos alimentarios de dos especies de peces vivíparos de la Mintzita. Cuenca Lerma-Chapala Michoacán, México. *Biológicas: Revista de La Des Ciencias Biológico Agropecuarias Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 8(1), 47–60.
- Lyons, J. (2004). Goodeid Status Update, January 2004. Nanfa.org. <http://www.nanfa.org/ac/goodeid-status-2004.pdf>
- Martínez-Aquino, A., Aguilar-Aguilar, R., del Conde-Juárez, H. O. S. A., Contreras-Medina, R. (2007). Empleo de herramientas panbiogeográficas para detectar áreas para conservar: Un ejemplo con taxones dulceacuícolas. Biodiversidad de La Faja Volcánica Transmexicana. *Las Prensas de Ciencias, UNAM, México, DF*, 449–460.
- Mekonen, S. (2017). Birds as biodiversity and environmental indicator. *Indicator* 7(21). <https://core.ac.uk/download/pdf/234657570.pdf>
- Murillo, M. D. R. O., Villanueva, R. A., Sánchez, I. M., Ojeda, M. A., Heredia, J. D. S. (2007). Estado trófico de la presa la Mintzita, Morelia, Michoacán, con base en la abundancia y distribución del fitoplancton. *Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 9(1), 105-114.
- Organista- Mota, R. (2017). Estudio de calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública en la región Capula-Cointzio. Tesis de maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México.
- Orozco-Meléndez, J. F., Paneque-Gálvez, J. (2022). A role for grassroots innovation toward agroecological transitions in the Global South? Evidence from Mexico. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics*, 201, 107582.



- Ortega, M., Paracuellos, M. (2003). Bibliografía y bibliometría relacionadas con los humedales almerienses (Sudeste Ibérico). *Ecología, Manejo y Conservación de Los Humedales*, 199–220.
- Pedraza- Pérez, A. C. (2017). Vulnerabilidad del agua subterránea al poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (2005) Decreto que declara Área Natural Protegida, con el carácter de zona sujeta a preservación ecológica, el lugar conocido como “Manantial, la Mintzita”, y su zona de amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán de Ocampo.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (2016) Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Preservación Ecológica “Manantial La Mintzita” y su Zona de Amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán.
- Ramsar (2009) Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) – Versión 2009-2012
- SEMARNAT, 2018. Programa de Acción para la Conservación de la Especie Zapote Prieto, (*Diospyros xolocotzii*), SEMARNAT/ CONANP, México (Año de edición 2018).
- Rodríguez-Arias, C., Gómez-Romero, M., Páramo-Pérez, M. E., y Lindig-Cisneros, R. (2018). Ten-year study of vegetation dynamics in wetlands subject to human disturbance in Western Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 910-920.
- Romero-Tejeda, M. D. L. L., García-Prieto, L., Garrido-Olivera, L., y Pérez-Ponce de León, G. (2008). Estimation of the endohelminth parasite species richness in freshwater fishes from La Mintzita reservoir, Michoacán, Mexico. *Journal of Parasitology*, 94(1), 288-292.
- Smardon, R. (2009). *Sustaining the World’s Wetlands*. Springer New York.
- Soto-Rojas, O., Gómez, L. E. V. (2005). Avifauna de la presa La Mintzita, municipio de Morelia, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, México.
- Romero-Tejeda, M. L. (2005) Helminthofauna de algunas especies de peces de la Presa La Mintzita, Michoacán. Tesis de Licenciatura, *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México*. México.
- Torres, I., y Arizaga, S. (2014). Nota sobre nuevas localidades de poblaciones silvestres del Zapote prieto (*Diospyros xolocotzii*, Ebenaceae), especie amenazada del occidente de México. *Acta Botánica Mexicana*, 1(107), 19–26.
- Vázquez- Aguirre, A. A. (2008). Limnología de cuatro sistemas acuáticos de la subcuenca de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. México.

ANEXOS

Anexo 1.

Bibliografía científico-técnica relacionada con el humedal de “La Mintzita”. Organizada en las temáticas: fauna, vegetación, hidrología, aspectos sociales y documentos oficiales.

Fauna
Domínguez-Domínguez, O., Boto, L., Alda, F., Pérez-Ponce, G., & Doadrio, I. (2005). Human impacts on drainages of the Mesa Central, Mexico, and its genetic effects on an endangered fish, <i>Zoogoneticus quitzeoensis</i> . <i>Conservation Biology</i> , 21(1), 168-180.
Domínguez-Domínguez, O., Pedraza-Lara, C., Gurrola-Sánchez, N., Pérez-Rodríguez, R., Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Doadrio, I., Pérez-Ponce de León, G., & Brooks, D. R. (2010). “Historical biogeography of the Goodeinae (Cyprinodontiforms)”. Uribe-Aranzabal, M. C. H. Grier. <i>Viviparous fishes II</i> . Florida, New life publications 2010, 19- 61. ISBN: 0-9645058-9-1.
Domínguez-Domínguez, O., Pérez-Rodríguez, R., & Doadrio, I. (2008). Morphological and genetic comparative analyses of populations of <i>Zoogoneticus quitzeoensis</i> (Cyprinodontiformes: Goodeidae) from Central Mexico, with description of a new species. <i>Revista Mexicana de Biodiversidad</i> , 79(2), 373-383.
Domínguez-Domínguez, O., Pérez-Rodríguez, R., Escalera-Vázquez, L. H., & Doadrio, I. (2009). Two new species of the genus <i>Notropis</i> Rafinesque, 1817 (Actinopterygii, Cyprinidae) from the Lerma River Basin in Central Mexico. <i>Hidrobiológica</i> , 19(2), 159-172.
Enríquez-Mercado, I., Montiel-Ugalde, A., Aparicio, Á., Gaona-Murillo, E., Butterfield, T., & Macip-Ríos, R. (2018). Population ecology and home range of the Mexican Rough-footed Mud Turtle (<i>Kinosternon hirtipes murrayi</i>) in Central Mexico. <i>Acta Herpetológica</i> , 13(2), 109-115.
Enríquez-Mercado, I. (2017). Ecología Poblacional de <i>Kinosternon integrum</i> y <i>Kinosternon hirtipes murrayi</i> en el estado de Michoacán. Tesis de licenciatura, <i>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</i> . México.
Galván Quesada, S. (2009). Efecto de factores ambientales en el crecimiento y la sobrevivencia de <i>Skiffia lermae</i> (pisces: goodeidae) mediante experimentación multifactorial. Tesis de Maestría, <i>Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
García-Andrade, B. (2017). Patrones de riqueza, endemismo y diversidad beta para la conservación de las especies y linajes de peces del centro de México. Tesis de maestría, <i>Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
García-Vázquez, L., Pedraza-Lara, C., & Rodríguez-Almaraz, G. (2021). Six new epigeal species of Caecidotea/(Isopoda: Asellidae) distributed along the Trans-Mexican Volcanic Belt in Central Mexico. <i>Zootaxa</i> , 4965(1), zootaxa-4965.
Isarrarás-Hernández, L. (2020). Efecto de la temperatura ambiental en los rangos de tolerancia térmica de <i>Hetaerina americana</i> (Odonata: Calopterygidae). Tesis de maestría, <i>Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Lara, J. O. A., Nava, M. M., & Rojas, T. Z. (2006). Hábitos alimentarios de dos especies de peces vivíparos de La Mintzita. Cuenca Lerma-Chapala Michoacán, México. <i>Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias</i> , 8(1), 47-60.
De la Vega-Salazar, D., & Marina, Y. (2005). Estado de conservación de los peces de la familia Goodeidae (Cyprinodontiformes) en la mesa central de México. <i>Revista de Biología Tropical</i> , 54(1), 163-177.
Lyons, J. Goodeid Status Update, American currents January 2004. Vol. 30, No. 2 (11-19)



Martínez-Aquino, A., Aguilar-Aguilar, R., del Conde-Juárez, H. & Contreras-Medina, R. (2007). Empleo de herramientas panbiogeográficas para detectar áreas para conservar: Un ejemplo con taxones dulceacuícolas. Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. <i>Las prensas de Ciencias, UNAM, México, DF</i> , 449-460.
Medina, N. M., Zubieta, R. T. & Ramírez, H. J. P. 2003. Estructura de la comunidad de peces de La Mintzita, Morelia, Michoacán, Cuenca Lerma-Chapala. <i>Biológicas</i> 5:19-29
Ramírez-Herrejón, J. P. R., Nava, M. M., Tinoco, C. I. S., & Zubieta, T. L. (2007). Algunos aspectos reproductivos de <i>Zoogoneticus quitzeoensis</i> ; Hubbs and Turner (1939) (Osteichthyes-Goodeidae) en la represa La Mintzita Morelia, Michoacán, México. <i>Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> , 9(1), 63-71
Romero-Tejeda, M. D. L. L., García-Prieto, L., Garrido-Olvera, L., & Pérez-Ponce de León, G. (2008). Estimation of the endohelminth parasite species richness in freshwater fishes from La Mintzita reservoir, Michoacán, México. <i>Journal of Parasitology</i> , 94(1), 288-292.
Romero-Tejeda, M.L. (2005) Helminthofauna de algunas especies de peces de la Presa La Mintzita, Michoacán. Tesis de Licenciatura, <i>Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México</i> . México.
Rubio, N.V.M. 2003. Ecología Reproductiva de <i>Skiffia lermæ</i> (Meek, 1902) (Osteichthyes: Goodeidae) de La Mintzita del Municipio de Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México
Salazar, T.C.I. 2003. Ecología reproductiva de <i>Xenotoca variata</i> (Osteichthyes: Goodeidae) en la Presa La Mintzita, Municipio de Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Salazar-Tinoco, C. I., Medina-Nava, M., & Ramírez-Herrejón, J. P. (2010). Reproductive biology of the subfamily Goodeinae in la Mintzita dam, Morelia, Michoacán, México. <i>Viviparous fishes</i> . New Life Publications, Homestead FL, USA, 459-462.
Soto-Rojas, O. 2005. Avifauna de la presa La Mintzita, municipio de Morelia, Michoacán, México. Tesis de licenciatura, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Vegetación
Del Val, E., Pacheco, A. L., & Lindig-Cisneros, R. (2012). Mecanismos de persistencia de <i>Phragmites australis</i> en el manantial de La Mintzita. <i>Biológicas</i> , 14, 18-22.
Fuentes-Gutiérrez, E., & Lindig-Cisneros, R. (2023). Biocultural, Productive, and Ecocentric Restoration in La Mintzita Spring-fed Wetland, Michoacán, México. <i>Ecological Restoration</i> , 41(1), 44-54.
Escutia-Lara, Y., Barrera, E. D. L., Martínez-de la Cruz, Y., & Lindig-Cisneros, R. (2010). Respuesta a la adición de nitrógeno y fósforo en el crecimiento de <i>Typha domingensis</i> y <i>Schoenoplectus americanus</i> . <i>Boletín de la Sociedad Botánica de México</i> , (87), 83-87.
Escutia-Lara, Y., Gomez-Romero, M., & Lindig-Cisneros, R. (2009). Nitrogen and phosphorus effect on <i>Typha domingensis</i> Presl. rhizome growth in a matrix of <i>Schoenoplectus americanus</i> (Pers.) Volkart ex Schinz and Keller. <i>Aquatic Botany</i> , 90(1), 74-77.
Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., & Lindig-Cisneros, R. A. (2009). Efecto del fuego y dinámica de las hidrófitas emergentes en el humedal de La Mintzita, Michoacán, México. <i>Revista Mexicana de Biodiversidad</i> , 80(3), 771-778.
Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., Gómez-Romero, M., & Lindig-Cisneros, R. (2012). Common reed (<i>Phragmites australis</i>) harvest as a control method in a Neotropical wetland in Western México. <i>Hidrobiológica</i> , 22(2), 125-131.
Escutia Lara, Y. (2008). Composición y dominancia de especies hidrófitas emergentes y captura de nitrógeno y fósforo en humedales de agua dulce en Michoacán, México.

Escutia Lara, Y. (2011). Interacciones entre especies hidrófitas emergentes enraizadas potencialmente invasoras: efecto de nutrientes y composición. Tesis de doctorado, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Fuentes-Gutiérrez E. y Lindig- Cisneros, R. (2021). Programa de Manejo de <i>Typha</i> spp., para la elaboración de artesanías y la restauración ambiental del manantial La Mintzita. <i>Universidad Nacional Autónoma de México</i> . México.
Gámez, S., & Lindig-Cisneros, R. (2014). Efecto de la profundidad del agua en la germinación de <i>Typha domingensis</i> . <i>Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> , 15(2), 14-18.
Hall, S. J., Lindig-Cisneros, R., & Zedler, J. B. (2008). Does harvesting sustain plant diversity in central Mexican wetlands?. <i>Wetlands</i> , 28(3), 776-792.
López-Arcos, D., Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., & Zedler, P. H. (2012). Fire-mobilized nutrients from hydrophyte leaves favor differentially <i>Typha domingensis</i> seedling growth. <i>Environmental and Experimental Botany</i> , 78, 33-38.
Montejo-Mayo, W., del-Val, E., Gómez-Romero, M., de la Barrera, E., & Lindig-Cisneros, R. (2015). Interacciones entre especies hidrófitas dominantes de humedales del occidente de México mediadas por el fuego y la concentración de nitratos. <i>Polibotánica</i> , (40), 153-161.
Páramo Pérez, M. E., Lindig-Cisneros, R., & Moreno-Casasola, P. (2018). Potencial de invasión de <i>Phragmites australis</i> en comunidades dominadas por especies nativas ante disturbios por fuego en condiciones controladas. <i>Hidrobiológica</i> , 28(2), 201-207.
Rodríguez-Arias, C., Gómez-Romero, M., Páramo-Pérez, M. E., & Lindig-Cisneros, R. (2018). Ten-year study of vegetation dynamics in wetlands subject to human disturbance in Western Mexico. <i>Revista Mexicana de Biodiversidad</i> , 89(3), 910-920.
SEMARNAT, 2018. Programa de Acción para la Conservación de la Especie Zapote Prieto, (<i>Diospyros xolocotzii</i>), SEMARNAT/ CONANP, México (Año de edición 2018).
Torres, I., & Arizaga, S. (2014). Nota sobre nuevas localidades de poblaciones silvestres del Zapote prieto (<i>Diospyros xolocotzii</i> , Ebenaceae), especie amenazada del occidente de México. <i>Acta Botánica Mexicana</i> , (107), 19-26.
Hidrografía
Arroyo-Zambrano, T. I. (2013) Economic and carbon management benefits of rainwater harvesting in Mexico. Tesis de Maestría, <i>Universidad de Glasgow</i> . Reino Unido.
Gómez, M. J. (2003). Evaluación de la calidad del agua con base en los parámetros fisicoquímicos, productividad primaria y análisis bacteriológico de la presa La Mintzita, Municipio de Morelia, Michoacán, México. Tesis de maestría, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Ledesma, F.A. Calidad del agua de la presa La Mintzita, Michoacán. Tesis de Licenciatura, <i>Facultad de Biología (2001) Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Murillo, M. D. R. O., Villanueva, R. A., Sánchez, I. M., Ojeda, M. A., y Heredia, J. D. S. (2007). Estado trófico de la presa La Mintzita, Morelia, Michoacán, con base en la abundancia y distribución del fitoplancton. <i>Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias</i> , 9(1), 105-114.
OOAPAS (2006) Manifestación de impacto ambiental sector "hidráulico" modalidad particular. Planta potabilizadora de La Mintzita en Morelia, Michoacán.
Organista Mota, R. (2017). Estudio de calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública en la región Capula-Cointzio. Tesis de maestría, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Pedraza Pérez, A. C. (2017). Vulnerabilidad del agua subterránea al poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.



Rosalva, F. (1995). Estudio de la calidad del agua en base a bacterias coliformes en la presa La Mintzita y el Río Grande de Morelia. Tesis de Licenciatura, <i>Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> , México.
Vázquez Aguirre, A. A. (2008). Limnología de cuatro sistemas acuáticos de la subcuenca de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Verduzco Cedeño, L. A. (2010). Evaluación de la contaminación al acuífero, en la región Morelia-Capula, causada por el impacto de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de la ciudad de Morelia. Tesis de Maestría, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Aspectos sociales
Ávila Carreón, K. (2018). Gestión sustentable del territorio. El caso de la comunidad ecológica Jardines de La Mintzita en Morelia, Mich. Tesis de Doctorado, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Bucio-Mendoza, S., Solís-Navarrete., J. y Paneque-Gálvez, J. (2019) Innovación social y sustentabilidad: El caso de la Comunidad Ecológica Jardines de la Mintzita, Michoacán. En Guadarrama- Atrizco, V., Calderón-García, R. y Nava- Preciado, J. (Eds) <i>Innovación social: Desarrollo teórico y experiencias en México</i> . (pp. 79- 92). Grupo Editorial Proceso.
Bucio-Mendoza, S., Vieyra, A., Burgos, A. (2017). Impactos del crecimiento urbano e industrial en el sur de Morelia, el caso del territorio de La Mintzita, Michoacán. En Carrasco-Gallegos, B. (Ed), <i>Megaproyectos urbanos y productivos. Impactos socio territoriales</i> . (pp. 144- 155). Universidad Autónoma del Estado de México.
Dosil, J. (2014). Rescatados por la tradición. La construcción del pasado en los procesos de lucha social de tres comunidades michoacanas. <i>En-claves del Pensamiento</i> , 8(16), 123-142.
Huerta Ramírez, G. M. (2021). Gobernanza, preferencias sociales y efectividad de la gestión gubernamental en la "Mintzita". Tesis de Doctorado, <i>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i> . México.
Morales- Magaña, M. (2010). "El agua que no se ve". Regulaciones contingentes en torno a La Mintzita. Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, <i>El Colegio de Michoacán</i> . México.
Morales- Magaña, M. (2015). La Mintzita, de usos múltiples al predominio del agua urbanizada en Morales- Magaña, M. "Flujos de agua y poder. La gestión del agua urbanizada en la ciudad de Morelia, Michoacán". Morelia, Michoacán. Tesis de Doctorado, <i>El Colegio de Michoacán</i> . México.
Orozco-Meléndez, J. F., & Paneque-Gálvez, J. (2022). A role for grassroots innovation toward agroecological transitions in the Global South? Evidence from Mexico. <i>Ecological Economics</i> , 201, 107582.
Paneque-Gálvez, J., Vargas-Ramírez, N., & Morales-Magaña, M. (2016). Uso comunitario de pequeños vehículos aéreos no tripulados (drones) en conflictos ambientales: ¿un factor innovador desequilibrante. <i>Revista Teknokultura</i> , 13(2), 655-679
Rangel-Osornio, V., Fernández-Salegui, A. B., Gómez-Reyes, V. M., Cuevas-Villanueva, R. A., & López-Toledo, L. (2021). Effects of air pollution on chlorophyll content and morphology of lichens transplanted around a paper industry (Morelia, Mexico). <i>The Bryologist</i> , 124(1), 52-67.
Salazar-Solís, V. (2017). El proceso de consolidación de los asentamientos irregulares en el periurbano de Morelia y su problemática urbano- ambiental: el caso de la colonia Comunidad Ecológica Jardines de la Mintzita. Tesis de licenciatura, <i>Universidad Nacional Autónoma de México</i> . México.
Servicio Geológico Mexicano. (2008). Diagnóstico y Valoración de la Vulnerabilidad del Manantial La Mintzita, En Morelia Michoacán. México. 257 páginas.
Documentos oficiales
Bahena-Fraga, A. (2010) Programa de manejo de la zona sujeta a preservación ecológica "Manantial La Mintzita" y su zona de amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán.

CONURBA. (2012). Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Suroeste de Morelia (La Mintzita). http://morelia.gob.mx
Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (2005) Decreto que declara Área Natural Protegida, con el carácter de zona sujeta a preservación ecológica, el lugar conocido como “Manantial la Mintzita”, y su zona de amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán de Ocampo.
Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (2016) Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Preservación Ecológica “Manantial La Mintzita” y su Zona de Amortiguamiento, del Municipio de Morelia, Michoacán.
Ramsar (2009) Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) – Versión 2009-2012

Anexo 2.

Lista de especies de peces. Listado generado a partir de la revisión bibliográfica de todos los documentos de peces de este documento. Las especies en color verde son las especies con registros en los dos últimos años, las especies en color rojo están declaradas extintas dentro del humedal, mientras que las que están en color blanco, no cuentan con registros en los últimos años (Lyons, 2004; Romero-Tejeda, 2005; Lara *et al.*, 2006; Martínez-Aquino *et al.*, 2007; Domínguez-Domínguez *et al.*, 2007, 2008, 2009, 2010; Romero-Tejeda *et al.*, 2008; Ramsar, 2009; García-Andrade, 2017; Camacho Cervantes y Lindig Cisneros, 2020).

Familia	Especie	Hábitat	
Catostomidae	<i>Scartomyzon austrinum</i>	Nativa	
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Exótica	
Cyprinidae	<i>Cyprinus Carpio</i>	Exótica	
	<i>Hybopsis calientis</i>	Nativa	
	<i>Algansea tincella</i>	Nativa	
	<i>Yuriria alta</i>	Nativa	
	<i>Notropis calientis</i>	Nativa	
	Goodeidae	<i>Alloophorus robustus</i>	Nativa
		<i>Goodea atripinnis</i>	Nativa
		<i>Skiffia lermæ</i>	Nativa
		<i>Xenotoca variata</i>	Nativa
		<i>Zoogoneticus quitzeoensis</i>	Nativa
<i>Allotoca dugesii</i>		Nativa	
Poeciliidae	<i>Skiffia bilineata</i>	Nativa	
	<i>Hubbsina turneri</i>	Nativa	
	<i>Poecilia reticulata</i>	Exótica	
	<i>Poeciliopsis infans</i>	Nativa	
	<i>Xiphophorus helleri</i>	Exótica	

**Anexo 3.**

Lista de especies de aves.

(Soto-Rojas y Gómez, 2005; Bahena-Fraga, 2010)

Orden	Familia	Especie	Nombre Común
Anseriformes	Anatidae	<i>Anas discors</i>	Cerceta ala azul
		<i>Anas platyrhynchos</i>	Pato de collar
		<i>Dendrocygna autumnalis</i>	Pijije ala blanca
Apodiformes	Trochilidae	<i>Amazilia beryllina</i>	Colibrí berilo
		<i>Amazilla violiceps</i>	Colibrí corona violeta
		<i>Cyanthus latirostris</i>	Colibrí pico ancho
		<i>Hylocharis leucotis</i>	Colibrí oreja blanca
		<i>Lampornis clemenciae</i>	Colibrí garganta azul
		<i>Selasphorus rufus</i>	Zumbador rufo
Charadriiformes	Jacanidae	<i>Jacana spinosa</i>	Jacana norteña
	Scolopacidae	<i>Actitis macularia</i>	Playero alzacolita
Columbiformes	Columbidae	<i>Columbina inca</i>	Tórtola cola larga
		<i>Leptotila verreauxis</i>	Paloma arroyera
		<i>Zenaida macroura</i>	Paloma huilota
Coraciiformes	Alcedinidae	<i>Ceryle alcyon</i>	Martín pescador norteño
		<i>Chloroceryle americana</i>	Martín pescador verde
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	Garrapatero pijuy
Falconiformes	Accipitridae	<i>Buteo albicaudatus</i>	Aguililla cola blanca
		<i>Buteo jamaicensis</i>	Aguililla cola roja
		<i>Buteo swainsoni</i>	Aguililla de Swainson
		<i>Circus cyaneus</i>	Gavilán rastrero
		<i>Elanus leucurus</i>	Milano cola blanca
	Falconidae	<i>Caracara plancus</i>	Caracara quebrantahuesos
		<i>Falco sparverius</i>	Cernicalo americano
Gruiformes	Rallidae	<i>Gallinula chloropus</i>	Gallineta frente roja
	Rallidae	<i>Porzana carolina</i>	Polluela sora
Passeriformes	Aegithalidae	<i>Psaltriparus minimus</i>	Sastrecillo
	Bombycillidae	<i>Bombycilla cedrorum</i>	Ampelis chinito
	Cardinalidae	<i>Guiraca caerulea</i>	Picogordo azul
		<i>Passerina ciris</i>	Colorín siete colores
		<i>Passerina cyanea</i>	Colorín azul
		<i>Passerina versicolor</i>	Colorín morado
<i>Pheucticus melanocephalus</i>	Picogordo tigrillo		

Orden	Familia	Especie	Nombre Común
	Corvidae	<i>Corvus corax</i>	Cuervo común
	Emberizidae	<i>Melospiza lincolnii</i>	Gorrión de Lincoln
		<i>Melospiza melodia</i>	Gorrión cantor
		<i>Melospiza kieneri</i>	Rascador nuca rufa
		<i>Pipilo fuscus</i>	Toquí pardo
		<i>Spizella pallida</i>	Gorrión pálido
		<i>Spizella passerina</i>	Gorrión ceja blanca
		<i>Sporophila torqueola</i>	Semillero de collar
		<i>Volatinia jacarina</i>	Semillero brincador
	Fringillidae	<i>Carduelis psaltria</i>	Jilguero dominico
		<i>Carpodacus mexicanus</i>	Pinzón mexicano
	Hirundinidae	<i>Hirundo pyrrhonota</i>	Golondrina risquera
		<i>Hirundo Rustica</i>	Golondrina tijereta
	Icteridae	<i>Agelaius phoeniceus</i>	Tordo sargento
		<i>Icterus cucullatus</i>	Bolsero encapuchado
		<i>Icterus galbula</i>	Bolsero de Baltimore
		<i>Icterus pustulatus</i>	Bolsero dorso rayado
		<i>Icterus spurius</i>	Bolsero castaño
		<i>Icterus wagleri</i>	Bolsero de Wagler
		<i>Molothrus aeneus</i>	Tordo ojo rojo
		<i>Quiscalus mexicanus</i>	Zanate mexicano
	Laniidae	<i>Lanius ludovicianus</i>	Alcaudón verdugo
	Mimidae	<i>Melanotis caerulescens</i>	Mulato azul
		<i>Toxostoma curvirostre</i>	Cuitlacoche pico curvo
	Parulidae	<i>Dendroica coronata</i>	Chipe coronado
Passeriformes	Parulidae	<i>Dendroica nigrescens</i>	Chipe negrogris
		<i>Dendroica petechia</i>	Chipe amarillo
		<i>Dendroica townsendi</i>	Chipe negroamarillo
		<i>Geothlypis Poliocephala</i>	Mascarita pico grueso
		<i>Geothlypis trichas</i>	Mascarita común
		<i>Icteria virens</i>	Buscabreña
		<i>Mniotilta varia</i>	Chipe trepador
		<i>Oporornis tolmiei</i>	Chipe de Tolmie
		<i>Vermivora celata</i>	Chipe corona naranja
		<i>Vermivora crissalis</i>	Chipe crisal
		<i>Vermivora ruficapillus</i>	Chipe de coronilla
		<i>Wilsonia pusilla</i>	Chipe corona negra
		Passeridae	<i>Passer domesticus</i>



Orden	Familia	Especie	Nombre Común
	Ptilonotidae	<i>Ptilonotus cinereus</i>	Capulinerito gris
	Parulidae	<i>Regulus calendula</i>	Reyezuelo de rojo
	Sylviidae	<i>Poliophtila caerulea</i>	Perlita azulgris
	Thraupidae	<i>Euphonia elegantissima</i>	Eufonia capucha azul
		<i>Piranga flava</i>	Tángara encinera
		<i>Piranga ludoviciana</i>	Tángara capucha roja
	Troglodytidae	<i>Campylorhynchus Gularis</i>	Matraca serrana
		<i>Catherpes mexicanus</i>	Chivirín barranqueño
		<i>Thryomanes bewickii</i>	Chivirín cola oscura
		<i>Troglodytes aedon</i>	Chivirín saltapared
	Turdidae	<i>Catharus aurantiirostris</i>	Zorzal pico naranja
		<i>Turdus migratorius</i>	Mirlo primavera
		<i>Turdus rufopalliatus</i>	Mirlo dorso rufo
	Tyrannidae	<i>Contopus pertinax</i>	Pibí tengo frío
		<i>Empidonax albigularis</i>	Mosquetero garganta blanca
		<i>Mitrephanes phaeocercus</i>	Mosquero copetón
		<i>Pyrocephalus rubinus</i>	Mosquetero cardenal
		<i>Sayornis nigricans</i>	Papamoscas negro
		<i>Tyrannus vociferans</i>	Tirano gritón
	Vireonidae	<i>Vireo gilvus</i>	Vireo gorjeador de La Laguna
		<i>Vireo solitarius</i>	Vireo anteojo de La Laguna
Piciformes	Picidae	<i>Melanerpes aurifrons</i>	Carpintero cheje
		<i>Picoides scalaris</i>	Carpintero mexicano
Podicipediformes	Ardeidae	<i>Ardea alba</i>	Garza blanca
		<i>Ardea herodias</i>	Garza morena
		<i>Bubulcus ibis</i>	Garza ganadera / garrapatera
		<i>Butorides virescens</i>	Garceta verde
		<i>Egretta caerulea</i>	Garceta azul
		<i>Egretta thula</i>	Garza pie dorado
		<i>Egretta tricolor</i>	Garceta tricolor
		<i>Nycticorax nycticorax</i>	Pedrete corona negra
		<i>Plegadis chihi</i>	Ibis cara blanca
	Cathartidae	<i>Cathartes aura</i>	Zopilote aura
	Podicipedidae	<i>Podilymbus podiceps</i>	Zambullidor picogruoso
		<i>Tachybaptus dominicus</i>	Zambullidor menor
Strigiformes	Strigidae	<i>Bubo virginianus</i>	Búho cornudo

Anexo 4.

Especies de plantas identificadas en “La Mintzita” clasificadas como de hábitat de humedal obligado y humedal facultativo.

Especies	Familia	Hábitat
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	Fabaceae	Facultativa
<i>Acmella repens</i> (Walter) Rich.	Asteraceae	Facultativa
<i>Arenaria paludicola</i> B.L. Robins	Caryophyllaceae	Obligada
<i>Asclepias curassavica</i> L.	Asclepiadaceae	Facultativa
<i>Berula erecta</i> (Huds.) Couille	Apiaceae	Obligada
<i>Bidens aurea</i> (Ait.) Sherff	Asteraceae	Facultativa
<i>Bidens cernua</i> L.	Asteraceae	Obligada
<i>Bromus carinatus</i> Hook. & Arn.	Poaceae	Facultativa
<i>Bromus diandrus</i> Roth	Poaceae	Facultativa
<i>Carex comosa</i> Boott	Cyperaceae	Obligada
<i>Carex longii</i> Mack.	Cyperaceae	Facultativa
<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	Commelinaceae	Facultativa
<i>Cosmos bipinnatus</i> Cav.	Asteraceae	Facultativa
<i>Cosmos sulphureus</i> Cav.	Asteraceae	Facultativa
<i>Cyperus eragrostis</i> Lam.	Cyperaceae	Facultativa
<i>Cyperus niger</i> R. & P.	Cyperaceae	Facultativa

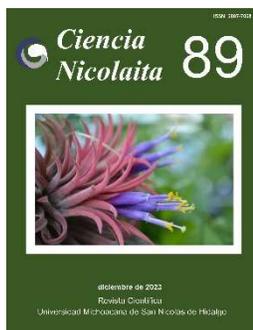


Especies	Familia	Hábitat
<i>Distichlis spicata</i> (L.) Greene.	Poaceae	Facultativa
<i>Eichhornia crassipes</i> (C. Martius) Sol Ms-Laub.	Pontederiaceae	Obligada
<i>Eleocharis densa</i> Benth.	Cyperaceae	Obligada
<i>Eleocharis montevidensis</i> Kunth	Cyperaceae	Facultativa
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	Poaceae	Facultativa
<i>Epilobium ciliatum</i> Raf.	Onagraceae	Facultativa
<i>Erigeron scaberrimus</i> Gardner	Asteraceae	Facultativa
<i>Eupatorium rugosum</i> Houtt.	Asteraceae	Facultativa
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	Poaceae	Facultativa
<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.	Oleaceae	Facultativa
<i>Galium trifidum</i> L.	Rubiaceae	Facultativa
<i>Gnaphalium americanum</i> (P. Mill.) Wedell	Asteraceae	Facultativa
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.	Apiaceae	Obligada
<i>Hydrocotyle verticillata</i> Thunb.	Apiaceae	Obligada
<i>Lemna gibba</i> L.	Lemnaceae	Obligada
<i>Lepidium virginicum</i> L.	Brassicaceae	Facultativa
<i>Lobelia laxiflora</i> Kunth	Campanulaceae	Facultativa
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven	Onagraceae	Obligada

Especies	Familia	Hábitat
<i>Ludwigia peploides</i> (Kunth) P.H. Raven	Onagraceae	Obligada
<i>Lythrum vulneraria</i> L.	Lythraceae	Obligada
<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka	Poaceae	Facultativa
<i>Mimulus glabratus</i> Kunth	Scrophulariaceae	Obligada
<i>Oenothera rosea</i> L'Hér. ex Ait.	Onagraceae	Facultativa
<i>Panicum hallii</i> Vasey	Poaceae	Facultativa
<i>Panicum sucosum</i> Hitch. and Chase	Poaceae	Facultativa
<i>Passiflora subpeltata</i> Ortega	Passifloraceae	Facultativa
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud. (ITIS).	Poaceae	Obligada
<i>Plantago major</i> L.	Plantaginaceae	Facultativa
Poaceae sp.	Poaceae	Facultativa
<i>Polygonum hydropiperoides</i> Michx.	Polygonaceae	Obligada
<i>Polygonum lapathifolium</i> L.	Polygonaceae	Obligada
<i>Polypogon interruptus</i> Kunth	Poaceae	Facultativa
<i>Polypogon monspeliensis</i> (L.) Desf.	Poaceae	Facultativa
<i>Psilactis asteroides</i> A. Gray	Asteraceae	Facultativa
<i>Rorippa palustris</i> (L.) Besser	Brassicaceae	Obligada
<i>Rubus fruticosus</i> L.	Rosaceae	Facultativa



Especies	Familia	Hábitat
<i>Sagittaria latifolia</i> Willd.	Alismataceae	Obligada
<i>Salix bonplandiana</i> Kunth	Salicaceae	Obligada
<i>Schoenoplectus americanus</i> (Pers.) Volkart ex Schinz and Keller	Cyperaceae	Obligada
<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> (C.C. Gmeling) Palla	Cyperaceae	Obligada
<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) M.Kerguelen	Poaceae	Facultativa
<i>Sida rhombifolia</i> L.	Malvaceae	Facultativa
<i>Solanum americanum</i> P. Mill.	Solanaceae	Facultativa
<i>Solidago velutina</i> DC.	Asteraceae	Facultativa
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill.	Asteraceae	Facultativa
<i>Spirodela polyrhiza</i> (L.) Schleid	Lemnaceae	Obligada
<i>Tithonia tubiformis</i> (Jacq.) Cass.	Asteraceae	Facultativa
<i>Tripogandra purpurascens</i> (Schauer) Handlos.	Commelinidae	Obligada
<i>Typha domingensis</i> Presl.	Typhaceae	Obligada
<i>Urochloa maxima</i> (Jacq.) R. Webster	Poaceae	Facultativa
<i>Verbena carolina</i> L.	Verbenaceae	Facultativa



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis termodinámico del proceso de descompresión del gas natural, implementando un tubo vórtex y energía geotérmica

Thermodynamic assessment of a natural gas decompressing process, implementing a vortex tube and geothermal energy

Luis F. Villalón-López, Carlos Rubio-Maya, Víctor M. Ambriz-Díaz

Para citar este artículo: Villalón-López Luis F., Rubio-Maya Carlos, Ambriz-Díaz Víctor M., 2023. Análisis termodinámico del proceso de descompresión del gas natural, implementando un tubo vórtex y energía geotérmica. Ciencia Nicolaita no. 89, 114-127. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.695>



Historial del artículo:

Recibido: 4 de marzo de 2023

Aceptado: 4 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: carlos.maya@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Análisis termodinámico del proceso de descompresión del gas natural, implementando un tubo vórtex y energía geotérmica

Thermodynamic assessment of a natural gas decompressing process, implementing a vortex tube and geothermal energy

Luis F. Villalón-López¹, Carlos Rubio-Maya², Víctor M. Ambriz-Díaz³

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica, Morelia, Michoacán, 1548085E@umich.mx

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica, Morelia, Michoacán, carlos.maya@umich.mx

³Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, victor.ad@chihuahua.tecnm.mx

Resumen

El gas natural comprimido al pasar por el proceso de descompresión para su uso final, sufre un descenso de temperatura asociado al efecto Joule-Thomson. Esta reducción de temperatura provoca una obstrucción en las tuberías del equipo de descompresión, interrumpiendo el suministro continuo. Para evitar el congelamiento, en este trabajo se propone aumentar la temperatura del gas natural utilizando un tubo vórtex y un precalentamiento geotérmico. La viabilidad técnica de la propuesta se determina mediante un análisis termodinámico, simulando el modelo energético con un software de ingeniería. Los resultados muestran un aumento en la eficiencia energética del sistema y un ahorro de hasta una tercera parte de la energía que se utilizaría en un sistema convencional de precalentamiento.

Palabras clave: Efecto Joule-Thomson, Tubo vórtex, energía geotérmica, gas natural, descompresión.

Abstract

As compressed natural gas undergoes a decompression process for its final use, a temperature drop is caused due to the Joule-Thomson effect. This temperature reduction creates an obstruction in the decompression equipment pipes, interrupting the continuous supply. In this work it is proposed to increase the temperature of natural gas using a vortex tube and geothermal preheating to avoid freezing. The technical feasibility of the proposal is determined through a thermodynamic

analysis, simulating the energy model through an engineering software. The results show an increase in the energy efficiency of the system and a reduction of up to one third of the energy that would be used in a conventional preheating system.

Keywords: Joule-Thomson effect, vortex tube, geothermal energy, natural gas, decompression.

1. Introducción

El consumo global de gas natural se ha incrementado en los últimos años debido a la estabilidad de su precio y al menor impacto ambiental comparado con otros combustibles de origen fósil (IEA, 2022). Sin embargo, su almacenamiento, transporte y distribución aún presenta varios retos por resolver. Entre estos retos, destaca la compresión/descompresión del gas natural para poder efectuar su transporte. El método del gas natural comprimido consiste en comprimir el gas natural a presiones entre 200 y 250 bar hasta un volumen del 1% de su volumen original a condiciones atmosféricas y luego depositarlo en tanques a presión, los cuales son distribuidos a los lugares de destino. El método anterior, idealmente es utilizado para transportar el gas natural a cortas distancias (Mokhatab *et al.*, 2006).

El proceso de compresión/descompresión del gas natural, se lleva a cabo en estaciones compresoras y descompresoras. Sin embargo, surgen ciertas problemáticas que deben ser atendidas para mejorar las técnicas ya existentes en dichos procesos. En el caso del gas natural, cuando su temperatura se ve severamente reducida al ser descomprimido, se forman pequeñas estructuras cristalinas conocidas como hidratos, de apariencia sólida cristalina, similares al hielo, pero constituidos por moléculas de gas, rodeadas por una malla de moléculas de agua. Básicamente, es hielo que contiene gas, fenómeno provocado por el efecto Joule-Thomson el cual establece que un gas al ser expandido súbitamente, sufrirá también un cambio en su temperatura y puede describirse a partir de un coeficiente que matemáticamente se define como la derivada parcial de la presión, respecto de la temperatura a una entalpia constante.

Para evitar el congelamiento por el efecto Joule-Thomson se han propuesto varios sistemas de precalentamiento, principalmente para mejorar la eficiencia del sistema y disminuir el consumo de gas (Rahman, 2011). Ashouri *et al.* (2014), analizan un sistema

de precalentamiento indirecto, calentando agua a 70°- 90°C por medio de calentadores que consumen gas natural de la propia línea de la estación descompresora. Los resultados de este estudio ayudaron a determinar los valores mínimos de temperatura para evitar la formación de hidratos y, en consecuencia, a partir de los valores determinados, lograr el diseño de sistemas de precalentamiento por medio de tinas en el proceso de descompresión del gas natural. El procedimiento implementado puede alcanzar ahorros en el consumo de gas natural de hasta un 43%. Arabkoohsar *et al.* (2015), proponen un sistema de precalentamiento convencional. El procedimiento consiste en agregar un precalentamiento solar en la estación para reducir el consumo de gas natural. En el procedimiento, también se propone sustituir la válvula de expansión por un turbo-expansor para poder utilizar la exergía del gas natural. Ghezlbash *et al.* (2016), presentan una propuesta innovadora utilizando energía geotérmica y un dispositivo conocido como tubo vórtex que trabaja bajo el denominado efecto Ranque-Hilsch (Smith *et al.*, 2008).

Lo anterior ha motivado a los autores de este trabajo a realizar un análisis termodinámico de la implementación de un tubo vórtex para evitar el congelamiento por efecto Joule-Thomson en el proceso de descompresión del gas natural. Los tubos vórtex son dispositivos que funcionan normalmente con aire comprimido, pero en este caso se utilizará el gas natural. En el tubo vórtex, literalmente entra aire y es dividido en dos partes: gas frío en un extremo, y gas caliente en el otro. Este principio de funcionamiento del tubo vórtex, es la base teórica de este trabajo. El objetivo de esta investigación es modelar y simular el comportamiento de una estación descompresora de gas natural implementando un tubo vórtex para aumentar la temperatura del flujo de gas y un precalentamiento geotérmico para elevar la temperatura de la salida fría del tubo vórtex para así reducir el consumo de gas natural en el precalentamiento tradicional.

2. Descripción del proceso e implementación de la energía geotérmica y tubo vórtex

La Figura 1, muestra el esquema de una estación de gas natural con un tubo vórtex y un precalentamiento geotérmico. El gas a alta presión llega de ser transportado por camiones hasta la estación descompresora y entra a ella por el tubo vórtex el cual divide el flujo en dos, una rama caliente y otra fría. El flujo frío sale del equipo a través de una boquilla de aire, mientras que el flujo caliente sale por una válvula cónica en el lado opuesto del tubo. Dicha válvula regula el porcentaje de flujo frío y caliente que saldrá por cada lado. Cuanto mayor sea la fracción de frío, mayor será el caudal y la temperatura del flujo de aire frío. Por el contrario, cuanto menor sea la fracción de frío, menor será el caudal de aire frío y la temperatura (García y Rubio-Maya, 2010). El frío/calor se ajusta de acuerdo a las temperaturas más adecuadas para el proceso, tomando a consideración como límite de temperatura inferior, el punto de formación de hidratos (cerca de los 0 °C). Dentro del tubo vórtex se tiene una pequeña caída de presión, por lo cual el gas natural tiende a expandirse ligeramente. La rama fría pasa

a la etapa de precalentamiento geotérmico, donde llega hasta un tubo en U (un par de tubos unidos en su base mediante un codo de 180 ° formando una U, lo cual hace referencia a su nombre) que sirve como intercambiador de calor, el cual es enterrado debajo de la superficie, donde eleva su temperatura hasta un valor similar al de la rama caliente, debido al aporte de calor geotérmico. Aunque normalmente los tubos en U están hechos de polietileno o polipropileno, dicho intercambiador está fabricado con acero inoxidable 316, por su mayor resistencia mecánica para soportar las altas presiones que maneja el gas natural comprimido.

Posteriormente, después de que el gas de la rama fría eleva su temperatura, este se junta con el gas de la rama caliente en una cámara de mezcla. Una vez que los flujos se han mezclado pasan a una tina de calentamiento, donde ocurre la expansión del gas natural a través de una válvula de expansión. En esta etapa es donde se presenta en mayor medida el efecto Joule-Thomson al ser expandido de manera súbita. Es por eso que, a su vez, el gas natural recibe calor nuevamente a través de la tubería que funciona como otro intercambiador de calor, el cual absorbe el calor de agua caliente que se encuentra circulando en la

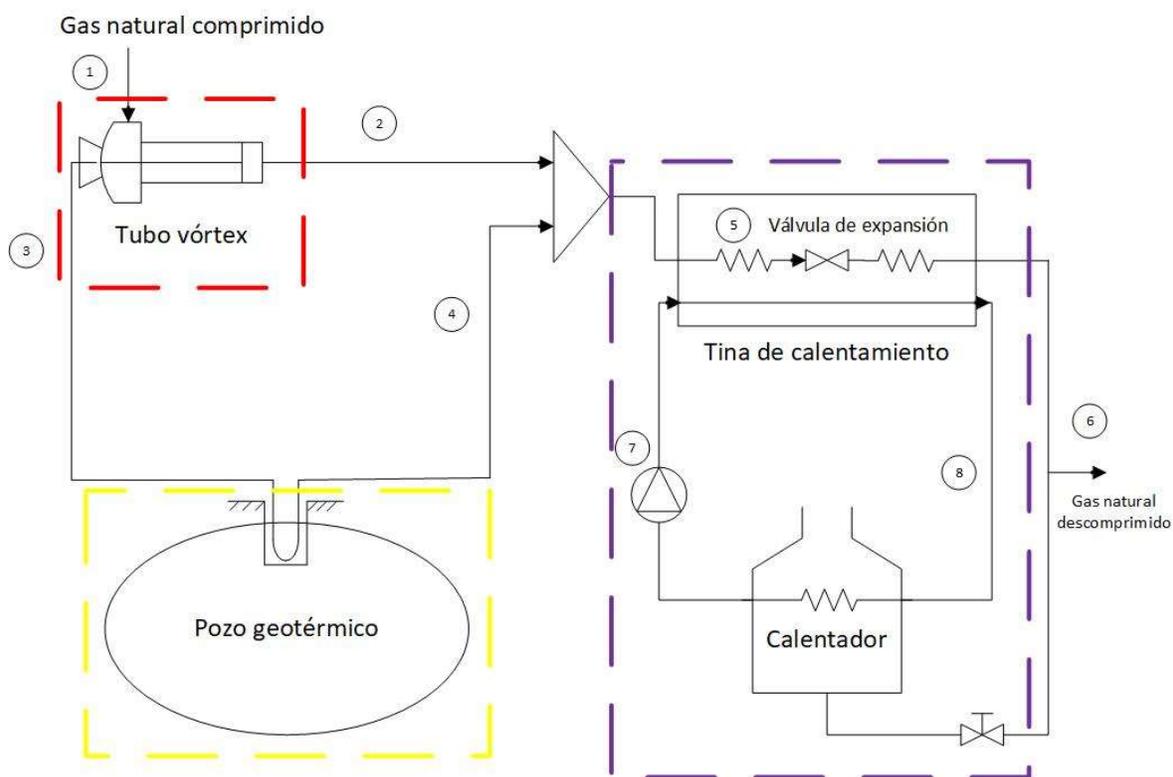


Figura 1. Esquema de la estación descompresora (morado) con tubo vórtex (rojo) y precalentamiento geotérmico (amarillo).

tina de calentamiento para mantener la temperatura del gas en un rango donde no se produzca un congelamiento. Dicha agua caliente es potenciada por un calentador el cual bombea el agua hacia la tina, el mismo gas natural descomprimido que llega al final de la estación se utiliza como combustible para elevar la temperatura del agua. Una vez pasado por este proceso, el gas natural finalmente llegar a la salida de la estación para ser almacenado o usado de acuerdo a la necesidad del consumidor.

2.1. Consideraciones generales para el modelado

Las consideraciones generales para el análisis del sistema de descompresión se presentan a continuación:

- El flujo se considera estacionario y estable.
- El flujo es compresible.
- Los cambios de energía cinética (ΔEc) y energía potencial (ΔEp) de todos los equipos son despreciables, debido a que serán relativamente muy pequeños.
- Las tuberías del sistema se asumen adiabáticas con el ambiente.
- El gas natural será tratado como una mezcla de gas real.
- El gas natural llega a la estación con una temperatura ambiente (20 °C) y una presión de 250 bar.
- La tina de calentamiento se encuentra a una temperatura de 62 °C.
- El gas natural descomprimido tiene una presión de 3 bar y se mantiene a una temperatura similar que la de entrada (20 °C).
- La presión en los estados intermedios se supone casi constante, solo disminuye en la etapa de expansión y en el tubo vórtex.
- El flujo de gas natural que sale de la estación es de $300 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para el sistema propuesto, el gas natural no se considera como un gas ideal, sino como una mezcla de gases reales y se debe tomar en cuenta las propiedades de cada uno de los hidrocarburos que lo conforman, para lo cual se toma como referencia los valores máximos y mínimos permitidos en la norma NOM-001-SECRE-2010. La composición del gas natural seleccionada para este trabajo se describe en la Tabla 1. Dicha

composición se ingresa en forma del porcentaje, equivalente a su fracción de masa.

Tabla 1
Composición del gas natural

Componente	Fórmula química	Composición (%)
Metano	CH_4	92
Etano	C_2H_6	3.5
Propano	C_3H_8	2.5
Butano	C_4H_{10}	0.5
Nitrógeno	N_2	0.8
Dióxido de carbono	CO_2	0.5
Oxígeno	O_2	0.2

Con esta composición se realiza el modelo para los distintos equipos del sistema. Las temperaturas y presiones del sistema se establecen de acuerdo a las suposiciones iniciales y a las ecuaciones de balance de energía por primera ley.

3. Modelado termodinámico

3.1. Gas natural

Para conocer las propiedades del gas natural es necesario conocer las fracciones de masa y molares de cada hidrocarburo y elemento que lo conforman. Existen dos formas de obtener las fracciones de masa y molar, según el tipo de porcentaje que se conozca de la composición del gas natural: porcentaje de masa o de volumen. Una vez obtenido dichos datos, se procede a determinar el resto de propiedades tales como la constante de gas de la mezcla, su densidad, su calor específico, su viscosidad y la conductividad térmica. La Tabla 2, muestra un resumen de las propiedades que se caracterizan en el sistema, con sus respectivas ecuaciones.

3.2. Tubo vórtex

En el tubo vórtex, el gas sale por dos corrientes, una fría y una caliente. Al realizar el balance de masa y energía mediante la primera ley, se obtiene:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$



Tabla 2
Propiedades del gas natural en el sistema

Propiedad	Ecuaciones	Observaciones
Fracción de masa	$f m_i = \frac{m_i}{m_{GN}}$	Se considera la fracción de masa equivalente al porcentaje en la composición.
Masa molar	$M_{GN} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{f m_i}{M_i}}$	Se debe conocer la masa molar de cada componente.
Fracción molar	$y_i = f m_i \frac{M_{GN}}{M_i}$	--
Constante de gas	$R_{GN} = \frac{R_u}{M_{GN}}$	--
Factor de compresibilidad	$Z_{GN} = \sum_{i=1}^k y_i Z_i$ $P_{GN} V_{GN} = Z_{GN} R_{GN} T_{GN}$	Cada Z individual se obtiene a partir de sus temperaturas y presiones reducidas. Se obtuvo el valor para las condiciones de salida de la estación.
Densidad	$\rho_{GN} = \frac{1}{V_{GN}}$	Valor obtenido para las condiciones de salida.
Flujo másico	$\dot{m}_{GN} = \dot{V}_{GN} \rho_{GN}$	Este se mantendrá constante a diferencia del caudal volumétrico.
Calor específico	$c_{p,GN} = \sum_{i=1}^k f m_i c_{p,i}$	El calor específico varía en función de la temperatura.
Viscosidad	$\mu_{GN} = \frac{K \cdot e^{(X \cdot (\rho_{GN})^Y)}}{10000}$ $K = \frac{(9.4 + 0.02 M_{GN}) T^{1.5}}{(209 + 19 M_{GN} + T)}$ $X = 3.5 + \frac{986}{T} + 0.01 M_{GN}$ $Y = 2.4 - 0.2 X$	Método empleado por Lee, Gonzáles y Eakin, (1966)
Conductividad térmica	$K_{GN} = \mu_{GN} \left(c_{p,GN} + \frac{2.48}{M_{GN}} \right)$	Correlación de Gambill (1957).

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \quad (2)$$

$$\mu_F (T_1 - T_3) = \mu_C (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Los flujos másicos de salida pueden ser sustituidos por el flujo másico de entrada multiplicado por un coeficiente que simboliza el porcentaje de flujo frío y caliente:

$$\dot{m}_2 = \mu_C \dot{m}_1 \quad (3)$$

$$\dot{m}_3 = \mu_F \dot{m}_1 \quad (4)$$

Sustituyendo la Ec. (3) y la Ec. (4) en la Ec. (2), se obtiene la Ec. (5), que describe el comportamiento del tubo vórtex en función del porcentaje de frío y calor que se establezca. En la Ec. (5) se utilizó la definición de calor específico para reemplazar la entalpía en función de la temperatura. Adicionalmente, se puede evaluar la temperatura de salida del gas natural caliente, estableciendo el porcentaje de frío y calor y un límite de temperatura fría, el cual no puede descender a menos de 0 °C debido a que formaría hidratos.

3.3. Calor geotérmico requerido

La fracción de flujo frío de gas natural que sale del tubo vórtex pasa al tubo en U donde se realizará el proceso de precalentamiento geotérmico. Este equipo funciona como un intercambiador de calor entre el suelo y el gas natural. El balance de energía, se define mediante la Ec. (6):

$$\dot{Q}_{GN1} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 \quad (6)$$

Reordenando la ecuación y utilizando la definición de calor específico, el calor requerido por el gas natural para elevar su temperatura, se define mediante la Ec. (7):

$$\dot{Q}_{GN1} = \dot{m}_3 c_{p,GN} (T_4 - T_3) \quad (7)$$

Este valor será el cual debe satisfacer el intercambiador en su diseño, se le agrega un 25% al valor como margen de seguridad, por posibles pérdidas o mal funcionamiento del sistema:

$$\dot{Q}_{GEO} = 1.25(\dot{Q}_{GN1}) \tag{8}$$

3.4. Diseño térmico del intercambiador geotérmico

El diseño térmico de un intercambiador de calor involucra el análisis de los mecanismos de transferencia de calor presentes para determinar el área necesaria y alcanzar las temperaturas deseadas del proceso (Kern, 1965). Por tanto, las dimensiones del tubo en U para elevar la temperatura del gas natural hasta la temperatura deseada, se conocen a partir del método de diferencia media logarítmica de temperaturas (DMLT), Ec. (9):

$$\dot{Q}_{GEO} = U * A * \Delta T_{ML} \tag{9}$$

Para obtener la DMLT, es necesario definir el diagrama temperatura-longitud (*T-L*), del intercambiador de calor. El valor de ΔT_{ML} se obtiene como se muestra en la Figura 2.

Una vez definidas las diferencias de temperaturas en los extremos del intercambiador de calor, a partir de la Figura 3. La DMLT, se puede definir a partir de la Ec. (10):

$$DMLT = \frac{\theta_A - \theta_B}{\ln\left(\frac{\theta_A}{\theta_B}\right)} \tag{10}$$

El coeficiente global de transferencia de calor es definido mediante la relación de diámetros del tubo, el coeficiente de transferencia de calor convectivo, así

como de la conductividad térmica del tubo. Se agrega un término que considera la forma en U del tubo del intercambiador, así como el relleno del pozo, Ec. (11):

$$U = \frac{1}{\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{h_{GN}} + \frac{R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{k_{TUBO}} + \frac{2\pi R_2}{\beta_0 \left(\frac{R_2}{R_{POZO}}\right)^{\beta_1} * k_{RELLENO}} } \tag{11}$$

La Figura 3 muestra el proceso de transferencia de calor del intercambiador geotérmico. Dicha transferencia se efectúa en el pozo, pasando por el relleno del pozo, el cual está en contacto con el diámetro exterior del tubo, el cual transfiere el calor hacia el interior, hasta llegar al gas natural.

Dónde:

β_0 y β_1 son los factores de forma. Estos coeficientes varían en función de la posición que tienen los tubos dentro del intercambiador. Los radios R_2 y R_1 se obtiene a partir de tablas, dónde al elegir un diámetro de tubo comercial y de acuerdo a un calibre BWG específico.

El radio/diámetro del pozo depende de los diámetros que proporcionan las barrenas, para lo cual se debe seleccionar uno de acuerdo a los diámetros disponibles de barrenas y considerando los diámetros de los tubos interiores. La conductividad térmica del tubo se obtiene de las tablas de conductividad térmica para diversos materiales y el relleno de estudios realizados.

El coeficiente de transferencia de calor por convección del gas natural h_{GN} se puede conocer a partir del número de Nusselt, el cual se define con la Ec. (12):

$$Nu = \frac{h_{GN} R_1}{K_{GN}} \tag{12}$$

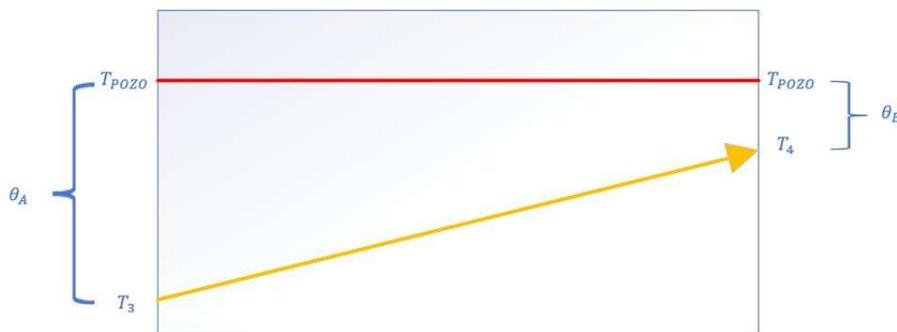


Figura 2. Comportamiento de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador.

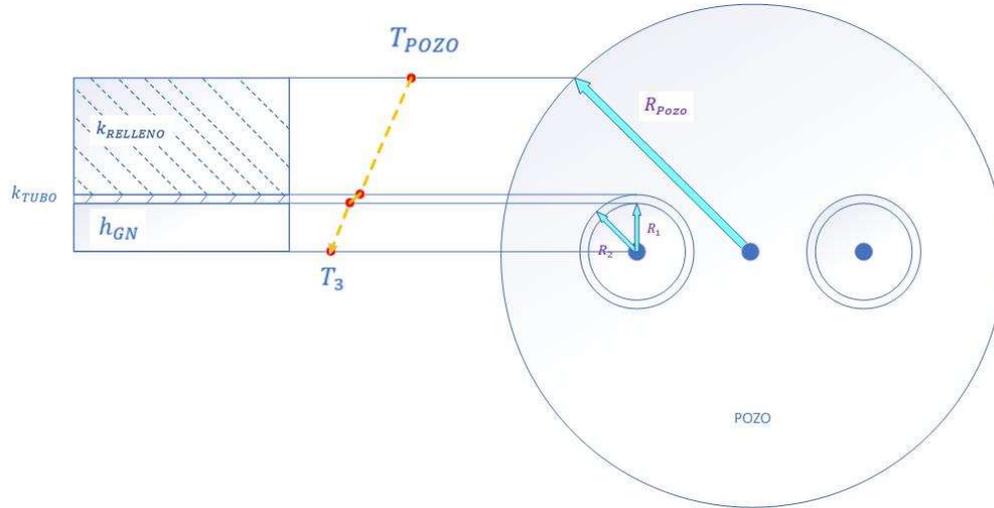


Figura 3. Proceso de transferencia de calor en un tubo en U.

Para obtener el valor del número de Nusselt, se utiliza la ecuación de Gnielinski (1976):

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}((Pr)^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (13)$$

El número de Nusselt, es función del número de Reynolds, número de Prandtl y del factor de Darcy. Dichos números adimensionales, se pueden obtener a partir de las ecuaciones (14)-(16):

$$Re = \frac{\rho_{GN}U_m D}{\mu_{GN}} = \frac{4\dot{m}_{GN}}{\pi D \mu_{GN}} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{\mu_{GN}C_{p,GN}}{K_{GN}} \quad (15)$$

$$f = \frac{(0.790 \ln(Re) - 1.64)^{-2}}{3000 < Re < 5 \times 10^6} \quad (16)$$

Una vez determinado el coeficiente global de transferencia de calor, es posible calcular el área total de transferencia de calor en el intercambiador. El área del tubo considerando (intercambiador de calor), se asume de dos pasos (ida y vuelta):

$$A = 4\pi L_1 R_2 \quad (17)$$

Debido a que la temperatura del pozo (120 °C) no se dará cerca de la superficie, se debe considerar una

longitud de tubo adicional L_2 , hasta el punto donde la temperatura del suelo ya será constante. Para la cual la longitud total del intercambiador es:

$$L = L_1 + L_2 \quad (18)$$

3.5. Tina de calentamiento

Una vez elevada la temperatura del gas natural, éste pasa a la tina de calentamiento. La tina de calentamiento, actúa como un intercambiador de calor, a la vez que ocurre el proceso de expansión del gas natural. En esta parte del sistema es dónde se considera el efecto Joule-Thomson, que causara una disminución en la temperatura, la cual se puede determinar mediante la Ec. (19):

$$\Delta T_{JT} = \mu_{JT} \Delta P \quad (19)$$

El calor liberado por el gas natural debido al efecto Joule-Thomson se evalúa mediante la Ec. (20):

$$\dot{Q}_{JT} = \dot{m}_{GN} C_{p,GN} (\Delta T_{JT}) \quad (20)$$

Una vez realizados los balances de masa y energía, y sustituyendo las ecuaciones correspondientes se obtiene la Ec. (21), la cual determina el flujo de calor necesario en la tina de calentamiento, considerando el efecto Joule-Thomson:

$$\dot{Q}_{GN2} = \dot{m}_{GN} C_{p,GN} (\Delta T_{JT} + T_6 - T_5) \quad (21)$$

Al igual que con el flujo de calor geotérmico, se agrega un factor de seguridad del 25% considerando posibles pérdidas de calor:

$$\dot{Q}_{TINA} = 1.25(\dot{Q}_{GN2}) \quad (22)$$

El flujo de agua necesario en la tina para satisfacer las condiciones del flujo de calor requerido se determina con la Ec. (23):

$$\dot{Q}_{TINA} = \dot{m}_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_7 - T_8) \quad (23)$$

La cantidad de combustible (gas natural de la misma estación) que se requiere para calentar el agua de la tina se determina a partir de la Ec. (24):

$$\dot{Q}_{TINA} = PC(\dot{m}_{FUEL}) \quad (24)$$

Al dividir este flujo entre el flujo total de la estación, se obtiene el porcentaje de gas natural que se utilizará como combustible, Ec. (25):

$$\%GN = \frac{\dot{m}_{FUEL}}{\dot{m}_{GN}} \quad (25)$$

Con este dato se conocerá cuanto porcentaje de gas del suministrado al cliente será utilizado para realizar el proceso de precalentamiento en la tina y por tanto cuanto gas extra se usará, el cual se espera sea muy poco en comparación de los volúmenes de gas entregados al usuario.

4. Resultados y discusiones

Este análisis se desarrolla con ayuda del software EES (Engineering Equation Solver), siendo un programa especializado en análisis termodinámicos dada su amplia biblioteca de propiedades y facilidad de uso. La implementación del modelo sigue cierta metodología que ayuda a comprender y llevar un orden correcto. Se inicia estableciendo los parámetros de entrada de la estación, posteriormente se establece una composición del gas natural y con ayuda de las ecuaciones establecidas en el modelo termodinámico, se determinan algunas propiedades, tales como calor específico, densidad, flujo másico y factor de compresibilidad. Después se procede a realizar el análisis de los tres equipos principales de la estación: tubo vórtex,

intercambiador geotérmico y tina de calentamiento para obtener resultados tales como los flujos de calor de la estación, la longitud del intercambiador geotérmico y la cantidad de combustible utilizado para calentar el agua de la tina.

4.1. Resultados del modelado del gas natural

Una vez establecidas las fracciones de masa y con el valor de la masa molar de cada componente obtenido de tablas de propiedades termodinámicas (Cengel *et al.*, 2011), se calcula el valor de la masa molar de la mezcla y posteriormente la fracción molar de cada componente como se muestra en la Figura 4.

Las fracciones molares son similares al porcentaje de la composición, pero su ligera variación puede afectar los resultados, es por eso su importancia al momento de definir las propiedades dentro del sistema, ya que, al involucrar la masa molar, se tiene la certeza de la cantidad exacta de cada componente en la mezcla.

La Tabla 3, presenta los resultados de presión, temperatura y flujo másico en los diversos flujos del sistema.

Tabla 3
Resultados de presión, temperatura y flujo másico

Flujo	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo másico (kg/s)
1	25000	20	0.1734
2	23000	55	0.05201
3	23000	5	0.1214
4	23000	55	0.1214
5	23000	55	0.1734
6	300	20	0.1734
7	101.3	62	0.3905
8	101.3	25	0.3905

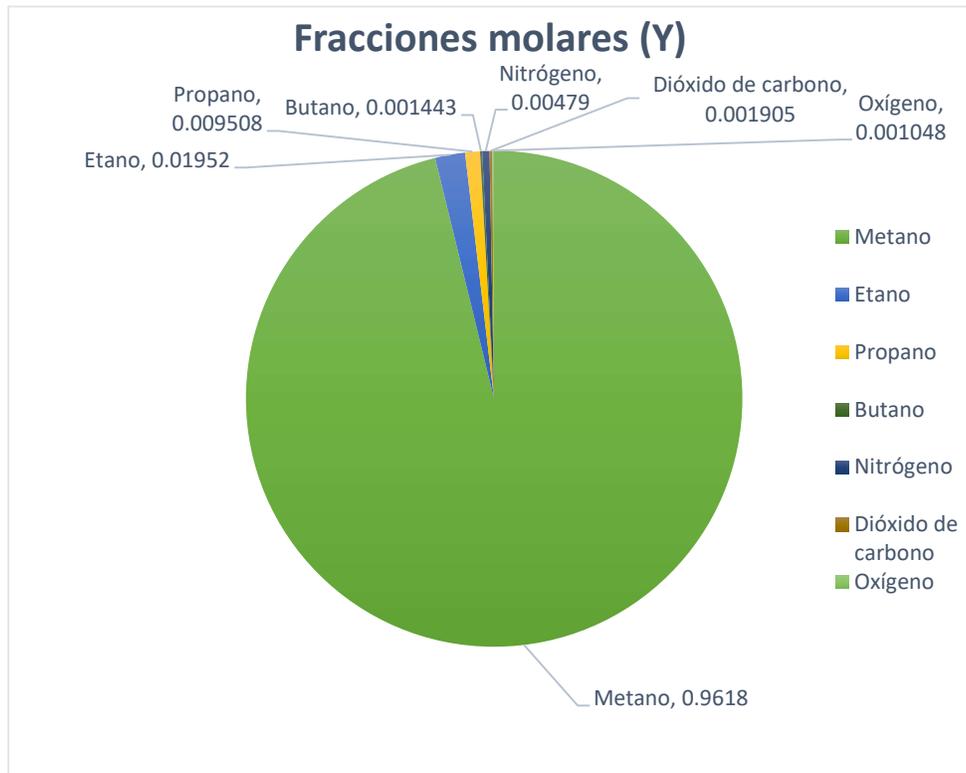


Figura 4. Fracciones molares en la composición del gas natural.

El flujo másico dentro de la estación es relativamente pequeño al compararse con el flujo másico típico de un gasoducto, por lo cual la capacidad de esta será de igual forma pequeña. La salida del flujo caliente en el tubo vórtex T_2 , se obtiene de su ecuación de balance (Ec. 5), y esta, brinda un aumento de 35 °C en la temperatura del gas natural, siendo su valor de 55 °C, aunque sea un pequeño porcentaje del flujo de masa, esto permite que la cantidad de flujo que llega al intercambiador geotérmico sea menor y requiera menos área de transferencia de calor, la cual se refleja en un intercambiador de menor profundidad. La temperatura de la tina permite que el consumo de agua \dot{m}_7 , tampoco sea excesivo, siendo de 0.3905 kg/s y por tanto se tenga un costo de operación menor.

Las propiedades del gas natural calculadas con las ecuaciones mostradas en las secciones anteriores se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4
Propiedades del gas natural obtenidas

Propiedad	Variable	Valor	Unidades
Constante de gas	R_{GN}	0.4957	kJ/kg-K
Factor de compresibilidad	Z_{GN}	0.9923	--
Volumen específico	\dot{V}_{GN}	0.4807	m^3/kg
Densidad	ρ_{GN}	2.081	kg/m^3
Calor específico geotérmico	$Cp_{GN,GEO}$	3.482	kJ/kg-K
Calores específico tina	$Cp_{GN,TINA}$	3.027	kJ/kg-K
Viscosidad	μ_{GN}	0.0222	cP
Conductividad térmica	K_{GN}	0.00009061	kW/m-K

Los valores de las propiedades calculadas, tales como viscosidad y conductividad térmica se encuentran dentro del rango esperado, lo cual brinda un buen indicio de la certeza de los datos. Algunos otros, tales como el calor específico o el factor de compresibilidad se acercan en gran medida a los valores del

metano, esto debido al gran porcentaje que constituye este hidrocarburo en la composición del gas natural.

4.2. Resultados del aporte geotérmico y el diseño del intercambiador geotérmico

Al realizar el análisis termodinámico se obtienen el valor de los flujos del calor, así como todos los datos para caracterizar el intercambiador geotérmico. Estos resultados se muestran en la Tabla 5. Se muestran en una sola sección debido a su estrecha relación.

Tabla 5
Resultados del análisis del precalentamiento geotérmico

Propiedad	Variable	Valor	Unidades
Flujo de calor, precalentamiento geotérmico	\dot{Q}_{GEO}	26.41	kW
Delta medio de temperatura	ΔT_{ML}	87.64	K
Número de Reynolds	Re	351882	--
Número de Prandtl	Pr	0.8496	--
Factor de Darcy	f	0.01401	--
Número de Nusselt	Nu	552.2	--
Coefficiente convectivo	H_{GN}	4.429	$kW/m^2 - K$
Coefficiente global de transferencia de calor	U	0.04449	$kW/m^2 - K$
Área de transferencia de calor	A	6.773	m^2
Longitud adicional del intercambiador	L_2	30	m
Longitud total del intercambiador	L	72.44	m

El análisis del aporte geotérmico arroja como resultado un flujo de calor \dot{Q}_{GEO} , de 26.41 kW. Este valor es pequeño respecto a la capacidad que pueden llegar a tener algunos sistemas geotérmicos, siendo incluso valores típicos de 100 kW, aunque dependiendo del pozo puede llegar hasta 2 MW. Este valor del flujo de calor indica que el costo del pozo no implicaría un costo elevado. El área de transferencia de calor del intercambiador resulta ser poca también debido al poco flujo de calor requerido y esto se traduce a que la longitud L, sea de 72.44 metros. La longitud obtenida puede considerarse correcta, ya que las longitudes típicas de los pozos geotérmicos de media entalpía se encuentran en el rango de los 50 a 150 metros de profundidad.

El número de Reynolds determina que el tipo de flujo dentro del intercambiador es de carácter turbulento, debido a que se encuentra por encima de 10000 y junto al valor de Prandtl (0.8496), se encuentran dentro del rango aceptable para aplicar la ecuación de Gnielinski para obtener el valor del número de Nusselt.

4.3. Resultados del modelado de la tina de calentamiento

Los resultados del análisis en la tina de calentamiento se muestran en la Tabla 6. Dichos resultados muestran el flujo de calor en la tina de calentamiento, así como el combustible requerido para dicho proceso.

Tabla 6
Resultados del análisis en la tina de calentamiento

Propiedad	Variable	Valor	Unidades
Cambio de temperatura por efecto JT	ΔT_{JT}	127.1	K
Flujo de calor, tina de calentamiento	\dot{Q}_{TINA}	60.43	kW
Porcentaje de combustible	%GN	2.046	%

Debido a que la presión del gas natural se reduce súbitamente desde una presión alta de 25 MPa hasta una presión baja de 0.3 MPa (ver Tabla 3), el descenso de temperatura debido al efecto Joule-Thomson es muy drástico, presentando una diferencia de temperatura entre la entrada y salida de la tina de calentamiento de 127.1 K. Esto se atribuye a que el coeficiente de Joule-Thomson es de 5.6 °C/MPa, valor típico en aplicaciones industriales.

El flujo de calor requerido en la tina de calentamiento \dot{Q}_{TINA} , es mayor al requerido en el aporte geotérmico, esto se debe principalmente a que es en esta etapa donde se manifiesta en gran medida el efecto Joule-Thomson, por lo cual se requiere dicha cantidad de calor para mantener la temperatura del gas natural por encima del punto de congelación.

El último resultado relevante del estudio, indica que solo se requiere de 2.046% del combustible que se entrega en la estación, como combustible para potenciar el calentador de agua que alimenta la tina. Dicho valor refleja un ahorro importante debido a que otros sistemas tradicionales utilizan hasta el 5%.



4.4. Variación en el porcentaje del flujo frío y caliente en el tubo vórtex

Un parámetro que se puede variar con cierta flexibilidad es el porcentaje de flujo frío y caliente que sale del tubo vórtex. El elegido para el modelo principal consta de un 70/30 respectivamente, siendo necesario que sea mayor el porcentaje frío. Este parámetro tiene cierta complejidad para ser evaluado, a menor flujo caliente mayor será esa temperatura de salida, pero a su vez será una mayor cantidad de flujo que necesite pasar después por el intercambiador de calor geotérmico, a una temperatura un poco inferior a la de entrada. Es necesario observar ese comportamiento para poder determinar la mejor configuración. Además, estas variables se encuentran al principio del sistema, por lo que su influencia repercute en casi todas las variables posteriores.

La Figura 5, muestra una variación de frío desde 65% hasta 85% y su influencia sobre los flujos de calor requeridos tanto en la tina de calentamiento como en el intercambiador geotérmico

La primera impresión de estos resultados, podría resultar en usar los valores en el punto dónde las líneas se intersecan, pero esto no es del todo correcto. Al modificar el valor del flujo de calor geotérmico requerido, aumentará también la longitud del intercam-

biador de calor, lo que a su vez se traduce en un aumento del costo del sistema. Se deben tomar en consideración dichos costos para encontrar la configuración óptima.

5. Conclusiones

El sistema de precalentamiento por medio de la implementación de un tubo vórtex y energía geotérmica como aporte geotérmico resultan ser bastante viables, además de aumentar la eficiencia del sistema de descompresión de gas natural. Se puede ahorrar energéticamente hasta una tercera parte de combustible de lo que normalmente se utilizaría en un sistema convencional.

Se observa que el valor de la longitud del intercambiador geotérmico resulta favorable, siendo de 72.06 m una profundidad aceptada para un recurso de mediana entalpía, por lo que la inversión en dicho intercambiador no requerirá de perforaciones muy profundas.

Los flujos de calor permiten que los flujos de agua utilizados para suministrar calor de 69.07 kW en la tina de calentamiento no sean excesivos, lo cual significa un ahorro económico, ya que las bombas utilizadas para mover esos flujos no requerirán grandes caudales y por tanto serán de menor tamaño. Por último, el ahorro de combustible permitirá reducir costos de

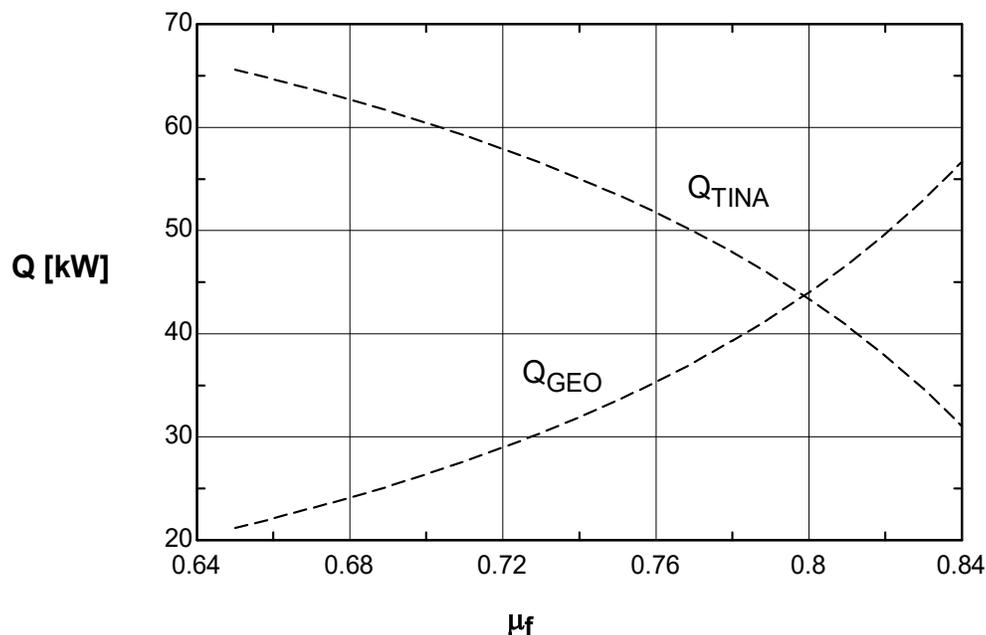


Figura 5. Variación del porcentaje de salida frío del tubo vórtex y su influencia en los flujos de calor.

operación para hacer de este tipo de sistemas una opción más viable para las empresas distribuidoras de gas natural al solo utilizar un 2.046% del gas natural de la estación. Aún es posible realizar un análisis más a fondo modificando las diversas variables del sistema para lograr una mejor configuración.

Comparando los resultados obtenidos con los costos de operación y la eficiencia energética de una estación descompresora con precalentamiento convencional, puede afirmarse que la propuesta analizada es viable y atiende la necesidad de reducir el consumo del propio gas natural en la etapa de precalentamiento para generar un ahorro económico a los usuarios finales.

Nomenclatura

A	Área (m^2)
C_p	Calor específico ($kJ/kg \cdot K$)
D	Diámetro (m)
f	Factor de Darcy
fm	Fracción de masa
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección ($kW/m^2 \cdot K$)
K	Conductividad térmica ($Btu/h \cdot ft \cdot R, kW/m \cdot K$)
L	Longitud (m)
M	Masa molar ($kg/kmol$)
\dot{m}	Flujo másico (kg/s)
Nu	Número de Nusselt
R	Constante de gas ($kJ/kg \cdot k$)
R_u	Constante Universal de gases ($kJ/kmol \cdot k$)
P	Presión (kPa)
Pr	Número de Prandtl
\dot{Q}	Flujo de calor (kW)
R	Radio (m)
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura ($^{\circ}C, K, R$)
U	Coefficiente global de transferencia de calor ($kW/m^2 \cdot K$)
ν	Volumen específico (m^3/kg)
\dot{V}	Caudal (m^3/h)
y	Fracción molar
Z	Factor de compresibilidad
$\%GN$	Porcentaje de gas natural (%)

Letras griegas

β	Factor de forma
θ	Cambio de temperatura ($^{\circ}C, K$)
ΔT	Diferencia de temperatura ($^{\circ}C, K$)
ΔP	Diferencia de presión (kPa)
ΔT_{ML}	Diferencia media logarítmica de temperatura ($^{\circ}C$)
μ	Viscosidad (cP)
μ_C	Fracción caliente
μ_F	Fracción fría
μ_{JT}	Coefficiente de Joule-Thomson ($^{\circ}C/MPa$)
ρ	Densidad (kg/m^3)

Subíndices

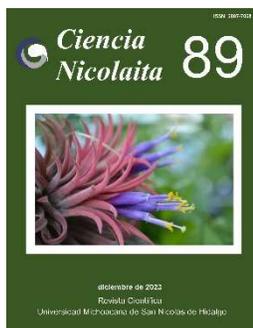
C	Caliente
F	Frío
GEO	Precalentamiento geotérmico
GN	Gas natural
H_2O	Agua
i	Componente
$TINA$	Tina de calentamiento
1, ..., 9	Flujos

Referencias

- Airmasters España. "Tubo Vortex AIR-M4H", AirMasters, <https://www.air-masters.eu/es/tubo-vortex/77-145-tubo-vortex-air-m4h.html>, [consultado el 17 de enero de 2022].
- Alvarado, D., & Bánzer, C., 2002. "Recuperación térmica de petróleo.", Issuu, <https://issuu.com/ogeidsab/docs/alvarado-d-a-and-banzer-c-recuperac>, [consultado el 6 de mayo de 2022].
- Arabkoohsar, A. *et al.*, 2015. A new design for natural gas pressure reduction points by employing a turbo expander and a solar heating set: *Renewable Energy*, 81, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.043>.
- Ashouri, E. *et al.*, 2014. The minimum gas temperature at the inlet of regulators in natural gas pressure reduction stations (CGS) for energy saving in water bath heaters: *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.005>.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. 2011. *Termodinámica: Mcgraw Hill Education*, p 700-723, ISBN: 9786071507433



- Diaz Molina, O. P., Valoración del potencial energético basado en el recurso geotérmico de baja entalpía en la isla de Gran Canaria: Máster Universitario en eficiencia energética, *Universidad de las Palmas de Gran Canaria.*, p. 12-19
- García, P. A. C., & Rubio-Maya, C., 2010. Estudio experimental del fenómeno ranque-hilsch en un tubo vórtice: *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, ISBN: 9786079530938
- Ghezelbash, R., Farzaneh-Gord, M., Sadi, M., 2016. Performance assessment of vortex tube and vertical ground heat exchanger in reducing fuel consumption of conventional pressure drop stations: *Applied Thermal Engineering*, 102, 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.110>.
- IEA, 2022. World Energy Outlook 2022, International Energy Agency.
- Kern, D. Q., 1965. Process Heat Transfer. New York, U.S.A. *McGraw-Hill*. ISBN: 9781119364825
- Khosvari, M., Arabkoohsar, A., Alsagri, A. S., & Sheikholeslami, M., 2019. Improving thermal performance of water bath heaters in natural gas pressure drop stations: *Applied Thermal Engineering*, 159, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113829>
- Kostowski, W. J., Usón, S., 2013. Thermoeconomic assessment of a natural gas expansion system integrated with a co-generation unit: *Applied Energy*, 101, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.002>
- Lee, A. B., Gonzalez, M. H., Eakin, B. E., 1966. The viscosity of natural gases: *Journal of Petroleum Technology*, 1, 1-4 (SPE-1340-PA).
- Mokhatab, S., & Poe, W. A., 2006. Handbook of natural gas transmission and processing: *Gulf professional publishing*. p. 1-26, ISBN: 0128158174.
- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Natural Gas Fuel Basics”, https://afdc.energy.gov/fuels/natural_gas_basics.html, [consultado el 24 junio de 2021].
- Rayo, J. C. L., 2019. Intercambiadores de calor subterráneos en sondeos geotérmicos superficiales: *Energía & Minas: Revista Profesional*, 15, 52-59, ISSN 1699-7743.
- Rahman, M. M., 2011. Power generation from pressure reduction in the natural: *Journal of Mechanical Engineering*, 41(2), 89–95. <https://doi.org/10.3329/jme.v41i2.7472>
- Remund C.P., 1999. Borehole thermal resistance: Laboratory and field studies: *ASHRAE Winter Meeting, Chicago, IL (US)*, ISSN 0001-2505.
- ScienceDirect, “Hydrate Natural Gas - an overview | ScienceDirect Topics”, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrate-natural-gas>, [consultado el 25 de junio de 2020].
- Secretaría de Gobernación, “NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural”, [https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3997/sener/sener.htm#:~:text=de%20emergencia%20severa\),NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D001%2DSECRE%2D2010%2C%20Especificaciones,que%20dice%3A%20Estados%20Unidos%20Mexicanos](https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3997/sener/sener.htm#:~:text=de%20emergencia%20severa),NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D001%2DSECRE%2D2010%2C%20Especificaciones,que%20dice%3A%20Estados%20Unidos%20Mexicanos), [consultado el 07 de septiembre de 2021].
- Secretaría de Gobernación, “NORMA Oficial Mexicana NOM-Q-27-1986 Calentadores para agua tipo almacenamiento a base de gas natural o gases licuados de petróleo”, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4821401&fecha=04/12/1986#gsc.tab=0, [consultado el 03 de marzo de 2022].
- Smith E., Pongjet P., 2008. Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1822-1842, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.006>.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Evaluación de la difusividad térmica efectiva en el estado transitorio de una geometría fractal para condiciones de temperatura y flujo de calor constantes

Evaluation of the effective thermal diffusivity in the transient state of a fractal geometry for constant temperature and heat flux conditions

Israel Rosas Yescas*, José Eduardo Acosta Cano de los Ríos, Óscar Arturo Chávez López, Carlos Arturo Méndez Herrera, Víctor Manuel Ambriz Díaz

Para citar este artículo: Rosas Yescas Israel, Acosta Cano de los Ríos José Eduardo, Chávez López Óscar Arturo, Méndez Herrera Carlos Arturo y Ambriz Díaz Víctor Manuel, 2023. Evaluación de la difusividad térmica efectiva en el estado transitorio de una geometría fractal para condiciones de temperatura y flujo de calor constantes. Ciencia Nicolaita no. 89, 128-139. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.696>



Historial del artículo:

Recibido: 7 de octubre de 2022

Aceptado: 22 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: israel.ry@chihuahua.tecnm.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Evaluación de la difusividad térmica efectiva en el estado transitorio de una geometría fractal para condiciones de temperatura y flujo de calor constantes

Evaluation of the effective thermal diffusivity in the transient state of a fractal geometry for constant temperature and heat flux conditions

Israel Rosas Yescas*, José Eduardo Acosta Cano de los Ríos, Óscar Arturo Chávez López, Carlos Arturo Méndez Herrera y Víctor Manuel Ambriz Díaz

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, México

Resumen

En este trabajo se comparan dos modelos para calcular la difusividad térmica efectiva usada en simulaciones de fenómenos transitorios con diferencias finitas de medios porosos con geometría fractal del tipo Alfombra de Sierpinsky. Se evalúa la coincidencia entre los resultados obtenidos utilizando estos modelos y simulaciones de elemento finito. Esta comparación se hace para dos condiciones: temperatura constante y flujo de calor constante y para diferentes valores de la porosidad. La simulación en elemento finito se hace utilizando el software Solidworks y las simulaciones con diferencias finitas utilizan el enfoque de equilibrio térmico local. Los resultados muestran que el modelado a utilizar depende de las condiciones del fenómeno a simular. El modelo utilizado reproduce de manera adecuada el efecto de la porosidad en la evolución temporal de la temperatura, pero la distribución espacial no se ve afectada por este parámetro.

Palabras clave: Difusividad térmica efectiva, Medio poroso, Fractal

Abstract

In this work, two models to calculate the effective thermal diffusivity used in simulations of transient phenomena with finite differences of porous media with fractal geometry of the Sierpinsky Carpet type are compared. The agreement between the results obtained using these models and finite element simulations is evaluated. This comparison is performed for two conditions: constant temperature and constant heat flow and for different values of porosity. Finite element simulation is done by using Solidworks software and finite difference simulations use the local thermal equilibrium approach. The results show that depending on the phenomenon to be simulated, one of the

two models can be used. The model used adequately reproduces the effect of porosity on the temporal evolution of temperature, but the spatial distribution is not affected by this parameter.

Keywords: Effective thermal diffusivity, Porous medium, Fractal.

Introducción

Los medios porosos son materiales compuestos donde una matriz sólida contiene diversas cavidades llenas de uno o varios fluidos y donde dichas cavidades son llamadas poros que pueden o no estar conectadas entre sí. La forma, tipo de conexión, tamaño y distribución de estos poros son algunas de las características que determinan el comportamiento o propiedades para este tipo de materiales. Debido a que cada material tiene una topología particular para sus poros y a que las propiedades dependen de su estructura, no es posible tener un modelo general aplicable a todos los materiales porosos. Dentro de las propiedades a estudiar en este tipo de materiales, aquellas relacionadas con los fenómenos de transporte son de particular interés en muchas áreas, especialmente las relacionadas con el manejo de la energía. Por un lado, se tiene que los medios porosos con celdas abiertas (interconectadas entre sí) son estudiados, por ejemplo, en sistemas geotérmicos de extracción de energía o en intercambiadores de calor. Por otro lado, los medios porosos con celdas cerradas tienen aplicaciones en sistemas de almacenamiento de energía o como materiales aislantes. Kovacit *et al.* (2017) investigaron experimentalmente muestras de una espuma metálica con celdas cerradas con material con cambio de fase que pueden ser una excelente alternativa para grandes radiadores de techo para una calefacción o refrigeración más eficiente. Jeng *et al.* (2015) describen la mejora en el elemento de disipación de calor de una lámpara led mediante una espuma metálica de celda cerrada. A pesar de su relevancia, las investigaciones de las propiedades de medios porosos con celdas cerradas son pocas si se comparan con aquellas para medios con celdas abiertas y muchas de estas investigaciones están enfocadas esencialmente en las propiedades estructurales o mecánicas, más que en propiedades de transporte de energía o masa. Estos fenómenos de transporte, son descritos por las propiedades termofísicas de los materiales y la mayoría

de los artículos existentes están enfocados en determinar la conductividad térmica efectiva, k_{ef} , en estado estacionario (Deng *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2014; Ohlsenbrugge *et al.*, 2016).

Para investigar el comportamiento térmico de los materiales porosos existen dos enfoques, el equilibrio térmico local LTE por sus siglas en inglés (*Local Thermal Equilibrium*) y el LTNE (*Local Thermal Non-Equilibrium*). El primero asume que la fase sólida y la fase de fluido tienen la misma temperatura y por tanto solo se necesita una ecuación de energía para modelar su comportamiento. El LTNE no hace tal suposición y por tanto el material requiere resolver dos ecuaciones de energía, una para cada fase. Los modelos basados en LTE han sido ampliamente utilizados y han probado ser bastante efectivos para muchos casos de transferencia de calor constante, sin generación interna de calor (Nakayama *et al.*, 2001; Quintard y Whittaker, 1995; Al-Nimr y Abu-Hijleh, 2002). Además de lo anterior, para el abordaje de los fenómenos de transporte en medios porosos se ha utilizado el concepto de fractal desde hace más de 20 años (Williams y Dawe, 1986; Tarafdar *et al.*, 2000) y los modelos basados en este tipo de geometría han ganado popularidad debido al relativamente pequeño número de parámetros que definen a un medio poroso fractal con geometría compleja. Algunos autores que han desarrollado modelos de la conductividad efectiva en fractales señalan que la dimensión del fractal, d_f , es un parámetro importante para determinar las propiedades termofísicas del mismo, ya que esta determina la heterogeneidad de la estructura del medio poroso resultante (Ma y Chen, 2015; Feng *et al.*, 2007; Yu y Cheng, 2002). Una dimensión fractal grande implica un material poroso más irregular.

Planteamiento del problema

Conocer las propiedades efectivas es de vital importancia en aplicaciones de la ingeniería, ya que son datos de entrada cruciales para diversos estudios nu-

méricos sobre la transferencia de calor o masa en medios porosos, que apliquen algún modelo desarrollado. Además de la conductividad efectiva, otra propiedad relevante es la difusividad térmica efectiva, α_{ef} , que determina el comportamiento transitorio de la difusión de calor en un material. Con el fin de evaluar un modelo adecuado de la difusividad térmica efectiva en una geometría fractal para su aplicación en simulaciones numéricas de procesos transitorios de transferencia de calor utilizando diferencias finitas, este trabajo analiza la coincidencia entre simulaciones realizadas mediante elemento finito y simulaciones con diferencias finitas del modelo planteado. Las comparaciones se harán para la evolución temporal de la temperatura en un elemento cuadrado con dimensiones $L \times L$, con temperatura inicial uniforme T_0 . Como lo muestra la Figura 1, todas las fronteras del cuadrado están aisladas excepto una, la cual está sujeta a una de dos condiciones o casos: a) Temperatura constante en la pared, T_w y b) Flujo de calor constante en la pared, \dot{q}_w .

Para la simulación en elemento finito, se utiliza el software Solidworks, donde se construye un modelo tridimensional de la geometría fractal y se somete las condiciones térmicas adecuadas. Aunque la geometría es 3D, su espesor unitario y las características de modelado la equiparan a un elemento que puede analizarse como bidimensional. En cuanto a las simulacio-

nes con diferencias finitas se utiliza un esquema basado en diferencias centradas y se realizan bajo el enfoque LTE para medios porosos.

Geometría fractal

Para las simulaciones en elemento finito se utiliza la geometría fractal bidimensional conocida como alfombra de Sierpinski. Las alfombras de Sierpinski son una clase especial de fractales bidimensionales que están determinados por un generador que es un cuadrado dividido en $n \times n$ subcuadrados congruentes, m de estos son negros y los otros $n^2 - m$ son blancos. Los subcuadrados negros permanecen, mientras que los blancos deben ser eliminados. En la siguiente etapa de iteración, cada uno de los restantes subcuadrados se subdivide nuevamente en $n \times n$ subcuadrados iguales y el patrón del generador se repite. Este procedimiento de construcción repetido *ad infinitum*, genera una alfombra de Sierpinski autosimilar de dimensión fractal $d_f = \log(m) / \log(n)$ (Falconer, 1997). Para este caso se tomaron $m=8$ y $n=3$ y se realizó el estudio hasta la cuarta iteración obteniéndose las geometrías de la Figura 2. La dimensión fractal para geometría utilizada corresponde a un valor $d_f = 1.893$. La iteración cero corresponde a la superficie sólida.

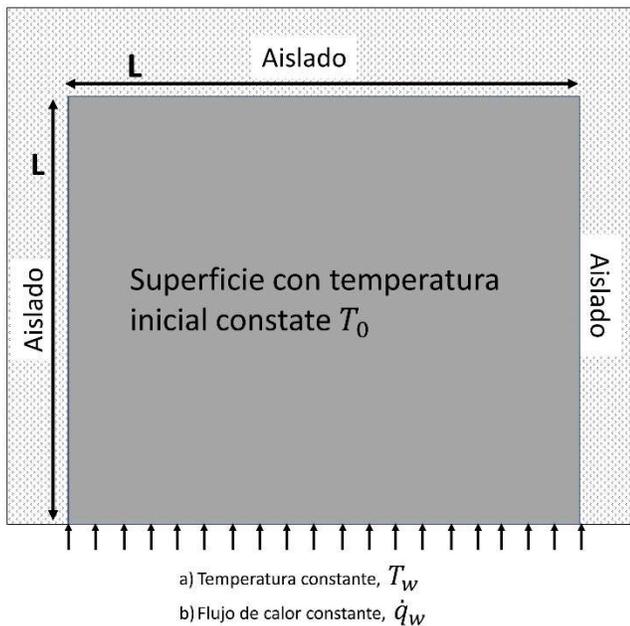


Figura 1. Esquema del problema planteado.

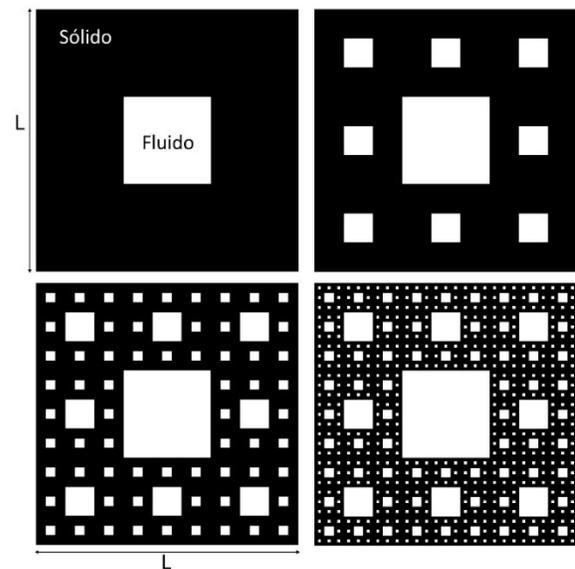


Figura 2. Iteraciones analizadas de la alfombra de Sierpinski.

Porosidad para la geometría fractal

La porosidad ϕ de un medio es la relación del volumen ocupado por el fluido en el medio respecto al volumen total, de la forma:

$$\phi = \frac{Vol_f}{Vol_{tot}} \tag{1}$$

Para el caso de la carpeta de Sierpinski analizada en este trabajo, las zonas claras representan el espacio ocupado por algún fluido y las zonas oscuras el espacio correspondiente al sólido. De esta manera, la porosidad para la *j*-ésima iteración está determinada en la forma según Liang *et al.* (2014):

$$\phi = \sum_{i=1}^j \left[\left(\frac{1}{n^i}\right)^2 \times m^{i-1} \right], \tag{2}$$

la cual se reduce a:

$$\phi = 1 - \left(\frac{8}{9}\right)^j, \tag{3}$$

para los parámetros *m* y *n* utilizados.

La Tabla 1 muestra la porosidad ϕ que caracteriza las geometrías simuladas con el método de elemento finito.

Tabla 1

Valores de la porosidad para las iteraciones del fractal.

<i>j</i> -ésima iteración	ϕ
0	0
1	0.1111
2	0.2098
3	0.2976
4	0.3757

Modelo matemático

Para las simulaciones con diferencias finitas el planteamiento para los casos: a) y b) se muestra en la Figura 3.

Bajo este modelo el comportamiento térmico de la fase sólida del medio poroso se rige por la ecuación:

$$(1 - \phi) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \phi) \dot{q} = (1 - \phi) (\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t}, \tag{4}$$

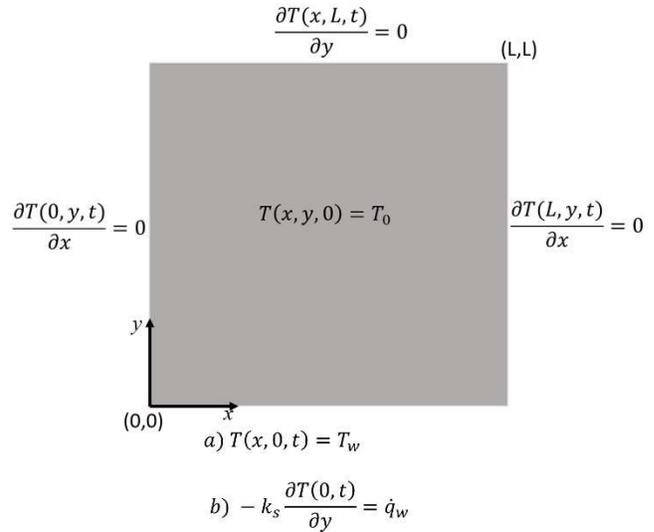


Figura 3. Planteamiento del problema para su resolución con diferencias finitas

donde *k* es la conductividad térmica, *T* es la temperatura; \dot{q} la generación de calor, *c* es el calor específico y *t* el tiempo, el subíndice “*s*” se refiere a la fase sólida.

Por otra parte, para un fluido incompresible la ecuación es:

$$\phi \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \phi \dot{q} = \phi (\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{V} \cdot \nabla T_f, \tag{5}$$

donde el subíndice “*f*” hace referencia a fluido.

Con el fin de simplificar las ecuaciones, se considera que ambas fases están a la misma temperatura, por tanto:

$$T = T_f = T_s \tag{6}$$

y el sistema de las ecuaciones (3) y (4) se reduce a la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot (k_{ef} \nabla T) + \dot{q}_{ef} = (\rho c)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{V} \cdot \nabla T, \tag{7}$$

donde:

$$(\rho c)_{ef} = (1 - \phi) (\rho c)_s + \phi (\rho c)_f, \tag{8}$$

$$k_{ef} = (1 - \phi) k_s + \phi k_f, \tag{9}$$

$$\dot{q}_{ef} = (1 - \phi) \dot{q}_s + \phi \dot{q}_f = 0. \tag{10}$$

Con esto se tiene solo una ecuación que modela el medio poroso como un medio continuo con propiedades globales. El subíndice “*ef*” denota propiedades termofísicas efectivas.

Para el caso de este trabajo no se considera generación de calor, $\dot{q} = 0$, y la velocidad del fluido en el poro se considera muy pequeña $\vec{V} \approx 0$. Lo anterior, aunado a las condiciones de frontera planteadas en la Figura 2 hacen que la ecuación (7) puede escribirse como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{(\rho c)_{ef}}{k_{ef}} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{ef} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (11)$$

Donde α_{ef} es la difusividad térmica efectiva. Con las condiciones: $\frac{\partial T(L,t)}{\partial y} = 0$, $T(y, 0) = T_0$ y para el caso a) $T(0, t) = T_w$ y para el caso (b) y $-k_s \frac{\partial T(0,t)}{\partial y} = \dot{q}_w$.

Esta ecuación es ahora unidireccional transitoria, que es la ventaja del enfoque LTE y debe ser resuelta para las condiciones de frontera establecidas.

Difusión térmica efectiva para el caso estudiado

El medio poroso simulado lo constituye una matriz sólida de aluminio con los poros llenos de aire. La Tabla 2 muestra las propiedades de estos materiales:

Tabla 2

Propiedades de los materiales del elemento simulado.

	k (W/m K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg K)
Aluminio 1060	200	2700	900
Aire	0.024	1	800

De esta manera las variables para las ecuaciones (8) y (9) quedan como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Valores de las propiedades de las fases sólida y fluida.

k_s	=	200	W/m K
$(\rho c)_s$	=	243 x10 ⁴	J/m ³ K
k_f	=	0.024	W/m K
$(\rho c)_f$	=	800	J/m ³ K

Se puede observar en la Tabla 3 la diferencia en órdenes magnitud que existe entre los valores para la fase sólida y la fase fluida. Por tanto, se prevé que las propiedades efectivas sean dominadas por las propiedades de la fase sólida. Lo anterior hace pensar en que el modelo para las diferencias finitas puede aproximarse utilizando los valores de las propiedades de la fase sólida y los valores de la porosidad como únicos parámetros para calcular la difusividad térmica efectiva. Sustituyendo los valores de la Tabla 3 y utilizando un valor de $\phi = 0.375$ en las ecuaciones (7) y (8) se tiene que $(\rho c)_{ef} = 1.51 \times 10^6$ J/m³ K y $k_{ef} = 124$ W/m K. Si se calculan las propiedades efectivas utilizando únicamente los valores de la matriz sólida de tienen prácticamente los mismos valores, es decir:

$$(\rho c)_{ef} \cong (1 - \phi)(\rho c)_s \quad (12)$$

y

$$k_{ef} \cong (1 - \phi)k_s \quad (13)$$

El problema con las ecuaciones (12) y (13) es que si solo se toman esos valores, la difusividad térmica efectiva se reduce a la difusividad térmica de la matriz sólida.

$$\alpha_{ef} = \frac{(\rho c)_{ef}}{k_{ef}} \cong \frac{(1-\phi)(\rho c)_s}{(1-\phi)k_s} = \alpha_s \quad (14)$$

Tomarlo de esta manera es incorrecto dado que la porosidad afecta el comportamiento del medio. Como alternativa se puede establecer que la difusividad térmica efectiva depende del valor $(1 - \phi)$ y de manera semejante a las ecuaciones (12) y (13) se proponen dos alternativas para la difusividad térmica efectiva. La primera siendo proporcional al término $(1 - \phi)$ de la forma:

$$\alpha_{ef} = \alpha_s (1 - \phi), \quad (15)$$

y la segunda siendo inversamente proporcional al mismo término en la forma:

$$\alpha_{ef} = \frac{\alpha_s}{(1-\phi)}. \quad (16)$$

Con el fin de evaluar cuál de las opciones es la más idónea para calcular α_{ef} , ambas ecuaciones se utilizan para resolver la ecuación (11) mediante diferencias finitas. Con esto se pretende tener:

- La evolución temporal de la temperatura en algún punto de la geometría.
- La distribución espacial de la temperatura a través de la longitud del elemento en un tiempo determinado.

Resultados

Tanto para el caso de temperatura constante en la base como para flujo de calor constante, se tomó un elemento con $L = 0.182 \text{ m}$ y temperatura inicial $T_0 = 20 \text{ °C}$. Para el caso de temperatura constante en la base se tomó $T_w = 100 \text{ °C}$ y para el caso de flujo de calor constante en la base se tomó $\dot{q}_w = 12 \text{ kW/m}^2$. Estos parámetros se utilizaron tanto en la solución de la ecuación (11) como en el estudio con elemento finito.

Temperatura constante en la base

La Figura 4 muestra la evolución temporal de la temperatura en el extremo de la placa, $y=L$, tanto para la simulación en elemento finito como para la simulación en diferencias finitas. Para esta última se muestra la evolución utilizando las ecuaciones (15) y (16) para calcular la difusividad térmica efectiva. Para el caso de la placa sólida, $\phi = 0$, tanto la simulación de elemento finito como las ecuaciones (15) y (16) tienen una gran coincidencia. Sin embargo, conforme la porosidad aumenta, las diferencias entre una y otra ecuación son más evidentes. Para $\phi = 0.375$ es claro que la ecuación (15) modela de manera más precisa la evolución temporal de la temperatura, existiendo mínimas diferencias entre la simulación de elemento finito y la solución de la ecuación (11). El uso de la ecuación (16) indica que el medio poroso tiene una mayor difusividad térmica que el sólido, dado que el extremo de la placa se calienta más rápido. De cierta manera esto resulta contraintuitivo, ya que los espacios ocupados por el fluido reducen la capacidad del material para conducir la energía y provocan que este se comporte más como aislante. Este comportamiento de tipo aislante lo representa de manera adecuada el uso de la ecuación (15).

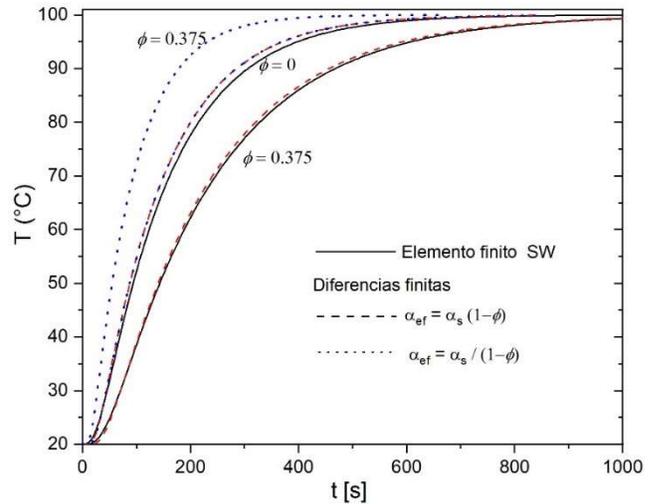


Figura 4. Evolución temporal de la temperatura en el extremo del elemento para los valores extremos de la porosidad.

La coincidencia entre la ecuación (11) y los resultados para elemento finito se aprecia mejor en la Figura 5, donde se hace un acercamiento a la parte central. En esta figura se puede observar cómo es que, a pesar de haber coincidencia en la tendencia, las gráficas muestran diferencia significativa para los valores intermedios de la porosidad, $0 < \phi < 0.375$. Es notable que la cuarta iteración sea la que mayor semejanza tenga con los resultados para elemento finito y por tanto, es razonable suponer que la siguiente iteración presentaría una mayor coincidencia. Aunque como se mencionó arriba, el comportamiento del medio po-

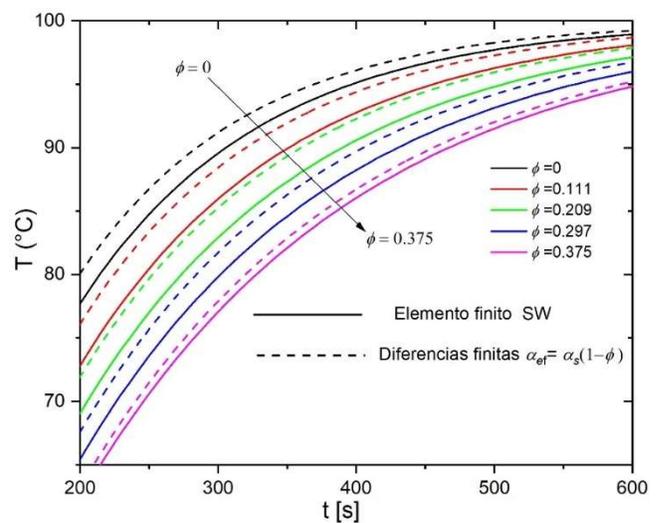


Figura 5. Efecto de la porosidad en la evolución temporal de la temperatura para las simulaciones con elemento finito y las simulaciones con diferencias finitas.

roso como medio aislante es esperado, la Figura 5 proporciona una manera de ver el comportamiento del medio modelado y del error que se tiene al suponer difusividades efectivas con la ecuación (15) en función de la porosidad del medio utilizado.

Dado que se tiene el propósito de evaluar la distribución espacial y con el fin de tener una comparación más adecuada entre las simulaciones, en lugar de tomar la distribución espacial de la temperatura para un tiempo específico para todas las simulaciones, se toman las distribuciones espaciales para un tiempo t , tal que en ese tiempo la temperatura en el punto $y = L$, alcanza un valor predeterminado. Se toman tres valores de esta temperatura $T_1(L, t_1) = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2(L, t_2) = 60\text{ }^\circ\text{C}$, y $T_3(L, t_3) = 80\text{ }^\circ\text{C}$, estos valores son comunes tanto para los resultados con diferencias finitas como para los resultados con elemento finito. La Figura 6 muestra el perfil de distribución espacial de la solución obtenida con diferencias finitas de la ecuación (11) para los valores extremos de la porosidad. Se puede observar que no hay diferencia en los perfiles de temperatura a lo largo del elemento y por tanto valores intermedios de ϕ mostrarían exactamente los mismos perfiles. Esto es natural, dado que la ecuación (11) modela un sólido homogéneo y la difusividad térmica efectiva solo afecta el tiempo en que se alcanza la temperatura establecida, por lo que la distribución espacial de la temperatura no cambia.

Sin embargo, para la distribución espacial del sólido obtenida por elemento finito, si se tienen notables diferencias para cada valor de la porosidad. En la

Figura 7 se puede apreciar que el perfil de temperaturas a lo largo del medio poroso cambia con la porosidad. Esta diferencia en la distribución espacial disminuye a medida que se alcanza la temperatura de la pared, y es más evidente al inicio del fenómeno. También puede observarse en la misma figura que las distribuciones espaciales para la solución con diferencias finitas y para los datos con elemento finito son prácticamente iguales en el caso de un sólido homogéneo, $\phi = 0$. La Figura 8 muestra los perfiles de temperatura espaciales para $T_1(L, t_1) = 40\text{ }^\circ\text{C}$ y todos los valores de la porosidad, obtenidos de la simulación con elemento finito. Como se mencionó anteriormente, la diferencia en los perfiles espaciales de temperatura cambian con el valor de la porosidad, sin embargo, como puede observarse en la Figura 8, estas diferencias parecen estabilizarse al llegar a un valor de porosidad de $\phi = 0.209$. Esto tiene sentido si se considera que para valores de porosidad $\phi < 0.209$ la geometría presenta irregularidades muy marcadas (Fig. 3) y valores mayores de porosidad implican una geometría más “homogénea”.

Flujo de calor constante

La Figura 9 muestra la evolución temporal de la temperatura en el punto $y = L$ para el caso de flujo de calor constante. Se muestran los perfiles para los datos de la simulación con elemento finito, así como los resultados de diferencias finitas. Puede observarse que, en el caso del elemento sólido, las tres curvas tienen la misma tendencia, sin embargo, para el valor

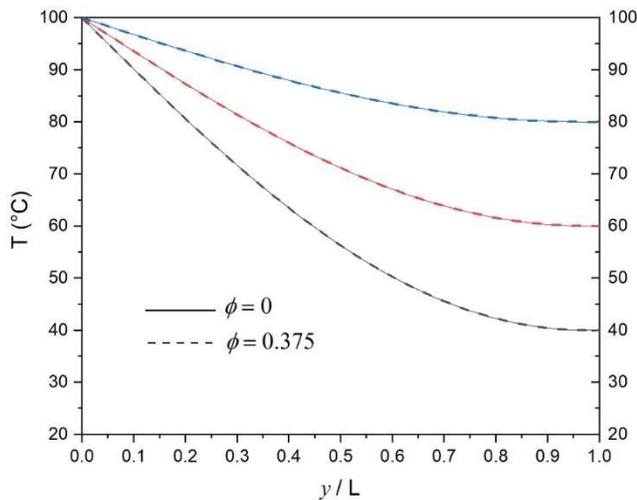


Figura 6. Distribución espacial de la temperatura a lo largo de elemento obtenida con diferencias finitas utilizando las ecuaciones (11) y (15).

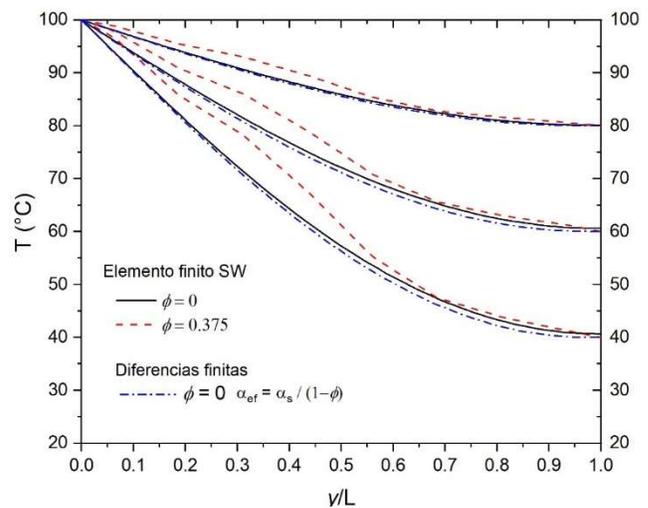


Figura 7. Perfil de temperatura a lo largo del medio poroso para las simulaciones de elemento finito y diferencias finitas.

más alto de la porosidad, $\phi = 0.375$, existe una gran diferencia entre la solución que utiliza la ecuación (15) y la solución correspondiente a la ecuación (16). En este caso, dadas las condiciones, la temperatura nunca llegaría a un estado estacionario y seguiría aumentando indefinidamente con el tiempo. Por tanto, la gráfica muestra un total de 1000 segundos, tiempo durante el cual el punto $y = L$ del sólido, $\phi = 0$, alcanza una temperatura aproximada de 50 °C. Puede observarse en la Figura 9 que, para la porosidad más alta, este tiempo se reduce a casi a la mitad y dicho punto alcanza esa temperatura en aproximadamente 600 segundos, que es similar al tiempo que se tiene con la curva asociada a la ecuación (16). Por otro lado, la ecuación (15) incrementa este tiempo haciendo que en los 1000 s de la gráfica, el valor de la temperatura solamente alcance los 37.5 °C. Tomando como referencia la tendencia marcada por la simulación en elemento finito es claro que la ecuación (16) aproxima de manera más adecuada el efecto de la porosidad en el flujo de calor del medio poroso.

La Figura 10 muestra las curvas obtenidas con la simulación de elemento finito para la geometría fractal para diferentes valores de la porosidad y la correspondiente curva obtenida con diferencias finitas. Se puede apreciar que, en todos los casos, las curvas de diferencias finitas presentan tiempos menores para alcanzar la misma temperatura que el elemento fractal. Sin embargo, observando la Figura 10 se nota que la curva para la geometría fractal y la curva de la solu-

ción de elemento finito para la misma porosidad tienen pendientes iguales y la diferencia en sus valores se debe a la evolución temporal al inicio del fenómeno, durante los primeros 150 segundos, donde de hecho las curvas obtenidas por la simulación con elemento finito tienen el mismo comportamiento.

Para analizar la distribución espacial de la temperatura, al igual que para el caso de temperatura constante, se seleccionaron los perfiles en tiempos tales que en el punto $y = L$ se alcanzaran temperaturas establecidas. Se tomaron tres perfiles para $T_1(L, t_1) = 30$ °C, $T_2(L, t_2) = 40$ °C, y $T_3(L, t_3) = 50$ °C. La Figura 11 muestra este perfil de temperaturas a lo largo de la pieza para estas tres temperaturas. En esta gráfica se puede observar que el perfil resultante de la simulación con diferencias finitas es idéntico para los dos valores extremos de la porosidad, lo que indica que dicho perfil no depende de este parámetro. Los perfiles antes mencionados a su vez coinciden con el perfil que se obtiene para la simulación con elemento finito correspondiente al sólido, $\phi = 0$.

Por otra parte, la Figura 12 muestra que los perfiles de temperatura a lo largo de la geometría fractal simulada en elemento finito dependen de la porosidad. Se observa que la diferencia de temperatura entre un extremo y el otro del fractal aumenta conforme se incrementa la porosidad ϕ . Sin embargo, esta diferencia es constante para las tres temperaturas tomadas, es decir que se mantiene a lo largo del tiempo. También se observa que las mayores diferencias entre los perfiles para cada valor de porosidad son especialmente

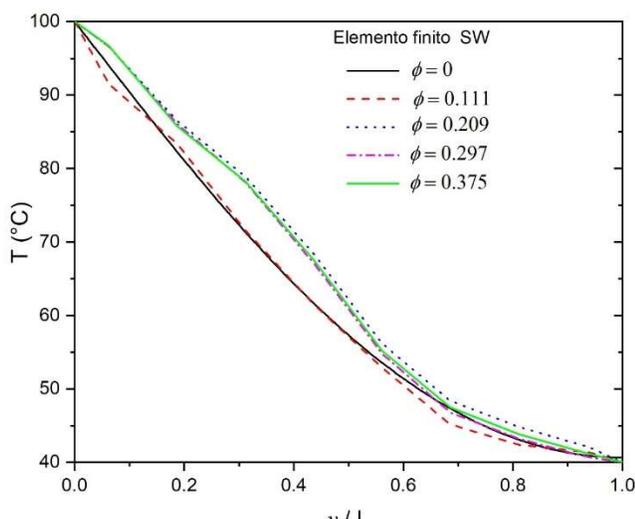


Figura 8. Perfil de temperaturas para diferentes valores de la porosidad cuando se alcanza una temperatura de 40 °C en el extremo del elemento.

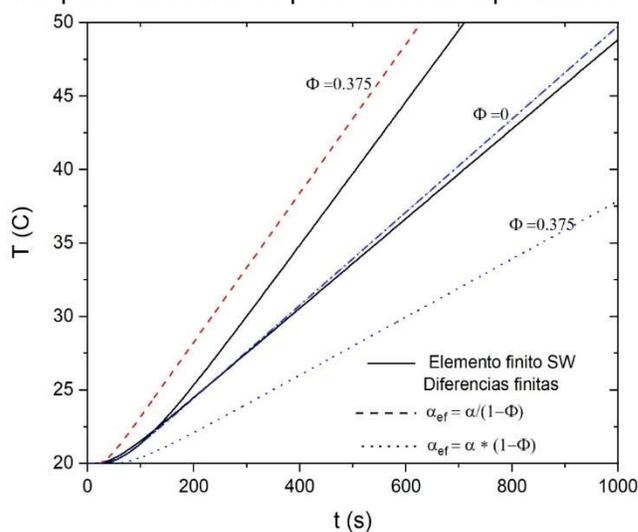


Figura 9. Evolución temporal de la temperatura en el extremo del elemento.

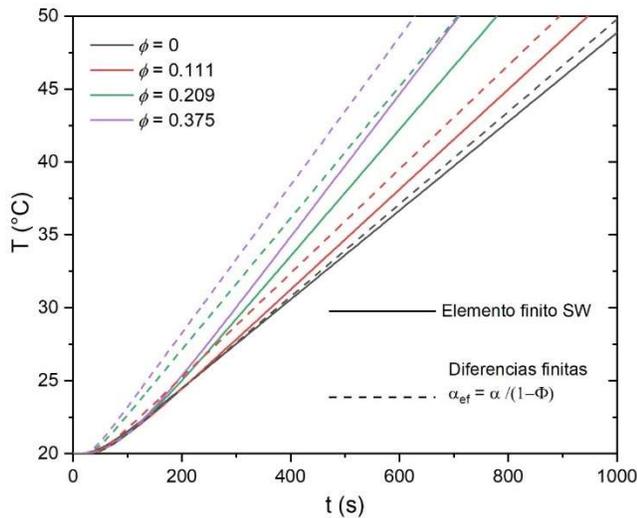


Figura 10. Evolución temporal de la temperatura para diferentes valores de la porosidad.

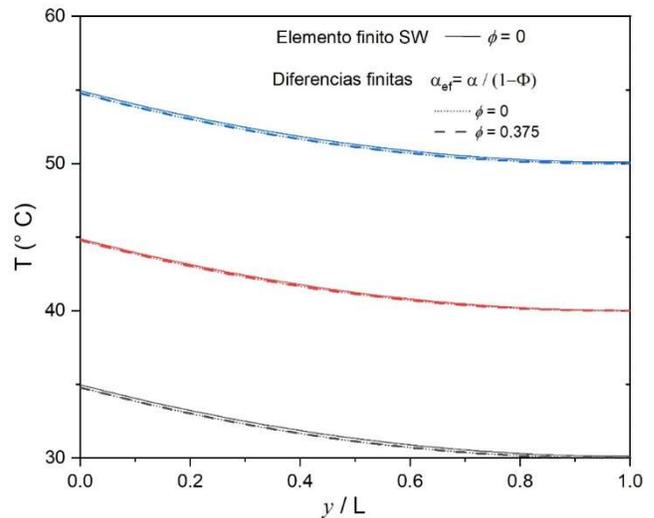


Figura 11. Distribución espacial de la temperatura en para el caso de flujo de calor constante.

marcadas hasta la posición $y/L = 0.6$, después de esa distancia la diferencia entre cada perfil es mínima. La Figura 13 muestra la diferencia de temperaturas entre extremos del fractal a lo largo de su longitud. Se observa que para un valor de $\phi = 0$ la diferencia es de solo 5 °C mientras que para un valor de $\phi = 0.375$ esta diferencia aumenta hasta los 12 °C. Como se mencionó en líneas anteriores, los perfiles indican que los gradientes de temperatura en la pared sujeta al flujo de calor son mayores que en el extremo opuesto, incrementándose dichos gradientes con la porosidad.

Conclusiones

En este trabajo se presentó la comparación entre los resultados de la simulación en elemento finito de una geometría fractal y los resultados de simulaciones en diferencias finitas para el estado transitorio utilizando el enfoque LTE para medios porosos. Se obtuvieron los perfiles temporal y espacial de la temperatura para un elemento cuadrado aislado en tres de sus fronteras y con condiciones de temperatura y de flujo de calor constante en la restante. Los resultados de las simulaciones utilizando diferencias finitas se obtuvieron para dos planteamientos del cálculo de la difusividad térmica efectiva. Después de analizar los resultados se tienen las siguientes conclusiones:

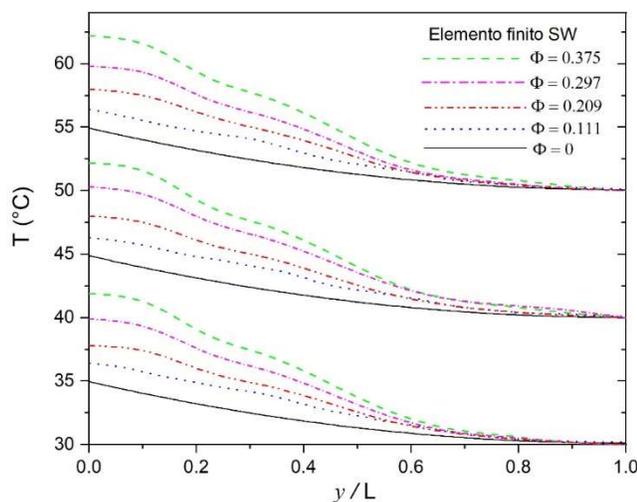


Figura 12. Perfil de temperatura a lo largo del fractal para diferentes porosidades.

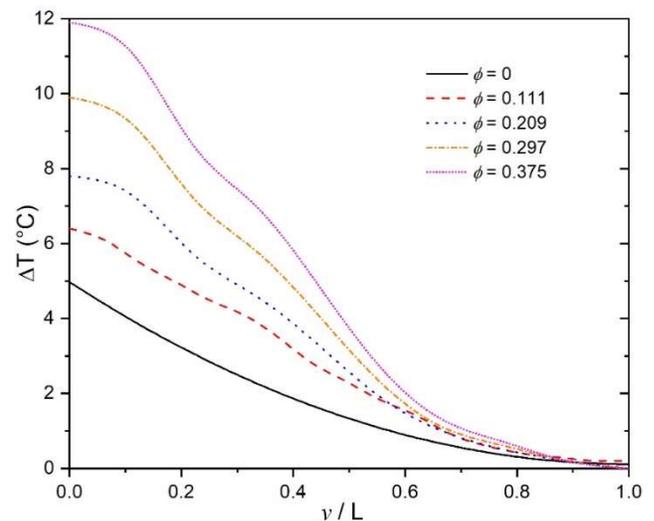


Figura 13. Diferencia de temperatura entre los extremos del fractal para diferentes porosidades.

1. Para la condición de temperatura constante, la ecuación que modela el fenómeno de manera más adecuada es el que utiliza la ecuación (15) para calcular la difusividad efectiva como función de la porosidad. La evolución temporal de la temperatura obtenida utilizando dicha ecuación tiene buena coincidencia con los resultados de la simulación de elemento finito. Es importante notar que la coincidencia es mejor conforme aumenta la porosidad del medio. La distribución espacial, por otro lado, no presenta tan buena coincidencia, dado que los resultados con diferencias finitas muestran un perfil constante, correspondiente a un medio homogéneo y los resultados de la simulación de elemento finito muestran irregularidades en el perfil debidas a las irregularidades propias del elemento fractal.
2. Con base en estos resultados, puede decirse que la ecuación (15) puede ser utilizada para calcular la difusividad térmica efectiva cuando se quiere modelar el estado transitorio de transferencia de calor de una geometría fractal del tipo alfombra de Sierpinsky, sujeta a condiciones de temperatura constante.
3. Para la condición de flujo de calor constante, se tiene que la ecuación que mejor representa la evolución temporal de la temperatura es la ecuación (16), donde las curvas del estado transitorio obtenidas con diferencias finitas muestran una buena coincidencia con aquellas obtenidas con elemento finito para la misma condición. Sin embargo, las simulaciones hechas con diferencias finitas no reflejan la distribución espacial ni los gradientes de temperatura presentes en los resultados obtenidos con la simulación de elemento finito.
4. Con base en los resultados se puede concluir que la ecuación (16) es adecuada para modelar la evolución temporal de la temperatura para una geometría fractal del tipo carpeta de Sierpinski bajo condiciones de flujo de calor constante.

Los puntos anteriores, indican que el modelado del estado transitorio de un medio poroso de tipo alfombra de Sierpinsky, depende de las condiciones que se tengan en el fenómeno. Condiciones de temperatura y calor constantes no se pueden modelar utilizando la misma difusividad efectiva, es decir, a pesar de que sea la misma geometría y misma

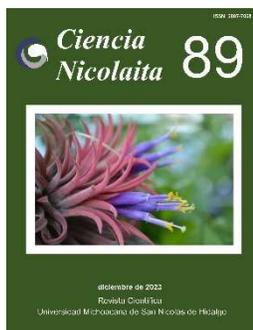
porosidad, el hecho de cambiar las condiciones de frontera requiere un cambio de las ecuaciones utilizadas. Los resultados muestran, que de hecho, el utilizar una u otra ecuación produce resultados no solo erróneos, sino con el comportamiento opuesto. El utilizar el modelo de difusividad efectiva adecuado produce buenos resultados y los fenómenos transitorios en medios porosos de tipo alfombra de Sierpinsky, se pueden reproducir de manera adecuada.

Referencias

- Al-Nimr, M., Abu-Hijleh, B. 2002. Validation of thermal equilibrium assumption in transient forced convection flow in porous channel. *Transp. Porous Media*, 49:127-138.
- Deng, Z., Liu, X., Huang, Y., Zhang, C., Chen, Y. 2017. Heat conduction in porous media characterized by fractal geometry. *Energies*, 10(8):1230.
- Falconer, K. 1997. *Techniques in Fractal Geometr.* Chichester, UK: Wiley.
- Feng, Y., Yu, B., Zou, M., Xu, P. 2007. A generalized model for the effective thermal conductivity of unsaturated porous media based on self-similarity. *J. Porous Media*, 10:551-56.
- Jeng, T., Tzeng, S., Lin, Y. 2015. Experimental study of heat transfer enhancement of inserted LED lamp by the closed-cell aluminum-foam ceiling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66:233-239.
- Kovacik, J., Spanielka, J., Dvorak, T., Oslanec, P., Jr, Jerz, J. 2017. Closed cell aluminum foams with phase change material. *Metallic Foams*, 1(1):42-48.
- Liang, L., Boming, Y., Xiangfeng, Z. 2014. Numerical simulation of tortuosity for fluid flow in two-dimensional pore fractal models of porous media. *Fractals*, 22(4):1-7.
- Lu, G., Su, B., Li, Z., Wang, Z., Song, W. 2014. Thermal properties of closed-cell aluminum foam with circular pores. *Thermal Science*, 18(5):1619-1624.
- Ma, Q., Chen, Z. (2015). Lattice Boltzmann simulation of multicomponent noncontinuum diffusion in fractal porous structures. *Phys. Rev. E*, 92:013025.
- Nakayama, A., Kuwahara, F., Sugiyama, M., Xu, G. 2001. A two-energy equation model for conduction and convection in porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44(22):4375-4379.



- Ohsenbrugge, C., Marth, W., de Sosa, I., Drossel, W., Voigt, A. 2016. Reduced material model for closed cell metal foam infiltrated with phase change material based on high resolution numerical studies. *Applied Thermal Engineering*, 94:505-512.
- Quintard, M., Whitaker, S. 1995. Local thermal equilibrium for transient heat conduction: theory and comparison with numerical experiments. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38:2779–2796.
- Tarafdar, S., Franz, A., Schulzky, C., Hoffmann, K. 2000. Modelling porous structures by repeated Sierpinski carpets. *Physica A*, 292:1–8.
- Williams, J., Dawe, R. 1986. Fractals – an overview of potential applications to transport in porous media. *Transport Porous Med* 1:201–209.
- Yu, B., Cheng, P. 2002. Fractal models for the effective thermal conductivity of bidispersed porous media. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 16:22–29.
- Zhu, X., Ai, S., Lu, X., Ling, X., Zhu, L. 2014. Thermal conductivity of closed-cell aluminum foam based on the 3D geometrical reconstruction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72:242-249.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Diseño térmico, mecánico y simulación estructural de un evaporador del tipo coraza y tubos para aplicaciones de baja temperatura en un Ciclo Rankine Orgánico

Thermal, mechanical design and structural simulation of a shell and tube evaporator for low temperature applications in an Organic Rankine Cycle

Luis Enrique Muro Teruel*, Víctor Manuel Ambriz Díaz, Óscar Arturo Chávez López, Israel Rosas Yescas y José Eduardo Acosta Cano de los Ríos

Para citar este artículo: Muro Teruel Luis Enrique, Ambriz Díaz Víctor Manuel, Chávez López Óscar Arturo, Rosas Yescas Israel y Acosta Cano de los Ríos José Eduardo, 2023. Diseño térmico, mecánico y simulación estructural de un evaporador del tipo coraza y tubos para aplicaciones de baja temperatura en un Ciclo Rankine Orgánico. Ciencia Nicolaita no. 89, 140-153. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.701>



Historial del artículo:

Recibido: 15 de diciembre de 2022

Aceptado: 8 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: lmuro0436@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Diseño térmico, mecánico y simulación estructural de un evaporador del tipo coraza y tubos para aplicaciones de baja temperatura en un Ciclo Rankine Orgánico

Thermal, mechanical design and structural simulation of a shell and tube evaporator for low temperature applications in an Organic Rankine Cycle

Luis Enrique Muro Teruel, Víctor Manuel Ambriz Díaz, Óscar Arturo Chávez López, Israel Rosas Yescas y José Eduardo Acosta Cano de los Ríos

Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, 31310, Chihuahua, México

Resumen

El evaporador es el componente del Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que aprovecha la energía térmica para activar el ciclo. Se muestra el procedimiento para el diseño térmico y mecánico de un evaporador de coraza y tubos de un ORC activado con una fuente de energía térmica de baja temperatura, tal es el caso del agua de un pozo geotérmico de 120 °C. Se utilizaron la primera ley de la termodinámica y el método DMLT para el modelado térmico, y se evalúa el desempeño estructural del diseño mediante simulación numérica. Los resultados muestran un evaporador de 50 tubos de cobre de 1", que trabaja a una tasa de 206.7 kW y produce una potencia de 16.96 kW.

Palabras clave: evaporador, coraza y tubos, diseño, simulación, Ciclo Rankine Orgánico.

Abstract

The evaporator is one component of an Organic Rankine Cycle (ORC), which employs the thermal energy to activate the cycle. This article shows the process for the thermal and mechanical design of a shell and tube evaporator for an ORC activated by a low temperature heat source, such as water from a geothermal reservoir at 120 °C. The first law of thermodynamics and LMDT method are employed for model the thermal behavior and the structural behavior is evaluated using numerical simulation. The results show an evaporator of 50 cooper tubes of 1", which works at a rate of 206.7 kW, and produces 16.96 kW of power.

Keywords: evaporator, shell and tubes, design, simulation, Organic Rankine Cycle.

1. Introducción

De acuerdo con estudios realizados por la British Petroleum (2022), el consumo global de energía aumentó un 5.8 % en 2021, y se espera que siga creciendo. Del consumo global de energía de este mismo año, 82 % fue producida por combustibles fósiles; este hecho, aunado al crecimiento en la demanda, se manifiesta en un progresivo aumento del costo de producción, así como en una creciente necesidad de buscar alternativas a los combustibles fósiles frente a la crisis climática.

Con el panorama anterior, hay un interés creciente en diseñar nuevas formas de aprovechar fuentes de energía térmica de media y baja temperatura, así como en técnicas de aprovechamiento de calor residual. Se estima que alrededor del 50 % de la energía producida a nivel mundial se pierde en forma de calor (Mahmoudi *et al.*, 2018), de manera que existe un desaprovechamiento considerable, que podría ser empleado para suplir necesidades domésticas. Por ejemplo, de acuerdo con un estudio realizado por Manz *et al.* (2021) en la unión europea, alrededor de 230 PJ anuales de calor residual pueden ser potencialmente empleados para calefacción en hogares y comercios, con lo cual se supliría el 17 % de la demanda de calefacción. Entre los sectores con mayor desperdicio de calor, y mayor potencial para ser fuentes de calor residual, se encuentran la industria cementera, de vidrio, del acero, la agraria y la papelera (Cruz *et al.*, 2022).

El Ciclo Rankine Orgánico (ORC), emerge como una propuesta prometedora para dichos fines. El ORC es un ciclo termodinámico que se caracteriza por que el fluido de trabajo (generalmente una sustancia orgánica) tiene un bajo punto de ebullición, por lo que es adecuado para aplicaciones de baja y media temperatura (Zhao *et al.*, 2020). Una de las ventajas del ORC sobre el Ciclo Rankine Convencional, es que permite diseños más compactos.

Durante los últimos años, el ORC ha comenzado a tener diversas aplicaciones, principalmente en técnicas de recuperación de calor residual de algunas industrias, así como en el aprovechamiento de energía geotérmica, solar y de biomasa (Tartière y Astolfi,

2017). Particularmente, en el sector de la energía geotérmica es donde ha tenido mayor auge, debido a que, a diferencia del resto de energías limpias, la geotérmica no es intermitente; además, produce pérdidas considerables de calor, que, de no ser tratadas adecuadamente, producirían contaminación térmica en el ambiente circundante (Nigusse *et al.*, 2014). En el caso de México, sólo el 2 % de la energía producida al año es de origen geotérmico, sin embargo, se han reconocido por lo menos 11 provincias con reservorios cuya explotación es viable en términos económicos (Prol-Ledesma y Morán-Zenteno, 2019); esto representa un área de oportunidad para cumplir los objetivos del acuerdo de París de reducir las emisiones de dióxido de carbono, así como para garantizar el acceso a la energía en determinadas comunidades.

Debido a la gran cantidad de parámetros que intervienen en el desempeño del ORC, diversas técnicas se han aplicado en años recientes para optimizar el rendimiento del ciclo. Muchas son las variables que intervienen en la eficacia del ORC, pero el componente fundamental del ciclo es el evaporador, pues determina la cantidad de energía que entra al sistema (Zhang *et al.*, 2021). Dentro de los parámetros que más influencia poseen en el desempeño del evaporador, y por ende del ciclo, se encuentran las temperaturas de entrada y salida, y la presión de evaporación (Ping *et al.*, 2022).

Existen diversos tipos de evaporadores, sin embargo, los más comunes en aplicaciones de ORC, son los evaporadores de coraza y tubos, gracias a la facilidad de manufactura de los mismos, así como a las pocas limitaciones en la temperatura y presión de operación (Hadidi *et al.*, 2013). Este tipo de evaporadores son diseñados mediante la técnica DMLT (Diferencia Media Logarítmica de Temperatura), a partir de la cual se estima el área de transferencia de calor del evaporador (Holman, 1999).

Ante la crisis climática y la necesidad de dar una mayor accesibilidad a los recursos energéticos, se vuelve una necesidad indagar en el diseño de ciclos termodinámicos y de sus componentes. El presente trabajo muestra el diseño, tanto térmico como mecánico, de un evaporador de coraza y tubos para un Ciclo Rankine Orgánico de baja temperatura, cuyo fluido de

trabajo es el refrigerante R134a, y cuyo recurso calorífico es agua extraída de un pozo geotérmico. El objetivo es mostrar el procedimiento y los cálculos requeridos para el diseño de esta clase de dispositivos, con vista en una futura construcción del mismo.

2. Descripciones y métodos

2.1. Descripciones para el análisis

Existen distintas configuraciones para el Ciclo Rankine Orgánico. La más tradicional se conforma de cuatro componentes: una bomba, un evaporador, una turbina y un condensador (Ahmadi *et al.*, 2020). Tal como se aprecia en la Figura 1a, el fluido de trabajo es bombeado a la región de alta presión (proceso 5-6); pasa luego al evaporador, donde el fluido se calienta hasta cambiar a fase gaseosa (proceso 6-3) gracias al calor suministrado por algún recurso térmico, generalmente otro fluido a alta temperatura (proceso 1-2); el gas que sale del evaporador es conducido a la turbina, la cual aprovecha la expansión del gas y la convierte en trabajo mecánico (proceso 3-4); el gas a baja presión que sale de la turbina, pasa por el condensador, donde se le retira calor hasta cambiar a fase líquida nuevamente (proceso 4-5) (Carraro *et al.*, 2021). La Figura 1b, muestra el ciclo ORC, plasmado en un diagrama T-s. Idealmente, el proceso de bombeo y de expansión del fluido de trabajo (procesos 5-6 y 3-4) deberían ocurrir a temperatura constante, sin

embargo, dado que la bomba y la turbina tienen una determinada eficiencia, hay pérdidas de energía debidas a las irreversibilidades termodinámicas ocurridas en estos componentes, tal y como se muestra a través de las líneas punteadas en la Figura 1b.

2.2. Descripción a detalle del evaporador

Un evaporador de coraza y tubos es un intercambiador de calor, consiste en una coraza dentro de la cual se coloca un arreglo de tubos paralelos; un fluido con una determinada temperatura fluye dentro de los tubos, en tanto que otro, a distinta temperatura, fluye alrededor de éstos, de manera que ambos intercambian calor por efecto de la conducción y la convección (Fetuga *et al.*, 2022). La Figura 2, muestra una vista esquemática de un evaporador de coraza y tubos.

Diversos parámetros influyen en el desempeño de los evaporadores, tales como cuestiones geométricas, parámetros de operación, y las propiedades del fluido de trabajo; dentro de los fluidos de trabajo más comunes en intercambiadores de calor, se encuentran el agua, etilenglicol (Slimene *et al.*, 2022), nanofluidos como óxidos de cobre (Cruz *et al.*, 2022), titanio y aluminio (Jassim y Ahmed, 2021), y algunos refrigerantes (Kurose *et al.*, 2021). Algunas técnicas comunes para incrementar la transferencia de calor por convección, son incrementar la velocidad de flujo del fluido de trabajo, incrementar el área de contacto entre el fluido y los tubos, e inducir perturbaciones en el flujo, ya sea

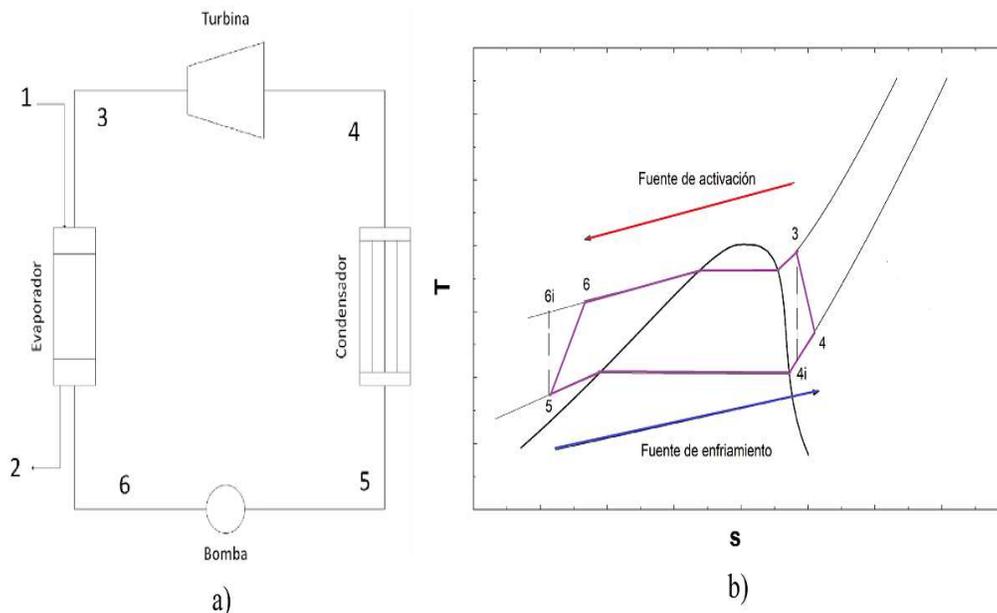


Figura 1. a) Esquema de un ciclo ORC convencional. b) Diagrama T-s del ciclo ORC, el subíndice “i” en los números 4 y 6, denota el estado ideal.

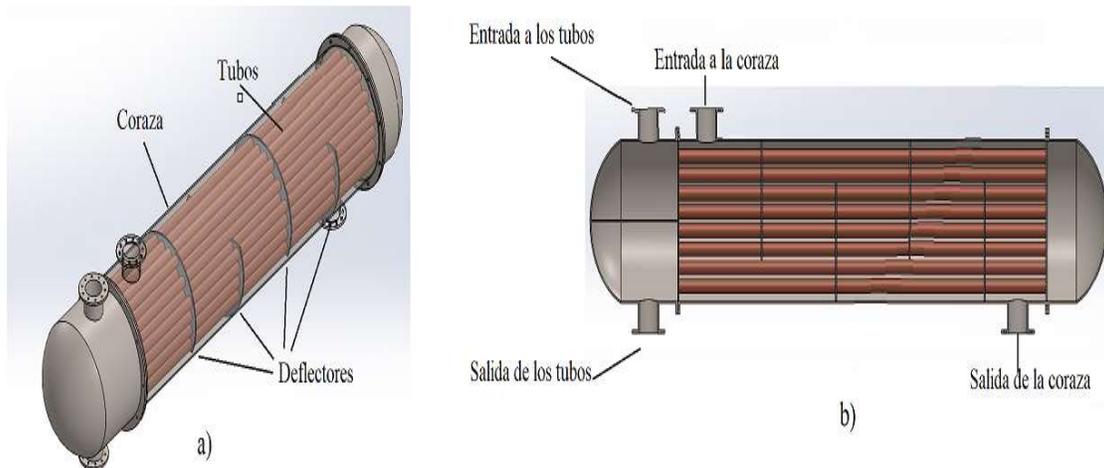


Figura 2. a) Evaporador de coraza y tubos. b) Vista lateral seccionada del evaporador.

mediante la rugosidad de la superficie de los tubos, o añadiendo elementos tales como deflectores (Warghat y Jagdale, 2020).

Numerosas investigaciones se han hecho para determinar el efecto de los deflectores en la transferencia calor de intercambiadores de coraza y tubos. De acuerdo con los estudios realizados por Ozden *et al.* (2010), la tasa de transferencia de calor incrementa junto con el número de deflectores. Amberkar *et al.* (2016) realizaron un estudio similar, en el que probaron el efecto de distintas configuraciones de deflectores en la transferencia de calor; llegaron a una conclusión similar, en la cual, la reducción del espacio entre los deflectores incrementa la tasa de transferencia de calor, además de que determinaron que los deflectores de segmentación simple tienen mejor desempeño térmico que los deflectores de segmentado doble y que los deflectores helicoidales, pero al precio de una mayor caída de presión. Otro parámetro importante de los deflectores, es el porcentaje de corte, es decir, el porcentaje de área por el que circula libremente el fluido en la coraza. Kumerasan *et al.* (2018) estudiaron el efecto del porcentaje de corte y la inclinación de deflectores de segmentación simple, determinando que, a menor porcentaje de corte, si bien se tiene una mayor caída de presión, se tiene un mejor desempeño térmico, pues los cambios abruptos de dirección del flujo intensifican la turbulencia.

2.3. Métodos

2.3.1. Diseño térmico

Consideraciones para el diseño térmico

Para el diseño térmico del evaporador, se tomarán en cuenta los siguientes datos de entrada: el recurso calorífico es agua obtenida de un pozo geotérmico, a una temperatura de 120 °C y a una tasa de 10 kg/s, misma que sale del evaporador a una temperatura de 100 °C; el fluido de trabajo para el ciclo ORC es refrigerante R134a, el cual es evaporado y calentado hasta una temperatura de 90 °C; se considera que la turbina tiene una eficiencia del 75 %, y la bomba tiene una eficiencia del 75 %. La Figura 3, resume los datos de entrada para el diseño del evaporador.

Modelado térmico

La primera ley de la termodinámica establece que:

$$\frac{dE}{dt} = 0, \tag{1}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) + \sum_s \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = 0, \tag{2}$$

donde los subíndices *e* y *s* representan la entrada y la salida del evaporador, respectivamente. El evaporador no recibe calor ninguna fuente externa, ni tampoco genera trabajo; de la misma manera, no existen cambios de altura ni de velocidad considerables, por lo que la ecuación (2) se reduce a:

$$\sum_e \dot{m}h - \sum_s \dot{m}h = 0. \tag{3}$$

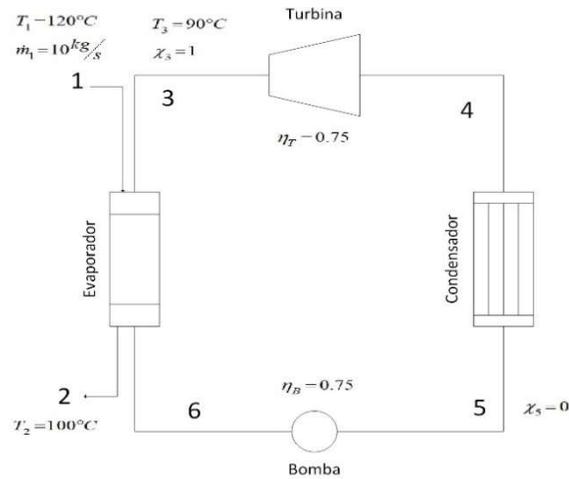


Figura 3. Datos de entrada para el diseño del evaporador.

El calor que recibe el refrigerante en los tubos del evaporador, debe ser igual al calor que pierde el agua del pozo geotérmico, por ende:

$$\dot{m}_{R134a}(h_3 - h_6) = \dot{m}_{Agua}(h_1 - h_2), \quad (4)$$

A fin de obtener la tasa de transferencia de calor a la que debe trabajar el evaporador, se emplea el software EES para determinar las propiedades termodinámicas de cada uno de los estados del ciclo. Una vez determinado dicho valor, se usa la siguiente expresión para determinar el área de transferencia de calor de los tubos:

$$A = \frac{\dot{Q}_E}{U\Delta T_{ln}}, \quad (5)$$

donde ΔT_{ln} es la media logarítmica de temperatura, dada por la expresión:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - T_3) - (T_2 - T_6)}{\ln \left[\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_6} \right]}, \quad (6)$$

y U es el coeficiente global de transferencia de calor; dicho valor depende de las propiedades de los fluidos que intervienen en el evaporador, así como de la geometría del mismo. Con la finalidad de poder calcular el área de transferencia de calor, y determinar así el

diámetro y el número de tubos del evaporador, se recurre a datos experimentales para estimar el valor de U . Pate (1991) realizó un gráfico que compara el valor del coeficiente de transferencia de calor de evaporación del refrigerante R134a contra la calidad de la mezcla gas-líquido, de acuerdo con los experimentos de distintos autores. Con el fin de tener un diseño conservador, se toma el valor mínimo mostrado en la gráfica, que es de 1.2 kW/m²K.

2.3.2. Diseño Mecánico

Consideraciones para el diseño mecánico

Una vez determinada el área de transferencia de calor, se procede a seleccionar las dimensiones y características de los tubos. Para dicha tarea se emplean los estándares propuestos por la TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Association, 2019).

Procedimiento del diseño mecánico

De acuerdo con dichos estándares, el diámetro de los tubos puede estar entre ¼" y 2". Se seleccionan tubos de cobre de 1 pulgada de diámetro, con un espesor del tipo BGW 16 (correspondiente a un espesor de pared de 1.65 mm). Respecto a la longitud de los tubos, no hay grandes restricciones; con el fin de tener un diseño compacto, se elige que los tubos sean de 1 m de largo. Entonces, el número de tubos se calcula con la expresión:

$$N = \frac{A}{\pi D_i L}, \quad (7)$$

donde A es el área de transferencia de calor, D_i es el diámetro interno de los tubos, y L es el largo de los mismos. Los estándares de la TEMA también establecen que los tubos deben estar separados una distancia mínima de 1.25 veces el diámetro exterior de los tubos (medida entre los centros de los tubos).

Para el dimensionado de la coraza, se elige el diámetro de manera que contenga a los tubos en la disposición elegida en el paso anterior. Dado que el recurso térmico es agua, se decide emplear acero inoxidable como material de la coraza, y se escoge el diámetro de acuerdo con las dimensiones estándar de la ASME B36.19M (2004). La TEMA establece el espesor mínimo de la coraza en función del diámetro y el material de la misma, por lo que se selecciona una tubería con un espesor mayor. Para las boquillas de entrada y salida de la coraza, la TEMA recomienda que éstas no sobresalgan del contorno interno de la coraza. Para su dimensionado, se consideran dimensiones nominales de tubería de acero inoxidable, tomando en cuenta el mismo espesor mínimo de la coraza, y cuidando que su longitud no sea menor de 100 mm. Por otra parte, se opta por empelar bridas planas para las distintas conexiones del evaporador, las cuales se diseñan según lo establecido por el estándar ASME B16.5 (2013). Dicho estándar establece los materiales y espesores recomendados para las bridas. Adicionalmente, la TEMA recomienda que el diámetro nominal mínimo para los tornillos sea de $\frac{3}{4}$ " (M20). Para los deflectores, la TEMA establece que el corte de los deflectores debe ser cercano a la línea diametral de la coraza. El espesor y espaciado de dichos deflectores se elige de acuerdo con las recomendaciones de la TEMA. Finalmente, los cabezales se diseñan en

función de las dimensiones de la coraza, con un espesor igual al de la coraza, de acuerdo con las recomendaciones de la TEMA.

2.3.4. Simulación implementando herramientas computacionales

Consideraciones de simulación numérica estructural

Se lleva a cabo una simulación estructural. Se consideran únicamente las cargas de presión presentes en el evaporador, las cuales se calcularon en la sección de diseño térmico.

Procedimiento para la simulación numérica

Previamente a la simulación, se redondean todos los bordes rectos, a fin de evitar singularidades. Se asigna el material cobre a los tubos del evaporador, y el material acero inoxidable al resto de las piezas. Todas las conexiones en el ensamblaje son fijas. Para el mallado, se selecciona el método de barrido para los tubos y deflectores. Para el resto de componentes se emplea una malla tetraédrica con un dimensionado máximo de 20 mm, tal y como se muestra en la Figura 4.

La pared interior de los tubos, y las paredes interiores de los cabezales se someten a la presión del estado 3 y 6. Las paredes internas de la coraza, las superficies de los deflectores, y las paredes exteriores de los tubos se someten a la presión del estado 1 y 2. Se pone además un soporte fijo en las bridas de conexión del evaporador. Se calcula en este caso, la deformación total, el esfuerzo equivalente de von Mises, la deformación unitaria equivalente de von Mises, y el factor de seguridad de acuerdo con von Mises.

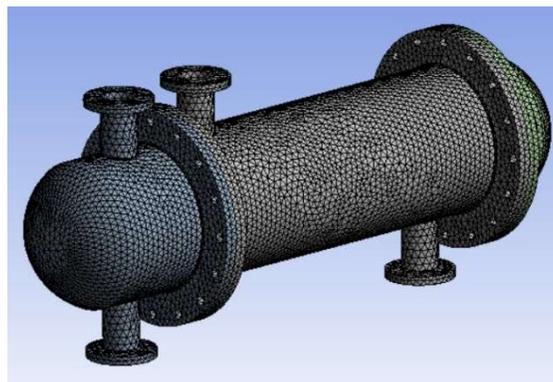


Figura 4. Mallado de la geometría.

3. Resultados y discusión

Resultados del diseño térmico

Con ayuda del software EES, se determinaron las propiedades termodinámicas de cada estado del ciclo ORC, tal y como se muestran en la Tabla 1. Con dicha información, se determinó que la tasa de transferencia de calor a la que trabaja el evaporador es de 206.7 kW, y dado que se seleccionó un coeficiente de transferencia de calor global de $1.2 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, el área de transferencia de calor necesaria para la superficie interna de los tubos es de 3.87 m^2 , de acuerdo con la ecuación (5).

De acuerdo con los parámetros de operación de la turbina y la bomba del ciclo, se determinó que la turbina es capaz de producir 20.15 kW de potencia, en tanto que la bomba consume 3.193 kW. A partir de dicha información, se determina que la potencia neta generada por el ciclo es de 16.96 kW.

Resultados del diseño mecánico

Siguiendo las recomendaciones de dimensionado de TEMA, y empleando la ecuación (7), se determinó que se requieren 50 tubos de cobre de 1" de diámetro

nominal y 1 m de largo para el evaporador, los cuales se disponen tal y como se muestra en la Figura 5.

Para la coraza se emplea tubería de acero inoxidable de diámetro nominal de 16" de cédula 40, el cual tiene un espesor de 9.53 mm (mayor al requerido por los estándares de la TEMA). Las boquillas por su parte se dimensionaron de acuerdo con las dimensiones de la tubería de acero inoxidable de 3" de cédula 40, con un espesor de pared de 5.49 mm (también mayor al requerido por la TEMA); se cuidó de igual manera, que la longitud de ambas boquillas fuese mayor a 10 mm, teniendo en este caso, una longitud aproximada de 136 mm. Todas las bridas tienen las dimensiones para brida plana especificadas por la norma ASME B16.5. El modelado de la coraza se puede apreciar en la Figura 6.

Los deflectores se cortaron lo más cercano posible a la línea diametral de la coraza, tal como muestra la Figura 7. A fin de darles un espesor mayor al requerido por la TEMA, los deflectores del evaporador tienen un espesor de 5 mm, y entre ellos existe un espaciado de 220 mm, dentro de los límites especificados por la TEMA, con lo cual, se tiene un total de 4 deflectores.

Tabla 1
Propiedades termodinámicas para el ciclo ORC.

Estado	$h \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$T [^\circ\text{C}]$	χ	$P [\text{kPa}]$	$s \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$	$\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$
1	358	120	0	800	1.527	10
2	337.3	100	0	800	1.306	
3	277.1	90	1	3247	0.8701	1.19
4	260.2	35	1	887.5	0.8884	
5	100.9	35	0	887.5	0.3714	
6	103.5	36.95	0	3247	0.3736	

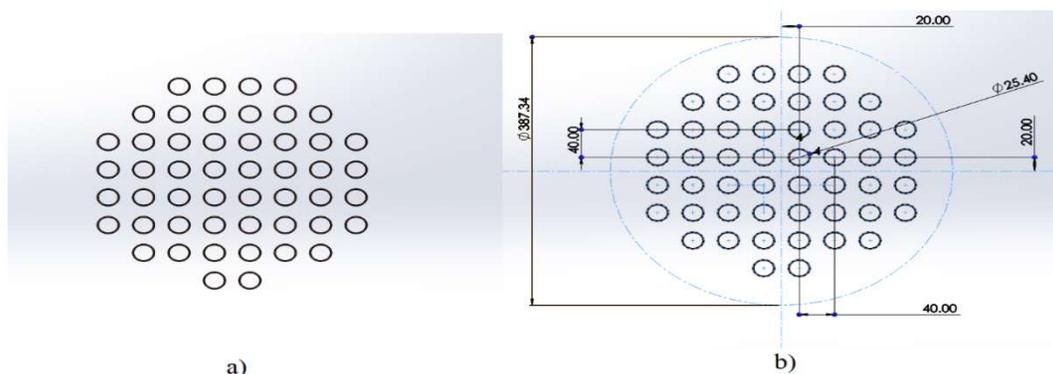


Figura 5. a) Disposición de los tubos internos del evaporador. b) Vista auxiliar con dimensiones en milímetros.

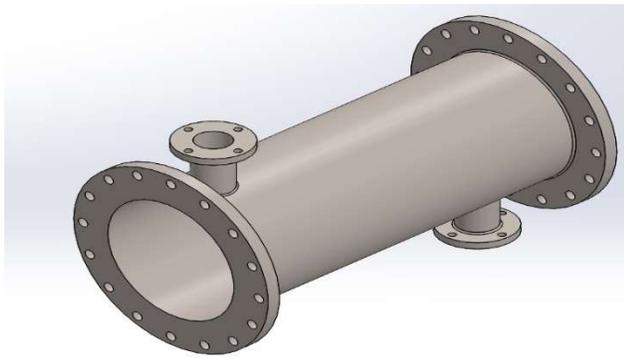


Figura 6. Vista isométrica de la coraza.

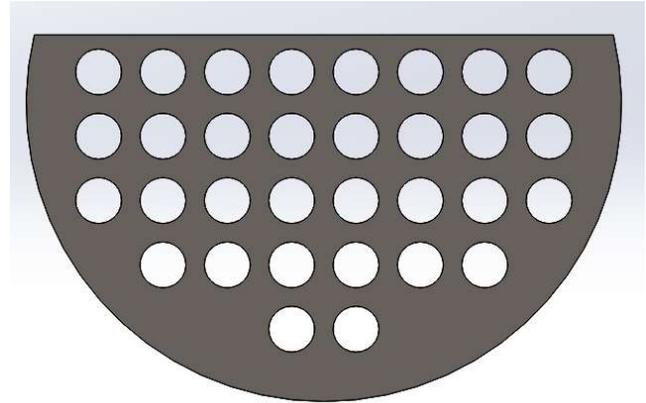


Figura 7. Deflectores del evaporador.

La Figura 8 muestra ambos cabezales, los cuales tienen el mismo espesor de pared de coraza. Las boquillas del cabezal con estradas tienen las mismas dimensiones que las de la coraza; de igual manera, las bridas se diseñan con las mismas dimensiones que las de la coraza.

El evaporador ensamblado, se muestra en la Figura 9. El diseño es relativamente compacto, a comparación con evaporadores para un Ciclo Rankine Convencional, lo cual es acorde a las características del Ciclo Rankine Orgánico.

Resultados de la simulación estructural

La Figura 10, muestra el mapa de contorno para la deformación total en milímetros. Se observa que la deformación máxima es de 0.16827 mm, localizada en la parte posterior del cabezal sin entradas del evaporador, sobre la cual actúa la presión del refrigerante R134a. Dadas las dimensiones del evaporador, puede

decirse que la deformación máxima obtenida por simulación numérica, es muy pequeña a comparación, y, por ende, se encuentra dentro de los límites aceptables.

La Figura 11, muestra el mapa de contorno para el esfuerzo equivalente de von Mises, con unidades en MPa. El esfuerzo máximo es de 102.46 MPa, y se localiza en las uniones de las boquillas con la estructural principal del evaporador. Es de esperarse que el esfuerzo máximo ocurra en zonas donde existe un cambio de sección transversal, por lo que debe tenerse especial cuidado en la elaboración de las juntas soldadas para la construcción del evaporador.

La Figura 12, muestra el mapa de contorno para el factor de seguridad de acuerdo con el criterio de von Mises. El valor mínimo fue de 2.0203, localizado en la unión entre las boquillas y el cabezal con entradas del evaporador. Dado que el esfuerzo máximo se localizó

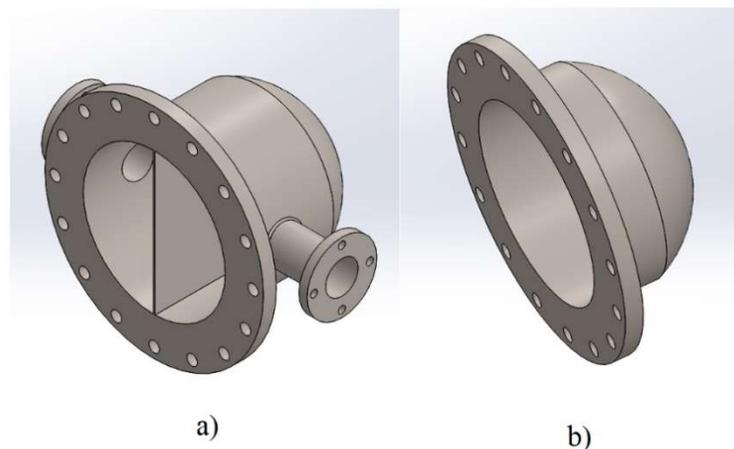


Figura 8. a) Cabezal con entradas para el R134a. b) Cabezal sin entradas.

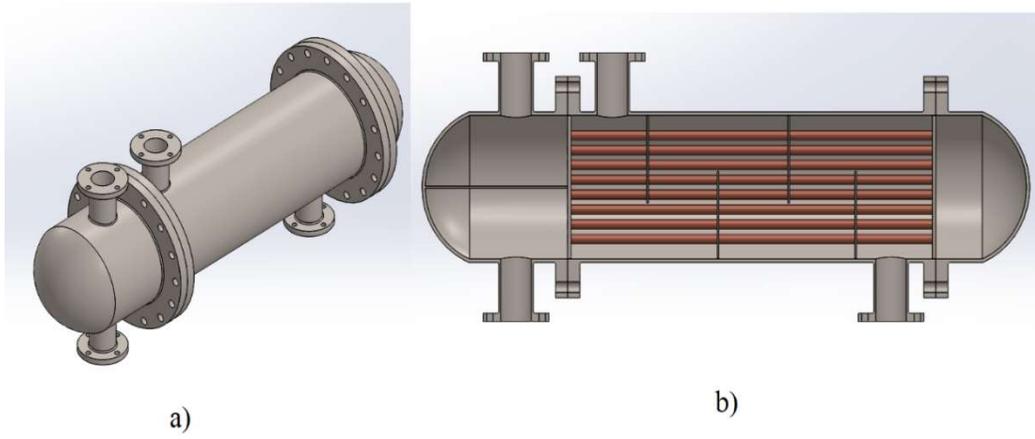
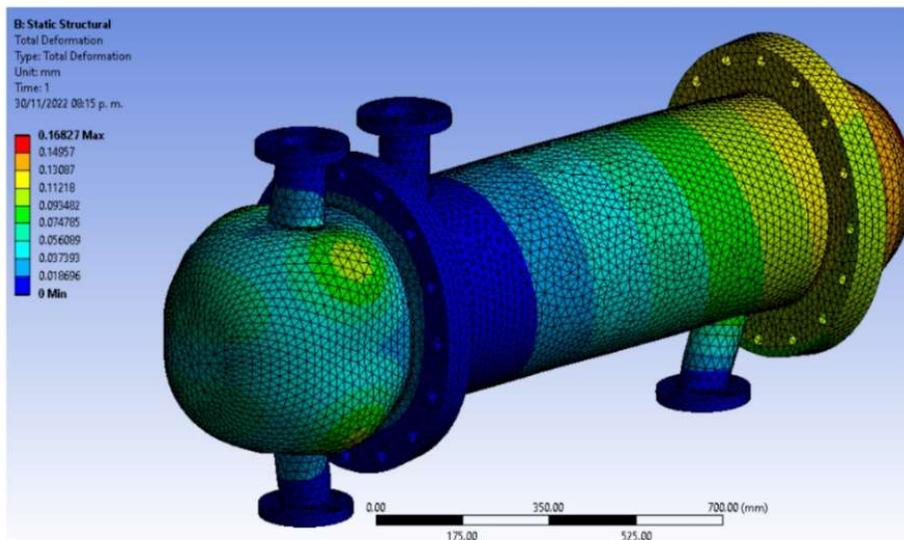
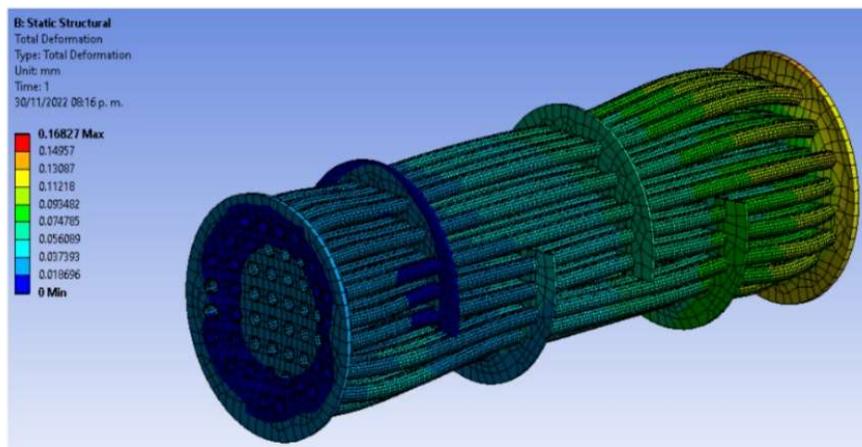


Figura 9. a) Vista isométrica del evaporador de coraza y tubos. b) Vista lateral seccionada del evaporador de coraza y tubos.



a)



b)

Figura 10. Mapa de deformación total en mm. a) Exterior. b) Interior.

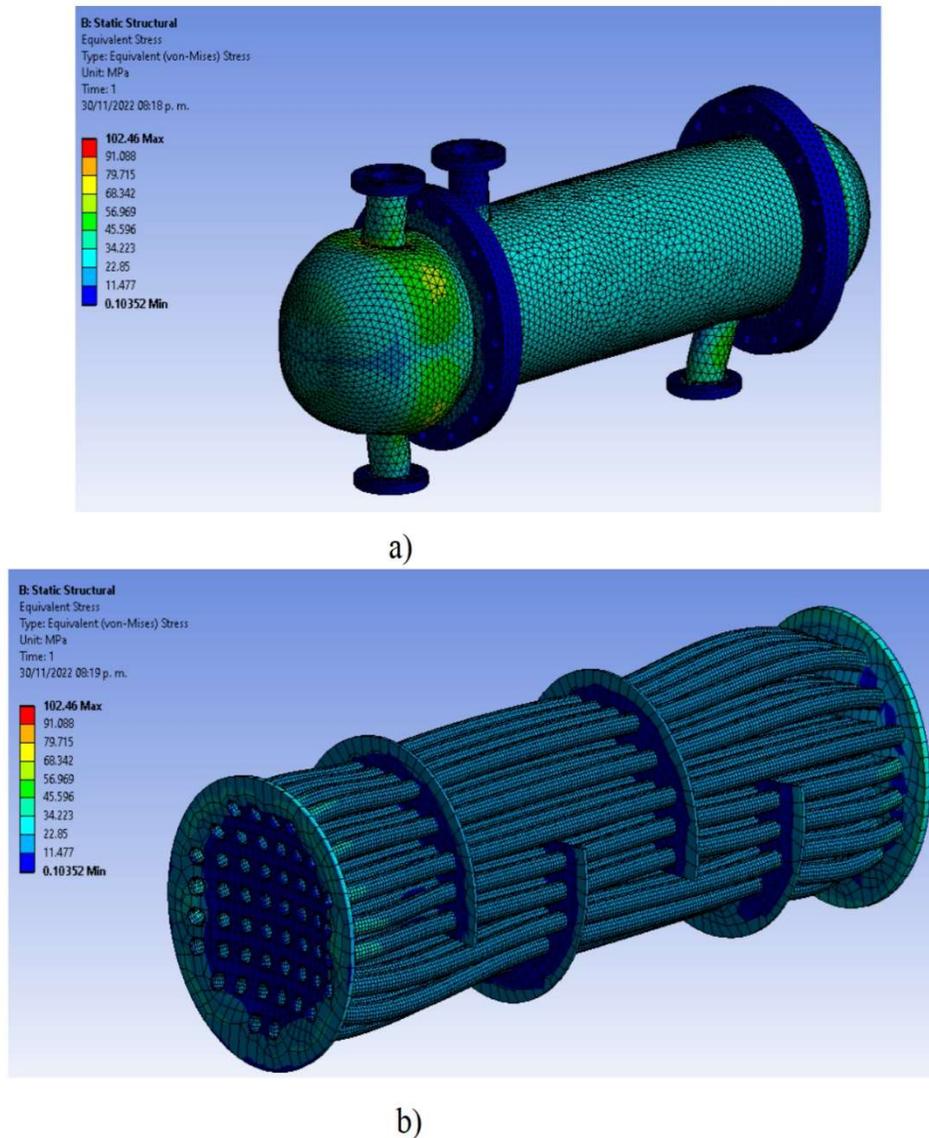


Figura 11. Mapa de esfuerzo de von Mises en MPa. a) Exterior. b) Interior.

en las uniones de las boquillas con la carcasa y cabezales, es plausible pensar que el factor de seguridad fuese mínimo en dichas zonas; sin embargo, el factor de seguridad mínimo resultó ser superior a 1, razón por la cual el diseño es seguro en términos estructurales (resistirá las cargas de presión a las que está sometido).

4. Conclusiones

Se diseñó un evaporador de coraza y tubos para un Ciclo Rankine Orgánico alimentado con agua obtenida de un reservorio geotérmico, tanto desde el enfoque térmico, como mecánico, de igual manera se probó el

desempeño estructural del diseño con una simulación numérica. En este sentido, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Del diseño térmico, se obtuvieron los parámetros de operación del fluido de trabajo, así como del agua de activación; dichos valores son acordes a lo marcado por los modelos teóricos. De igual manera, se determinó el área de transferencia de calor necesaria para la operación del evaporador, dato que fue el punto de partida para el diseño mecánico.
- Del diseño mecánico, se obtuvieron las dimensiones y el modelado 3D del evaporador. Las dimensiones fueron determinadas a partir del

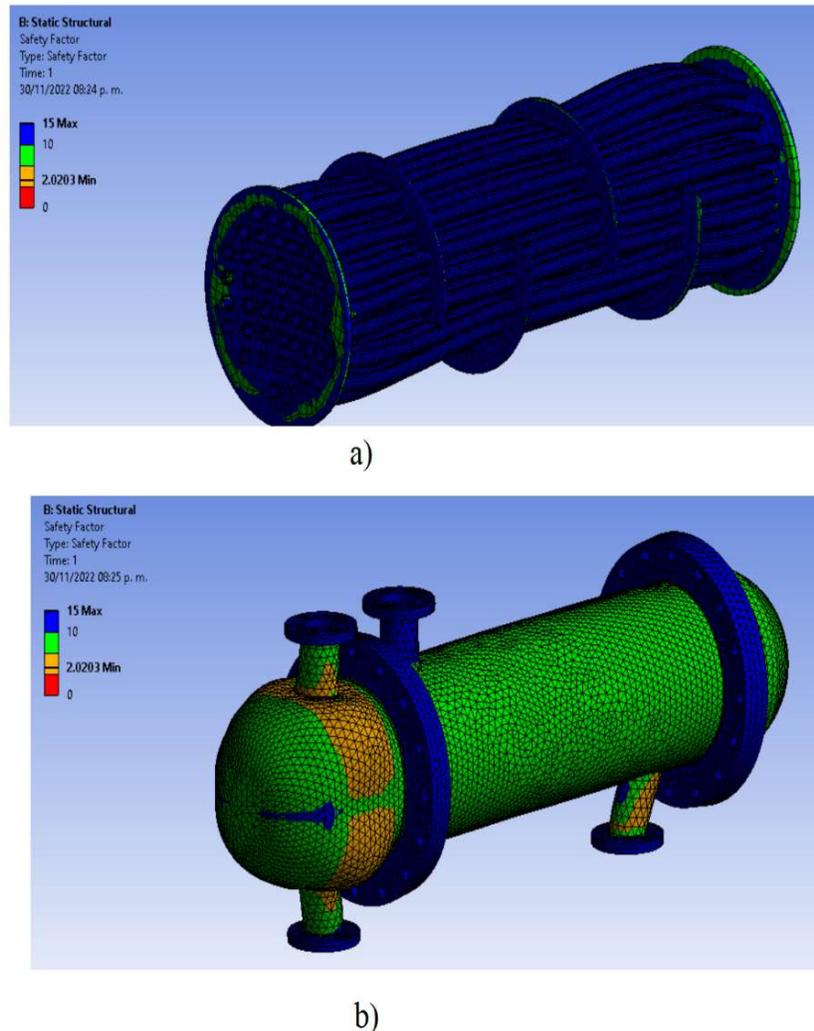


Figura 12. Mapa de factor de seguridad. a) Interior. b) Exterior.

área de transferencia de calor requerida, así como de las recomendaciones de la TEMA, y de otros de la ASME.

- De la simulación numérica, se determinaron los valores de esfuerzo, deformación, deformación unitaria, y factor de seguridad de von Mises para el diseño del evaporador obtenido en el apartado anterior. Los resultados muestran que no hay exceso de deformación y que el esfuerzo experimentado por los componentes del evaporador está dentro de un límite aceptable.
- De manera general, se tiene un diseño funcional de un evaporador de coraza y tubos para un ORC de potencia nominal de aproximadamente 20 kW, y que aprovecha fuentes de energía térmica de baja temperatura.

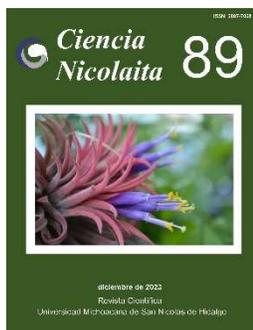
Referencias

- Ahmadi, A., Haj-Assas, M.E, Jamali, D.H., Kumar, R., Li, Z.X., Salameh, T., Al-Shabi, M., Ehyaei, M.A., 2020, Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production: *Journal of Cleaner Production*, 274, 122950, ISSN: 0959-6526, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122950>.
- Ambekar, A.S., Sivakumar, R., Anantharaman, N., Vivekenandan, M., 2016, CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations: *Applied Thermal Engineering*, 108, 999-1007, ISSN: 1359-4311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.013>
- American Society of Mechanical Engineers, "ASME B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings", <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes->

- standards/b16-5-pipe-flanges-flanged-fittings-nps-1-2-nps-24-metric-inch-standard, [Consultado el 17 de octubre de 2022].
- American Society of Mechanical Engineers, "ASME B36.19M Stainless Steel Pipe".
<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b36-19m-stainless-steel-pipe>, [consultado el 17 de octubre de 2022].
- British Petroleum, "bp Statistical Review of World Energy", <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, [consultado el 4 de octubre de 2022].
- Carraro, G., Pili, R., Lazzaretto, A., Haglind, F., 2021, Effect of the evaporator design parameters on the dynamic response of organic Rankine cycle units for waste heat recovery on heavy-duty vehicles: *Applied Thermal Engineering*, 198, 117496, ISSN: 1359-4311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117496>.
- Cruz, I., Johansson, M.T., Wren, J., 2022, Assessment of the potential for small-scale CHP production using Organic Rankine Cycle (ORC) systems in different geographical contexts: GHG emissions impact and economic feasibility: *Energy Reports*, 8, 7680-7690, ISSN: 2352-4847, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.006>.
- Cruz, P.A.D., Yamat, E.J.E., Nuqui, J.P.E., Soriano, A.N., 2022, Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the heat transfer and fluid flow of copper (II) oxide-water nanofluid in a shell and tube heat exchanger: *Digital Chemical Engineering*, 3, 100014, ISSN: 2772-5081, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100014>.
- Fetuga, I.A., Olakoyejo, O.T., Abolarin, S.M., Gbegudu, J.K., Onwuegbusi, A., Adelaja, A.O., 2022, Numerical analysis of thermal performance of waste heat recovery shell and tube heat exchangers on counter-flow with different tube configurations: *Alexandria Engineering Journal*, ISSN 1110-0168, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.017>.
- Hadidi, A., Haididi, M., Nazari, A., 2013, A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using imperialist competitive algorithm (ICA) from economic point of view: *Energy Conversion and Management*, 67, 66-74, ISSN: 0196-8904, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.017>.
- Holman, J.P., 1999. *Transferencia de calor: Mc. Graw Hill*, p. 386, ISBN: 84.481-2040-X.
- Jassim, E.I., Ahmed, F., 2021, Assessment of nanofluid on the performance and energy-environment interaction of Plate-Type-Heat exchanger: *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100988, ISSN: 2451-9049, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100988>.
- Kumaresan, G., Santosh, R., Duraisamy, P., Venkatesan, R., Kumar, N.S., 2018, Numerical Analysis of Baffle Cut on Shell Side Heat Exchanger Performance with Inclined Baffles: *Heat Transfer Engineering*, 39, 1156-1165, ISSN: 1521-0537, DOI: [10.1080/01457632.2017.1363624](https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363624).
- Kurose, K., Watanabe, N., Miyata, K., Mori, H., Hamamoto, Y., Umezawa, S., 2021, Numerical simulation of flow and cooling heat transfer of supercritical pressure refrigerants in chevron-type plate heat exchanger: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121758, ISSN: 0017-9310, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121758>.
- Mahmoudi, A., Fazli, M., Morad, M.R., 2018, A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle: *Applied Thermal Engineering*, 143, 660-675, ISSN: 1359-4311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136>.
- Manz, P., Kermeli, K., Persson, U., Neuwirth, M., Fleiter, T., Crijns-Graus, W., 2021, Decarbonizing District Heating in EU-27 + UK: How Much Excess Heat Is Available from Industrial Sites?: *Sustainability*, 13, 1493, ISSN: 2071-1050, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031439>.
- Nigusse, H.A., Ndiritu, H.M., Kiplimo, R., 2014, Performance Assessment of a Shell Tube Evaporator for a Model Organic Rankine Cycle for Use in Geothermal Power Plant: *Journal of Power and Energy Engineering*, 2, 9-18, ISSN: 1934-8983, DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.210002>.
- Ozden, E., Tari, I., 2010, Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger: *Energy Conversion and Management*, 51, 1004-1014, ISSN: 0196-8904, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.003>.
- Pate, M.B., 1991, "Evaporators and condensers for refrigeration and air-conditioning systems", Sadik Kakac, *Evaporators and Condensers*, Iowa, Wiley, 1991, pp. 635-716, ISBN: 978-0-471-62170-6.
- Ping, X., Yang, F., Zhang, H., Zhang, J., Zhang, W., 2022, Elman and back propagation neural networks based working fluid side energy level analysis of shell-and-tube evaporator in organic Rankine cycle (ORC) system: *Alexandria Engineering Journal*, 61, 7339-7352, ISSN:



- 1110-0168, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.006>.
- Prol-Ledesma, R.M., Morán-Zenteno, D.J., 2019, Heat flow and geothermal provinces in Mexico: *Geothermics*, 78, 183-200, ISSN: 0375-6505, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.009>
- Slimene, M.B., Poncet, S., Bessrou, J., Kallel, F., 2022, Numerical investigation of the flow dynamics and heat transfer in a rectangular shell-and-tube heat exchanger: *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101873, ISSN: 2214-157X, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101873>.
- Tartière, T., Astolfi, M., 2017, A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market: *Energy Procedia*, 129, 2-9, ISSN: 1876-6102, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.159>.
- Tubular Exchangers Manufacturers Association, "Standards of Tubular Exchangers Association",
<https://tema.org/standards/>, [consultado el 17 de octubre de 2022].
- Warghat, K.V., Jagdale, H.D., 2020, Heat transfer enhancement in concentric tube heat exchanger with tangential injection and twisted tape inserts: *Journal of Physics*, 1473, 012032, ISSN: 1742-6596, DOI:
[10.1088/1742-6596/1473/1/012032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012032).
- Zhang, W., Yang, F., Zhang, H., Ping, X., Yan, D., 2021, Numerical analysis and optimization design of fin-and-tube evaporator in organic Rankine cycle system for diesel engine waste heat recovery: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 175, 121376, ISSN: 0017-9310, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121376>.
- Zhao, D., Deng, S., Zhao, L., Xu, W., Wang, W., Nie, X., Chen, M., 2020, Overview of artificial intelligence in design of Organic Rankine Cycle: *Energy and AI*, 1, 100011, ISSN: 2666-5468, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100011>.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación de marcos para anteojos a partir de herramientas de diseño computacional

Static, thermal and economic analysis in the manufacturing process of eyeglass frames using computational design tools

Renato Trejo Moncada*, Víctor M. Ambriz-Díaz, Francisco Terán Arévalo

Para citar este artículo: Trejo Moncada Renato, Ambriz-Díaz Víctor M., Terán Arévalo Francisco, 2023. Análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación de marcos para anteojos a partir de herramientas de diseño computacional. Ciencia Nicolaita no. 89, 154-166. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.703>



Historial del artículo:

Recibido: 5 de enero de 2023

Aceptado: 19 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: trejo_wy@hotmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación de marcos para anteojos a partir de herramientas de diseño computacional

Static, thermal and economic analysis in the manufacturing process of eyeglass frames using computational design toolsy

Renato Trejo Moncada*, Víctor M. Ambriz-Díaz, Francisco Terán Arévalo

Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México

Resumen

Esta investigación tiene como propósito analizar el comportamiento estático, térmico y económico de un armazón al ser expuesto a condiciones de trabajo en una empresa encargada de manufacturar lentes. Se aplicó un análisis cuasi experimental y se tomaron especificaciones normales de presión y temperatura al momento de ensamblar el lente en el armazón. Con el software SolidWorks® se simularon las condiciones en las que opera el proceso y aportó detalles específicos para determinar costos de fabricación. Se muestran las áreas de contacto entre lente y armazón, la simulación térmica muestra el área que recibe la mayor cantidad de transferencia térmica y el análisis económico comprueba la dependencia costo-material.

Palabras clave: Análisis térmico, análisis estructural, manufactura de lentes, diseño, simulación.

Abstract

The purpose of this research is to analyze the static, thermal and economic performance of a frame when it's exposed to working conditions at a manufacturing lenses company. A quasi-experimental analysis was applied and normal pressure and temperature specifications were taken at the time of assembling the lens in the frame. With the SolidWorks® software, the conditions in which the process operates were simulated and specific details were provided to determine manufacturing costs. The contact areas between the lens and the frame are demonstrated, the thermal simulation indicates which parts stores the greatest amount of heat and the economic analysis proves the cost-material dependency.

Keywords: Thermal analysis, structural analysis, lens manufacturing, design, simulation.

Introducción

El uso de lentes por prescripción médica se remonta al año de 1849, en que oftalmólogos expertos en manufactura dieron inicio a la creación de nuevos productos, así como el diseño de armazones (Essilor. Un Poco de Historia, 2021). La mayoría de la producción óptica, por naturaleza, corresponde al área oftálmica, donde herramientas de corte de estilo punta diamante dan origen al montaje de la lente al armazón (Valencia Estrada, 2015). Es preciso mencionar que la manufactura de lentes es un proceso plenamente complejo, además de que el ensamble armazón-lente conlleva una medición del diámetro interno del armazón, enseguida, con base en el cálculo de estos datos se hace el corte de la lente oftálmica con el fin de que el ensamble al armazón sea puro y sencillo de hacer. Se puede observar que la forma del armazón determina en su totalidad el corte del lente. Entre los materiales más comunes de fabricación de armazones se pueden distinguir el metal y plástico. Dichos materiales son pieza clave para establecer una base y lograr efectuar estudios con que se pueda determinar las prestaciones mecánicas (estáticas y térmicas) y económicas de los armazones mediante el uso de análisis térmicos-estructurales, con apoyo de herramientas CAD/CAE.

Las herramientas CAD y CAE (por sus siglas en inglés) diseño asistido por computadora e ingeniería asistida por computadora, tienen el fin de desarrollar planos de diseño y modelos de productos que más adelante, con herramientas que el software incluye, pueden ser analizados (Groover, 1997). Además, es preciso mencionar que el diseño de armazones oftálmicas conlleva un estudio y análisis económico en el cual se toman en cuenta detalles importantes, tales como el proceso de ensamblaje. El diseño para manufactura y ensamble (DFM&A) por sus siglas en inglés, es una técnica utilizada para reducir el costo de algún producto, desde la etapa de manufactura como tal hasta la etapa final de ensamble. Antes de desarrollar y crear el producto, en este caso un armazón oftálmico, se debe establecer el costo objetivo del material, revisando el impacto económico que este pueda tener, después de esto, viene el diseño (Dewhurst *et al.*, 1994). Hay factores y variables que determinan el

diseño de un armazón, anchura de pata o soporte, perfil del aro y su anchura, por mencionar algunos, estos determinan las características físicas del armazón, las cuales al ser puestas bajo estudio dan resultados totalmente distintos (Petiot y Weihua, 2014).

Por otra parte, se ha demostrado que los lentes bajo prescripción médica no solo se utilizan para uso médico, sino también por cuestiones de moda. El Politécnico di Milano desarrolló una metodología para el desarrollo de nuevos armazones, clasificando a algunos de ellos en formas redondas, gato, ovalado, mariposa, rectangular y piloto, entre otras (Montalto *et al.*, 2017). La industria del diseño de armazones tiene un enorme nivel de complejidad, el hecho de que los armazones sean utilizados para lentes oftálmicas o lentes graduadas bajo la prescripción de un optometrista, coloca a la industria dentro del sector médico. Normas como ISO TS 24348:2007, ISO 7998:2005, (24348, 2007) (7998:2005, 2005), por mencionar algunas, están encargadas de regular su manufactura. En el mismo sentido, la forma del armazón debe de cumplir con requerimientos específicos del paciente, en base a complejidad morfológica, para garantizar la correcta posición del centro óptico del lente. Finalmente, el tipo de material, ya sea plástico o metal funge como factor crítico para la manipulación y exposición del armazón al momento de ser trabajado para montar el lente. También Petiot y Weihua (2014), mencionan la importancia de la geometría del diseño considerando tres importantes vistas del armazón, “forma de la cara”, “pantoscópico” y “ángulo del témplate abierto”.

Por lo anterior, ingenieros especialistas en diseño, mediante herramientas computacionales, están constantemente modificando las dimensiones, así como el prototipo físico antes de pasar a la manufactura. Finalmente, con las consideraciones generales que anteriormente se mencionaron se da vida al armazón, el cual varía en características específicas del portador. Hoy en día, las herramientas computacionales se han convertido en una parte fundamental para el análisis ingenieril de piezas e identificación durante el ensamblaje de problemas tales como exceso de carga, acumulación de calor en un punto crítico, etc. Sin embargo, la revisión de la literatura indica que existe información escasa de la aplicación de las herramientas

computacionales en el análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación y ensamble de lentes en armazones. Es por ello que, este trabajo pretende llenar ese vacío existente en la literatura y realizar un análisis preciso de las partes involucradas para el ensamble lente-armazón.

El trabajo primeramente muestra la estructura física de un armazón, las medidas y el diseño en 2D es meramente experimental. En el mismo sentido, los diseños han sido creados mediante la herramienta computacional SolidWorks®; el modelado en 3D permite apreciar las dimensiones de un armazón real, el cual será expuesto a diferentes materiales, algunos de ellos de lo más comunes en el mercado con el fin de analizar los detalles económicos que este representa, es decir, el costo por gramo del material y el costo final de manufactura del armazón. También se analiza mediante pruebas el comportamiento estático del armazón, ya que en procesos de manufactura son expuestos y sujetos a esfuerzos, de esta manera, el análisis permitirá detectar que partes sufren la mayor cantidad de carga y como éste lo afecta. El análisis térmico también será expuesto con el fin de determinar qué factores influyen en el montaje lente-armazón, es importante recalcar que los armazones de plástico y variantes de este son expuestos a calor para lograr una ligera expansión y el montaje sea más sencillo. Como ha sido mencionado, actualmente es nula la investigación y literatura que envuelve el estudio y análisis térmico-estructural de los armazones, así como el uso de diferentes materiales, por ende, se busca determinar los factores presentes en la manufactura de lente-armazón. La estimación económica del costo de fabricación, involucrando diferentes materiales tales como el plástico o como el oro, son la motivación de dar información clara de lo que esto conlleva. Lo mencionado anteriormente ha motivado el trabajo para cumplir con el objetivo principal de realizar un análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación y ensamble de lente-armazón a partir de herramientas de diseño computacional.

Hipótesis

La presencia de la temperatura y fuerzas de empuje en el ensamble de un lente dentro de un armazón es el principal punto para lograr el correcto ensamble.

Para la elaboración de este trabajo se ha formulado la siguiente hipótesis:

- i. Mediante un análisis estático, térmico y económico en el proceso de fabricación de marcos para anteojos a partir de herramientas de diseño computacional, se puede obtener una estimación de las fuerzas, temperaturas y esfuerzos presentes dentro del proceso de fabricación. En la misma dirección, mediante la reproducción virtual de anteojos en un software CAD, se puede obtener información precisa de la cantidad de material necesaria para fabricar los anteojos y en consecuencia se puede lograr una estimación de los costos de fabricación.

Descripción de los marcos para anteojos

Diseño en 2D

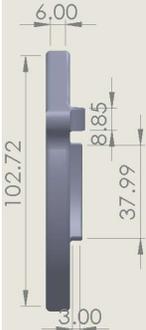
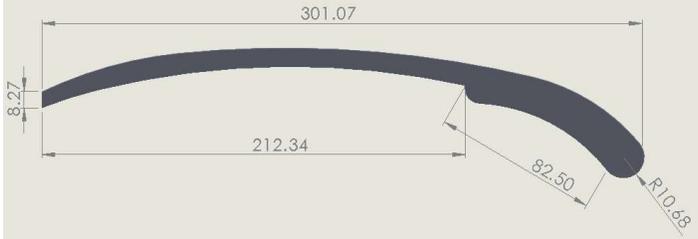
El diseño del armazón para lentes fue creado con la herramienta SolidWorks®, las dimensiones se muestran en la Tabla 1, las cuales fueron separadas en cuatro dibujos (una vista frontal, vista lateral de la pata, vista lateral y vista superior del armazón), para localizar tanto la distancia como el radio de cada pieza. En la vista frontal, se observa la medida del diámetro interno para el diseño del armazón en 2D. En la vista lateral de la pata se observan las medidas necesarias para el diseño. En la vista superior, se observan las medidas del diseño en 2D al ser extruido. De manera general, todas las dimensiones se encuentran en milímetros. Sin embargo, es importante considerar que cada armazón tiene dimensiones muy propias, en este caso se hará el análisis bajo el diseño de un mismo armazón, pero con materiales distintos, los cuales se pueden identificar en la Tabla 1.

Por otra parte, el diseño y tamaño del armazón se ha elegido en base a un promedio de medidas de armazones ya existentes dentro del área de manufactura, ya que existen infinitas formas y diseño de armazones en el mercado.

Diseño en 3D (modelado sólido)

Para el modelado sólido del armazón, se realizó el diseño mediante el software SolidWorks®. A continuación, se muestran los pasos realizados con la ayuda de dos mapas conceptuales, los cuales, por naturaleza

Tabla 1
Diseño en 2D del armazón.

Descripción	Diseño en 2D
Vista frontal del armazón	
Vista lateral del armazón	
Vista lateral de la pata del armazón	
Vista superior del armazón	

del diseño, son separados para el armazón y las patas (Tabla 2).

Las medidas reales que se utilizaron se pueden apreciar en las figuras del modelado en 2D de la Tabla 1, esto para dar una mejor apreciación del diseño. También se puede apreciar el diseño final del armazón, pata izquierda y derecha y finalmente se aprecia el ensamble completo en la Tabla 3.

Consideraciones para el análisis

Para el análisis económico se consideran 10 materiales de diferentes características, los cuales serán

puestos a prueba bajo la estructura del armazón previamente diseñado. Así mismo, se agregan los costos por gramo de cada material en base al mercado actual. De igual manera, se puede observar en la Tabla 4 otros datos relacionados con las propiedades mecánicas y térmicas, los cuales más adelante serán expuestos bajo condiciones específicas desarrolladas por el programa SolidWorks®.

Para el análisis estático de la montura de lentes, se realiza un estudio de campo dentro de una empresa reconocida en el sector salud encargada de la fabricación de lentes de prescripción médica, de esta manera

Tabla 2
Metodología del diseño del armazón en software SolidWorks®.



Tabla 3
Diseño en 3D del armazón (estructura y patas).

Descripción	Modelado sólido
Pata derecha	
Pata izquierda	
Modelo en 3D del armazón	
Ensamble	

Tabla 4
Especificaciones por material.

Material	Densidad (Kg/m ³)	Módulo Elástico (N/mm ²)	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Conductividad Térmica (W/m. k)	Coefficiente de Expansión Térmica (1/k)	Costo (\$/gr)
Monel	8800	1.80 E ⁺⁴	448.08	22	1.40 E ⁻⁵	\$0.05
ABS PC	1070	2.41 E ⁺⁹	4.00 E ⁺⁷	0.2618	-	\$0.12
ABS	1020	2.00 E ⁺⁹	30	0.2256	-	\$0.003
Madera	159.9	3.00 E ⁺³	-	0.05	-	\$0.55
Berilio	1844	3.03 E ⁺⁵	370	216	1.15 E ⁻⁵	\$0.83
Oro	19000	7.80 E ⁺⁴	103	300	1.40 E ⁻⁵	\$38.19
Nylon 101	1150	1000	78.28	0.53	1.00 E ⁻⁶	\$0.003
Plata	11000	71000	125	420	2.00 E ⁻⁵	\$0.46
Acero Inoxidable	7800	2.00 E ⁺⁵	513.61	18	1.10 E ⁻⁵	\$0.002
Titanio	4600	1.10 E ⁺⁵	235	22	8.80 E ⁻⁶	\$0.003

se obtienen los datos reales y necesarios para el análisis en el software SolidWorks®. En la Figura 1, se muestran las fotografías de dos manómetros de celda de carga (Atorn 1157001 y Andilog Centor), tanto análogo como digital que se utilizaron para obtener los valores de la fuerza aplicada para la montura. Los datos de fuerza a los que es sometido el armazón en el momento de la montura del lente se han obtenido mediante una mediación en campo por una persona especializada encargada de realizar dicha operación. Ejerciendo presión con 2 dedos la lectura arroja en promedio 107 N de fuerza. Para el análisis, el armazón previamente diseñado se dividió en dos partes con el fin de analizar solamente la montura de un lente, ya que las medidas utilizadas son las mismas para ambos lados y por ende los resultados arrojan la misma información.

Para el análisis térmico, se utiliza un calentador de aire (PrimeAir Western #2400) capaz de generar una temperatura mínima de 82 °C y una máxima de 163 °C. El personal especializado en realizar dicha operación coloca el armazón en la parte central de las torres, el objetivo es calentar el armazón con la finalidad de facilitar la montura del lente. La Figura 2, muestra el calentador empleado para la manipulación y en consecuencia, lograr el correcto ensamble de lente-armazón.

Modelado económico, estático y térmico

Modelado económico

Para estimar el costo por materia prima, primeramente, se determina la masa del material mediante



Figura 1. Manómetros de celda de carga o manómetros de presión.



Figura 2. Calentador del armazón.

SolidWorks®, posteriormente, el costo derivado de la materia prima es un producto del costo unitario por la masa de cada armazón de diferente material; dichos materiales se pueden observar en la Tabla 4. Por lo tanto, el costo asociado a la materia prima se determina con la Ecuación 1. El costo de estimación asociado a la manufactura del armazón, desde la etapa de diseño hasta la etapa final de ensamble se estima bajo la Ecuación 2, la cual, expresa y determina que un 10 % del costo total del armazón es agregado para considerar la mano de obra de éste. Este porcentaje asociado a los costos de manufactura se ha obtenido a través de una consulta directa a un fabricante del sector.

$$\text{Costo total} = [\text{Costo unitario (dólares por gramo)}] \times [\text{masa del armazón(gramos)}] \quad (1)$$

$$\text{Costo final} = \text{Costo total} + 10\% \quad (2)$$

Modelado estático

Para el modelado estático del armazón se utilizó el software SolidWorks®, con el uso del armazón previamente construido, de igual manera se preparó el lente analizado desde la perspectiva de las condiciones reales en las que es ensamblado. Para lograr el análisis estático, es necesario considerar las fuerzas que estarán presentes al momento del ensamble del lente en el armazón, las cuales fueron determinadas con los

manómetros de presión. También, dentro de un proceso continuo de producción se observó que la manera en la que se agarra el armazón es de los extremos, es por eso que las fuerzas de agarre se fijaron en los contornos superior e inferior del armazón tal como se aprecia en las Figuras 3 y 4. La manera en la que un lente es ensamblado en el armazón es de la parte frontal hacia la parte trasera del mismo, por esa razón y con el fin de igualar el proceso real a la simulación, se le aplicó la fuerza de 120 N en esa dirección. Antes de iniciar con el análisis estático donde se involucran fuerzas de tensión y desplazamiento, es importante crear el mallado en la estructura, el cuál ayuda a determinar, medir y analizar los valores que sufren una deformación en cada parte de la misma estructura (Gabaldon Castillo, 2007).

Modelado térmico

Dentro de un proceso de manufactura, donde se tiene como actividad el ensamble de lentes de prescripción médica, dentro de un armazón se presentan varias condiciones para lograrlo con efectividad, las principales se exponen en el análisis estático del armazón, sin embargo, el uso de temperatura o del aire caliente es factor importante para facilitar el ensamble del lente. El armazón es expuesto a un calentador de aire (Figura 2) para lograr que éste sufra una ligera deformación y se expanda en las áreas de contacto de lente-armazón, de esta manera se facilita el ensamble

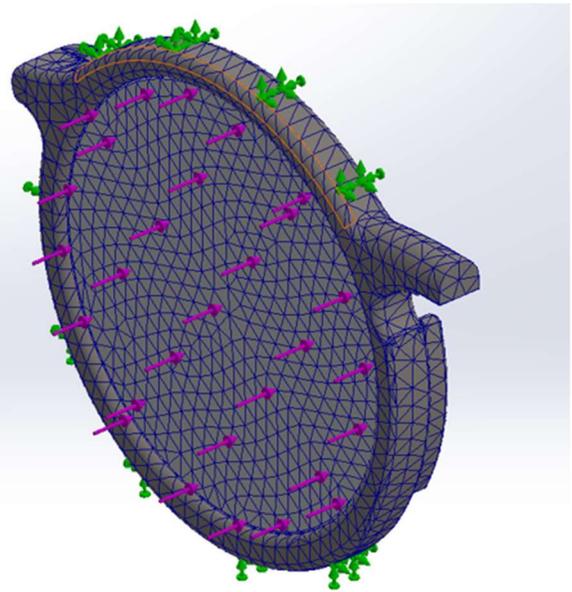


Figura 3. Mallado.

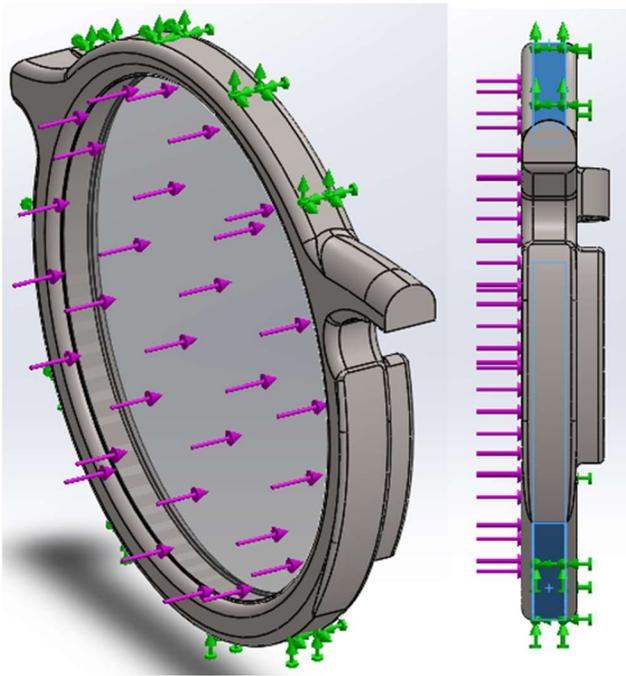


Figura 4. Fuerzas en el armazón y lente.

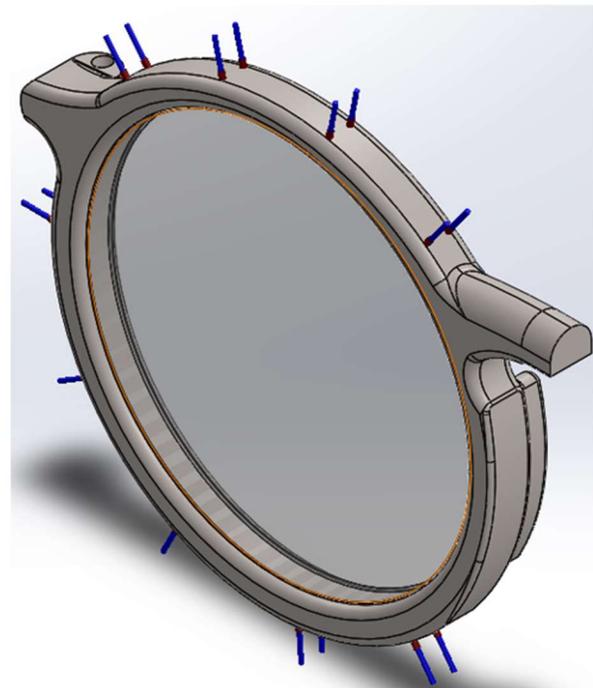


Figura 5. Áreas de exposición de temperatura.

y reduce el tiempo y esfuerzo ejercido por el operador. La manera en la que se realiza esta operación es colocando el armazón sin lente dentro de los dos puentes del calentador de aire (Figura 2) por un tiempo promedio de 9 segundos, también en la Figura 5, se pueden apreciar las áreas de contacto por las que principalmente se busca hacer ceder al armazón. Para determinar cuáles áreas del armazón obtienen el mayor rango y contacto de exposición de temperatura se utilizó el coeficiente de convección del aire a 25 °C de 20 W/m².K, utilizando también la temperatura ambiente del área de trabajo de 25 °C, igualando de esta manera las condiciones normales a las que se realiza la operación.

Resultados y discusión

Resultados del análisis económico

En la Tabla 5, se puede apreciar el costo final de cada armazón considerando los 10 tipos de materiales expuestos con anterioridad. En la segunda columna se expresa el costo del material por gramo en el mercado actual, en la tercera columna se define la masa del armazón diseñado con el software SolidWorks®, en la cuarta columna se expresa el costo en dólares del armazón utilizando la Ecuación (1) y finalmente en la quinta columna se encuentra el precio final obtenido bajo la Ecuación (2). De manera explícita, se observa

que el tipo de material más costoso en el mercado actual es el oro, por naturaleza se sabe que es uno de los materiales exóticos y por ende más costosos del mercado, sin embargo, compañías de gama alta incursionan con este tipo de materiales considerando los requerimientos de los clientes, es preciso mencionar que la mayoría de los armazones hechos con este material son bajo pedido, es decir, que tanto el diseño como la manufactura son únicos, específicos y especiales para el cumplimiento del producto final. Otro aspecto importante es el proceso de manufactura, en este caso se toma un aproximado del 10 % adicional al costo final del diseño del armazón, es evidente que un producto es fácil de manufacturar cuando la materia prima no es costosa, en este caso es imposible refutar esa información ya que al sumar ese porcentaje al costo neto de la masa da como resultado un material final con un precio muy elevado.

Por otra parte, el material más común en el mercado actual de la manufactura de armazones es el plástico ABS, o conocido también por su nomenclatura “acrilonitrilo butadieno estireno” este material es muy resistente al impacto y es muy utilizado en este y otros ramos de la industria. El costo debido a su masa es bajo, por ende, el porcentaje adicional a su proceso de manufactura continua igual, esta información se puede verificar en la Tabla 5. El Nylon 101 ubicado en la parte central de la Tabla 5, muestra el bajo costo de



Tabla 5
Costo final del armazón.

Material	Costo unitario	Masa	Costo total	Costo final
	(\$/gr)	(gr)	(\$)	(\$)
Monel	0.05	1,232.16	61.61	67.77
ABS PC	0.12	142.82	17.14	18.85
ABS	0.003	142.82	0.43	0.47
Madera de Balsa	0.55	22.40	12.32	13.55
Berilio	0.83	258.19	214.30	235.73
Oro	38.19	2,660.34	101,598.38	111,758.22
Nylon 101	0.003	161.02	0.48	0.53
Plata	0.46	1,540.20	708.49	779.34
Acero Inoxidable	0.002	1,092.14	2.18	2.40
Titanio	0.003	644.08	1.93	2.13

manufactura y procesamiento, sin embargo, las características de este material en el uso de armazones han dejado mucho que desear. Es evidente que el costo no es una limitante, pero en este caso entra otro factor importante que es la calidad del producto cuando está en uso, la exposición del material a ciertas características de temperatura, humedad, etc., deterioran el material dándole poco tiempo de vida útil. Existen otros materiales en el mercado actual que cumplen con las principales características que el cliente busca en el producto final las cuales son costo y calidad. En la Tabla 5, en la penúltima posición se encuentra el acero inoxidable, el cual como materia prima en el mercado actual es barato, además las características de este material tales como resistencia al calor y humedad lo mantienen asequible y lo posicionan como uno de los mejores materiales para su proceso de manufactura. El titanio por otra parte, cumple con características parecidas al acero inoxidable, los costos bajos como materia prima, las características de resistencia a ciertos factores naturales lo mantienen como uno de los principales en la industria de armazones.

Resultados del análisis estático

En las Figuras 6, 7 y 8, se puede apreciar los resultados obtenidos del análisis de tensión, presión y desplazamiento de las partes involucradas. Los resultados del análisis de tensión arrojan que los principales puntos de tensión (4.023×10^6 N/m²) se presentan en las partes superiores del armazón, es decir, en donde se encuentra el soporte para las patas y el puente que sostiene ambas lentes, las partes que menos reciben tensión son precisamente donde se sujeta el armazón

para que el lente sea montado, las cuales se aprecian de color azul con una tensión promedio de (3.533×10^1 N/m²). Por otro lado, el lente, a pesar de estar en contacto con la mano operativa demuestra que el valor de tensión que almacena es menor (4.02×10^5 N/m²). Expresado de otra manera, el armazón expuesto a la tensión del análisis está lejos de sufrir algún tipo de fractura por lo que tiende a ceder.

Los resultados del análisis de deformación plasmado en las Figuras 6, 7 y 8, demuestran que durante la actividad de montaje del lente el armazón no sufre ningún tipo de efecto, por el contrario, el lente es el elemento que recibe la totalidad del efecto. La mayor parte de la deformación en el lente se da del centro hacia los extremos, siendo los extremos también un punto de contacto importante para que se logre el montaje del lente, inclusive, en alguna de las partes externas o del contorno se observa que la deformación alcanza hasta 2.776×10^{-4} N/m² esto debido a que se requiere de presión alta específicamente en esas partes por naturaleza del mismo armazón.

En el análisis de desplazamiento, el cual está representado de manera gráfica en las Figuras 6, 7 y 8, demuestra que la mayor área de desplazamiento de la estructura al ser expuesta a una fuerza de 120 N no es el armazón, en este caso el lente es el que almacena la cantidad total de desplazamiento a consecuencia de la fuerza aplicada, es decir, que en condiciones reales de trabajo, aplicación y montaje, el lente alcanza en promedio 2.658×10^{-2} mm de desplazamiento. Seguido de este fenómeno, el desplazamiento se observa a través de la lente hacia los extremos.

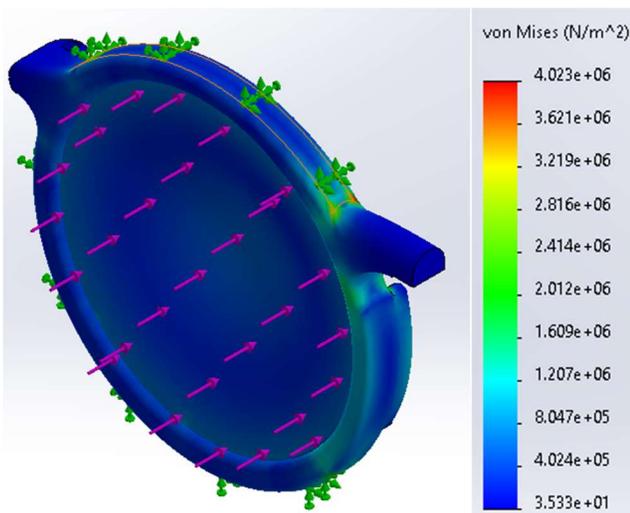


Figura 6. Análisis de tensión.

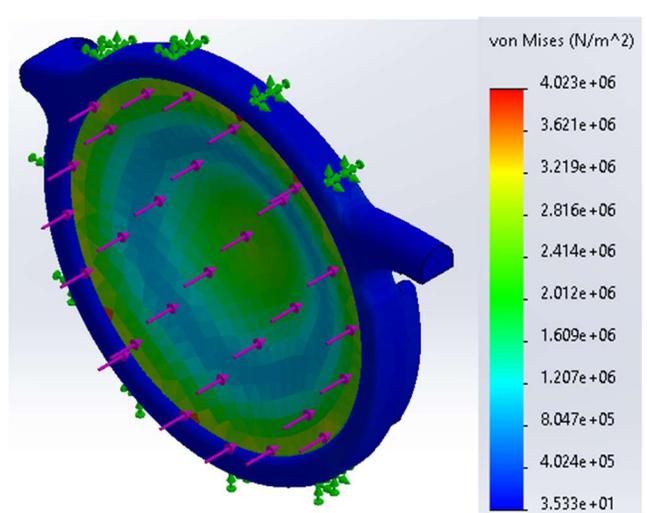


Figura 7. Análisis de deformación.

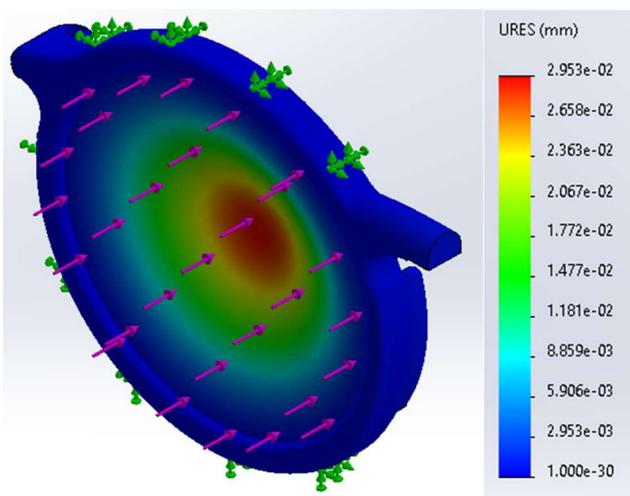


Figura 8. Análisis de desplazamiento.

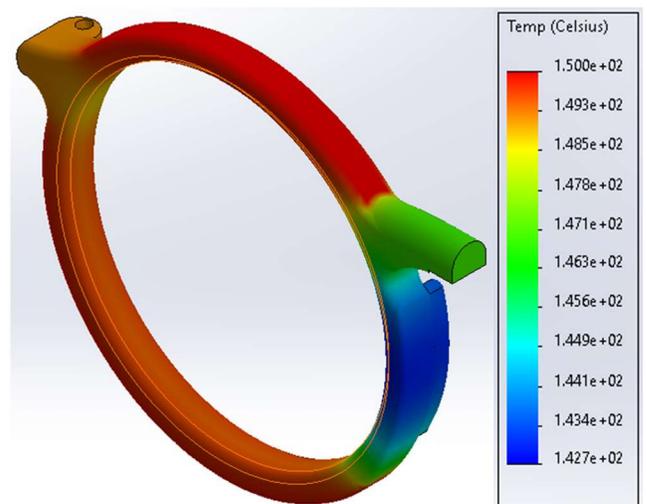


Figura 9. Variación de temperatura en el armazón.

Resultados del análisis térmico

En las Figuras 9 y 10, se encuentra el resultado del armazón al ser expuesto a calor con el objetivo de manipularlo con mayor facilidad y lograr el ensamble del lente. De manera estructural se conoce que un plástico o polímero, según sea el caso, al ser expuesto a temperatura tiende a romper sus enlaces químicos lo cual genera que su temperatura de transición vítrea sea rebasada provocando que el material se vuelva flexible, si este parámetro es rebasado el material se derrite (Posada Bustamante, 1994). Dentro del estudio y análisis térmico por medio de la exposición del armazón a la temperatura se busca que el material se vuelva flexible sin llegar al punto a que este se derrita, debido a que por condiciones físicas y químicas del

material, este ya no recobraría su forma original. Es por esto que el factor tiempo juega un papel importante, si bien sea el caso, un material llegará a derretirse si se expone durante un tiempo prolongado a temperatura, pero es posible que se vuelva flexible si se retira a tiempo. Dicho esto, dentro del proceso de manufactura normal el personal operativo por experiencia determina los segundos de exposición del armazón con el calentador. El área que recibe la mayor cantidad de transferencia térmica es la parte superior del armazón la cual es transferida a través del calentador generando 150 °C como máximo. En seguida, la parte inferior del armazón capta hasta 149 °C; es importante mencionar que el estudio realizado en campo arrojó que las principales áreas del armazón

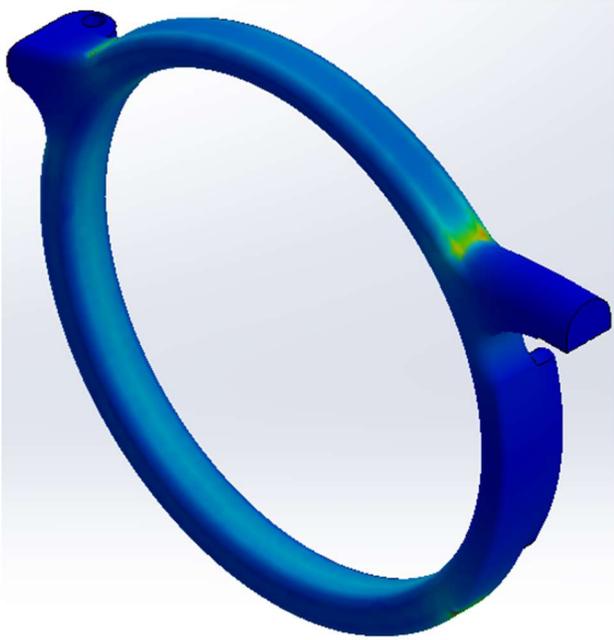


Figura 10. Flujo de calor en el armazón.

que se manipulan para lograr el ensamblaje son las dos que principalmente se ven afectadas en las Figuras 9 y 10, por ende, el análisis y estudio comprueban lo cometido en términos reales. La zona que capta menor temperatura, alrededor de 142 °C es la parte central e interior del armazón, lo cual demuestra que no es necesario calentar a más temperatura esa zona para lograr el ensamblaje.

Otro detalle importante que resulta del análisis térmico del armazón es el flujo de calor a través del mismo, ya mencionado anteriormente el material del armazón está directamente relacionado con el comportamiento físico y térmico que este presenta, siendo el plástico el mayor utilizado en un proceso de manufactura. En la Figura 10, se muestra el comportamiento del armazón con el flujo de calor aplicado según las características en el proceso de manufactura. Se observa que el armazón recibe y mayormente distribuye el flujo de calor a través de toda la estructura independientemente de la parte que lo recibe primero.

Conclusiones

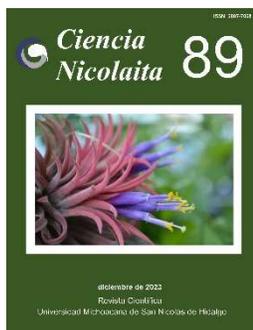
La evidencia que se presenta anteriormente, demuestra que las actividades realizadas dentro de un proceso de manufactura encargado del ensamblaje de lentes de prescripción médica en diferentes tipos de

armazón es un proceso que está lejos de ser simple, es decir, que las habilidades manuales que el operador aplica para lograrlo con efectividad se aprecian simples a primera instancia pero el estudio, análisis y realidad van más allá de eso. Por lo tanto, podemos determinar que el estudio y análisis estático de la dirección y las fuerzas aplicadas en el ensamble comprueban los principales puntos de contacto entre las partes generales de armazón y lente, esto arroja como resultado que el desplazamiento y deformación del lente, es el cuerpo que principalmente recibe mayor deformación, y es el factor clave para que el ensamble sea el adecuado. Dicho y comprobado esto, el área de investigación sobre el tema crea nuevos retos para investigaciones futuras centrándose en los materiales utilizados para la elaboración de los lentes y en los procedimientos implementados por los operarios encargados del ensamblaje. Estos son parámetros que definitivamente se tienen que considerar tomando en cuenta el análisis de desplazamiento, deformación y tensión del lente. Finalmente, es importante recalcar que la temperatura es un factor clave en este análisis, el armazón por características físicas y propias del material mantiene su forma inicial, pero al ser expuesto a temperatura controlada es capaz de deformarse y retomar su misma estructura, esta deformación momentánea ayuda a que el lente sea montado y demuestra que todo el armazón recibe prácticamente la misma temperatura, pero las partes que la almacenan en mayor cantidad son clave para que se logre. Este análisis térmico abre las puertas a nuevos objetivos, tales como el tiempo de exposición del armazón en el calentador cuando se busca deformarlo para lograr el montaje y la influencia de la temperatura ambiente. En cuanto a los detalles importantes de la presencia de esfuerzos de deformación y/o desplazamiento en conjunto con la transferencia térmica actuando de manera simultánea se concluye que son dependientes cuando se busca que el ensamble lente-armazón sea eficaz, es decir, el armazón requiere ser deformado a través de la transferencia térmica para incrementar su diámetro interno y a su vez el lente debe ser deformado a través de esfuerzos de desplazamiento y deformación para llegar al mismo objetivo, confirmando la dependencia de ambos. Finalmente, los costos del armazón y el proceso de manufactura del lente incluyendo el montaje son detalles que las compañías toman en cuenta antes de iniciar el negocio, desde la

fase de diseño del armazón hasta la selección del material considerando el mercado al que se desea atacar, es decir, los precios se elevan cuando se utiliza un metal precioso como el oro o la plata y disminuyen cuando se utiliza materiales que son sencillos de procesar tal como el plástico ABS. En síntesis, es necesario continuar con los estudios y análisis de los componentes físicos presentes dentro del montado del lente en el armazón, de esta manera se logrará profundizar en el tema obteniendo datos y resultados importantes que normalmente no se aprecian pero que son sumamente importantes para conocer el comportamiento estático y térmico del armazón y la lente al momento de ser manipulados.

Referencias

- Dewhurst, P., Knight, W., & Boothroyd, G., 1994, *Product desing for manufacturing and assembly*. New York: Marcel Dekker.
- Essilor. *Un Poco de Historia*, 5 de Noviembre de 2021, Obtenido de Essilor.es: <https://www.essilor.es/sobre-nosotros/un-poco-de-historia>.
- Gabaldon Castillo, F., 2007, Método de los elementos finitos. Preproceso y postproceso de resultados.
- Groover, M. P., 1997, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Prentice Hall.
- IS/ISO 7998, 2005, *Ophthalmic Lenses - Spectacle Frames - Lists Of Equivalent Terms And Vocabulary*. ISO.
- ISO/TS 24348, 2007, *Ophthalmic Optics - Spectacle Frames - Method For The Simulation Of Wear And Detection Of Nickel Release From Metal And Combination Spectacle Frames*. ISO, 24.
- Montalto, A., Graziosi, S., Bordegoni, M., Di Landro, L., 2017, Combining aesthetics and engineering specifications for fashion-driven product design: A case study on spectacle frames. *Computers In Industry*, 102.
- Petiot, J. F., Weihua, L., 2014, Affective design of products using an audio-based protocol: application to eyeglass frame. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 12.
- Posada Bustamante, B., 1994, La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 20.
- Valencia Estrada, J. C., 2015, *Manufactura CNC de superficies ópticas correctoras*. Centro de Investigaciones en Optica A. C.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición como sustitución de agregado pétreo natural

Preparation of hot mix asphalt with the addition of construction and demolition waste as a substitute for natural stone aggregate

C. U. Espino González*, W. Martínez Molina, E. M. Alonso Guzmán, H. L. Chávez García y L. A. Morales Rosales

Para citar este artículo: Espino González C. U., Martínez Molina W., Alonso Guzmán E. M., Chávez García H. L., Morales Rosales L. A., 2023. Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición como sustitución de agregado pétreo natural. Ciencia Nicolaita no. 89, 167-176. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.704>



Historial del artículo:

Recibido: 2 de febrero de 2023
Aceptado: 3 de julio de 2023
Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: carlos.espino@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición como sustitución de agregado pétreo natural

Preparation of hot mix asphalt with the addition of construction and demolition waste as a substitute for natural stone aggregate

C. U. Espino González^{1*}, W. Martínez Molina¹, E. M. Alonso Guzmán¹, H. L. Chávez García¹ y L. A. Morales Rosales²

¹Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070.

²División de estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070.

Resumen

Los materiales son los insumos básicos para la construcción, sin embargo, algunos producen contaminación desde el momento de su obtención y/o procesamiento. En el caso de carpetas de rodamiento para carreteras y con la finalidad de reducir el impacto ambiental, se propone el uso de materiales reciclados, específicamente residuos procedentes de la construcción y demolición de edificaciones y construcciones (RCD) que han llegado al final de su vida útil, para su reincorporación dentro de la elaboración de mezclas asfálticas. El diseño fue realizado con un 20% de sustitución de material reciclado por agregados gruesos naturales, habiéndose obtenido desempeños comparables con la mezcla control conteniendo esta 100% de agregado pétreo natural, cumpliendo ambas mezclas con los requisitos establecidos por la normativa mexicana N·CMT·4·05·003/16, como la estabilidad mínima, el flujo, vacíos en la mezcla asfáltica y vacíos en el agregado mineral, para el tránsito de diseño de un millón a 10 millones de ejes equivalentes, según la metodología Marshall. Finalmente se pudo comprobar que la sustitución de agregados reciclados por agregados naturales de banco en 20%, no afecta las características físicas ni mecánicas de la mezcla, al contrario, las mejora, de acuerdo a los parámetros marcados por la normativa y se evita la explotación excesiva de bancos de material.

Palabras clave: Reciclaje, mezcla asfáltica, impacto ambiental, concreto.



Abstract

Materials are the basic inputs for construction. However, pollution may arise from the moment they are obtained and/or processed. In the case of road pavements and with the purpose of reducing the environmental impact, the use of recycled materials is proposed, specifically waste from construction and demolition of buildings and constructions (WCD) that have reached the end of their useful life, for their reincorporation in the preparation of asphalt mixtures. The design was carried out with 20% substitution of recycled material for natural coarse aggregates, having obtained comparable performances with the control mix designed with 100% natural stone aggregate, both mixes complying with the requirements established by Mexican regulation N-CMT-4-05-003/16, such as minimum stability, flow, voids in the asphalt mix and voids in the mineral aggregate for the design traffic of one million to 10 million equivalent axles, according to the Marshall methodology. Finally, it was possible to verify that the substitution of recycled aggregates for natural aggregates from the bench in 20% does not affect the physical or mechanical characteristics of the mix, in fact it improves them according to the parameters set by the regulations and avoids the excessive exploitation of material banks.

Keywords: Recycling, asphalt mix, environmental impact, concrete.

Introducción

Hoy en día, en la industria de la construcción, hay demasiada generación de residuos a nivel mundial con una producción cercana a los 900 millones de toneladas al año (Martínez-Molina *et al.*, 2015). En la Ciudad de México, por citar un ejemplo, se acumulan alrededor de 12, 000 t/día de residuos sólidos urbanos, de los cuales el 50% (6, 000 t/día) son residuos de construcción y demolición (RCD) y solamente un porcentaje muy bajo es tratado (Imelda Martínez, 2013). La gestión nula de estos residuos, ocasiona que la mayor parte de los mismos acabe en la vía pública, en tiraderos clandestinos, y a orillas de las carreteras, con los problemas que eso implica, y lo peor de todo, es el desaprovechamiento de la vida útil que aún les queda.

Los RCD están formados por diferentes materiales de construcción, entre los que, por su composición y porcentaje de generación (65 al 75%), destacan aquellos de origen pétreo (concretos, morteros, ladrillos, azulejos, losetas, etc.), composición que los hace valorizables y por lo tanto, adecuados para su reciclaje, en determinados casos.

El desarrollo sustentable en el sector de la construcción y en particular en la gestión de los RCD ha sido muy pobre en México. Sin embargo, es una necesidad que la sociedad demanda con una preocupación creciente sobre los sistemas tradicionales de eliminación de residuos y sus

consecuencias para el medioambiente. Lo anterior hace necesario la reducción, reutilización, reciclado y valorización de RCD, para minimizar su generación, siendo una etapa fundamental de este proceso la recogida selectiva, y posteriormente, un adecuado proceso de transformación del residuo para su uso como agregado reciclado.

Debido al gran impacto que la industria de la construcción genera a nivel mundial, y que al finalizar su vida útil, no se le da un adecuado encausamiento a los RCD, surge la necesidad de incorporar nuevas tendencias en la gestión de estos residuos, para el cuidado del medio ambiente, implementando técnicas de procesamiento, que ayuden a la reducción del volumen de desechos, del número de rellenos sanitarios, de la explotación de recursos vírgenes, y de emisiones de CO₂ al ambiente, generando así posibilidades de crecimiento para la industria del reciclaje.

Para mejorar la calidad del árido reciclado, se recomienda usar como primera opción, concreto hidráulico proveniente de la infraestructura vial, tales como los pavimentos rígidos. Algunas investigaciones indican que las mezclas realizadas con árido natural presentan un comportamiento adecuado a la acción del agua, cumpliendo los requisitos establecidos para el ensayo de inmersión-compresión, mientras que las

mezclas realizadas con un 50% de árido reciclado presentan una pérdida de resistencia excesiva (Pérez *et al.*, 2007).

Por otra parte, los valores del módulo dinámico son razonables, siendo mayores en mezclas con árido reciclado al 50% (Pérez *et al.*, 2007). Se ha podido llevar a cabo una dosificación de mezclas bituminosas que contienen árido reciclado en un 50% de peso en todas las fracciones. Estas mezclas tienen un contenido de betún superior al de las que son preparadas sólo con árido natural, y además, necesitan una mayor cantidad de filler, y sólo así, se han podido cumplir los requisitos establecidos por el PG-3 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2019) y la normativa mexicana (N·CMT·4·05·003/16, 2016) en el ensayo Marshall en carreteras de bajo tráfico, pero no se ha podido realizar una dosificación de mezclas realizadas únicamente con árido reciclado (Pérez *et al.*, 2007).

Metodología

Se realizó una investigación a fondo del estado del arte respecto a este tema en específico, tanto documental como histórica, para posteriormente proceder a realizar la caracterización de materiales y elaboración de la mezcla asfáltica como se muestra en la Fig. 1.

Metodología de ensayos

1. Caracterización de agregados gruesos (N·CMT·4·04/17, 2017).
2. Caracterización de agregados finos (N·CMT·4·04/17, 2017).

3. Caracterización del asfalto (N·CMT·4·05·004/18, 2018).
4. Diseño de las mezclas asfálticas con agregados RCD (Humboldt, Asphalt Testing Equipment, 2023)

La realización del programa experimental constó de 2 etapas:

Primera etapa. Obtención y estudio de las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, que fueron comparadas con las de los agregados naturales seleccionados para realizar las diversas experimentaciones.

Segunda etapa: Utilización de gruesos y finos en la composición de una mezcla asfáltica densa para carpeta de rodadura con la adición de un porcentaje controlado de árido reciclado, así como el diseño volumétrico para la obtención del contenido óptimo para cada mezcla, tanto la testigo, con agregado pétreo 100% natural, como para el agregado con sustitución del 20% de RCD, mediante la metodología Marshall.

Desarrollo experimental

Selección y análisis de los materiales

Se realizaron pruebas a los materiales que conformaron la mezcla asfáltica, tanto los áridos pétreos reciclados como los áridos pétreos naturales. Los agregados se analizaron conforme a las prescripciones establecidas en las normativas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (N·CMT·4·04/17, 2017) y la ASTM, donde se estableció como referencia el cumplimiento de los parámetros para un pavimento con tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones (N·CMT·4·05·003/16, 2016). Las



Figura 1. Metodología a seguir para el diseño de mezclas asfálticas.



pruebas realizadas a los materiales fueron las siguientes: densidad aparente en agregados pétreos (M·MMP·4·04·003/18, 2018), desgaste mediante la prueba de Los Ángeles (M·MMP·4·04·006/02, 2002), granulometría (M·MMP·4·04·002/02, 2002), partículas alargadas y lajeadas (M·MMP·4·04·005/08, 2008), humedad superficial y absorción (M·MMP·4·04·003/18, 2018), equivalente de arena (M·MMP·4·04·004/16, 2016), masa volumétrica seca suelta y masa volumétrica seca varillada (M·MMP·2·02·023/18, 2018).

El material en estudio es proveniente de la región de Morelia, Michoacán. Los agregados naturales fueron obtenidos del banco de material llamado La Roka, ubicado en la carretera Morelia-Uriangato-Cuto del Porvenir, los cuáles son producto de la trituración de las canteras cercanas, consistente en material 100% triturado de grava, sello y arena. Por otra parte, los

agregados pétreos reciclados provienen de la demolición de una edificación antigua en Morelia, Michoacán.

La granulometría para el diseño de la mezcla control consistió en un porcentaje en masa del 30% de grava, 27% de sello y 43% de arena, proporción óptima para que la curva granulométrica entrara en el límite establecido por la normativa mexicana (N·CMT·4·04/17, 2017). Para la granulometría con agregados reciclados, se realizó la sustitución del agregado RCD por la grava solamente, así obteniendo un porcentaje de 20% de RCD, y de materiales naturales 10% grava, 27% de sello y 43% de arena.

En la **Tabla 1** se muestran los resultados obtenidos para la caracterización del agregado, tanto natural como reciclado, que fueron empleados en la elaboración de la mezcla asfáltica:

Tabla 1
Caracterización de materiales para la mezcla asfáltica.

No.	Prueba	Valor obtenido	Especificación
1.- Agregado natural	PVSS grava	1.41 g/cm ³	M·MMP·1·08/03, 2003
2.- Agregado reciclado	PVSS grava reciclada	1.066 g/cm ³	M·MMP·1·08/03, 2003
3.- Agregado natural	PVSS arena	1.59 g/cm ³	M·MMP·1·08/03, 2003
4.- Agregado natural	Densidad específica efectiva	2.72 g/cm ³	M·MMP·4·04·003/18, 2018 ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)
5.-Agregado reciclado	Densidad específica efectiva	2.45 g/cm ³	M·MMP·4·04·003/18, 2018 ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)
6.- Agregado natural	Densidad específica bruta	2.67g/cm ³	M·MMP·4·04·003/18, 2018 ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)
7.- Agregado reciclado	Densidad específica bruta	2.20g/cm ³	M·MMP·4·04·003/18, 2018 ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)
8.- Agregado natural	Absorción	1.68%	ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)
9.- Agregado reciclado	Absorción	7.67%	ASTM C127-15 (ASTM International, 2015)

Tabla 1. Cont.

No.	Prueba	Valor obtenido	Especificación
10.- Agregado natural	Desgaste de Los Ángeles	15%	M·MMP·4·04·006/02, 2002 N·CMT·4·04/17, 2017
11.- Agregado reciclado	Desgaste de Los Ángeles	18.9%	M·MMP·4·04·006/02, 2002 N·CMT·4·04/17, 2017
12.- Agregado natural	Partículas alargadas y lajeadas	34%	ASTM D4791-19 (ASTM International, 2019) M·MMP·4·04·005/08, 2008 N·CMT·4·04/17, 2017
13.- Agregado reciclado	Partículas alargadas y lajeadas	33.5%	ASTM D4791-19 (ASTM International, 2019) M·MMP·4·04·005/08, 2008 N·CMT·4·04/17, 2017
14.- Agregado natural	Equivalente de arena	66.3%	M·MMP·4·05·005/02 ASTM D2419-22 (ASTM International, 2022)
15.- AC-20	Densidad del asfalto	1.03 g/cm ³	ASTM D71-94 (ASTM International, 2019) N·CMT·4·05·004/18, 2018
16.- AC-20	Viscosidad cinemática a 135 °C	533.98 m ² /s	M·MMP·4·05·005/02 ASTM D4402-06 (ASTM International, 2012) N·CMT·4·05·004/18, 2018
17.- AC-20	Viscosidad (temperatura de compactación y mezclado)	165-159 °C (mezclado) 152-147 °C (compactación).	M·MMP·4·05·005/02 ASTM D4402-06 (ASTM International, 2012) N·CMT·4·05·004/18, 2018
18.- AC-20	Determinación del contenido mínimo de asfalto	3.72% C.A. respecto al peso del agregado	Metodología Marshall (Humboldt, Asphalt Testing Equipment, 2023)

En la **Tabla 2** (N·CMT·4·04/17, 2017) se muestran las características que debe de cumplir el agregado a utilizar.

Se observó que cada uno de los resultados está dentro de los parámetros considerados por la normativa de la SCT para elaboración de mezclas asfálticas. Una vez analizados los elementos a utilizar que conforma la mezcla asfáltica y cumplen con la normativa, se procedió a realizar el diseño de la mezcla.

Diseño de la mezcla asfáltica con agregado pétreo y agregado en sustitución

La muestra control o testigo se diseñó para un tráfico de más de un millón y hasta diez millones de ejes equivalentes, con las especificaciones marcadas por la normativa de la SCT, por el método de diseño Marshall (Humboldt, Asphalt Testing Equipment, 2023). La mezcla con sustitución de agregados reciclados se diseñó bajo los mismos parámetros de granulometría

Tabla 2
Valores de referencia de calidad para una mezcla asfáltica densa por la SCT.

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Ángeles, % máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	35
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Tabla 3
Tabla comparativa de resultados entre la mezcla control y la mezcla con 20% de RCD.

Propiedades de la mezcla	Control	20% RCD	Valores de referencia (SCT)
Contenido óptimo de asfalto (%)	6.66	6.84	-
Gravedad específica (kg/cm ³)	2.35	2.19	-
Estabilidad (Kg)	809	828	816 min
Vacios (%)	4.80	6.00	3-5
Flujo (mm)	3.24	3.55	2-3.5
Vacios en el agregado mineral (VMA) (%)	17.6	11.8	14 min.
Vacios llenos de asfalto (VFA) (%)	72.7	47.8	65-75

gruesa y de función estructural que la muestra control; la única variante fue la sustitución del agregado RCD en 20% del total de la masa. Para esta prueba se sustituyó solamente grava por RCD, debido a las experiencias y estudios realizados anteriormente, de que el agregado RCD más fino que pasa la malla no. 4, presenta más inconsistencias y ya no es adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas. Los resultados comparativos se presentan en la **Tabla 3**.

A continuación, se presentan las diferentes figuras comparativas de resultados, en la **Fig. 2** se muestra el flujo Marshall correspondiente a la muestra testigo y a la mezcla con 20% de RCD, en la cual se puede observar que para el porcentaje óptimo de asfalto del 6.84%, la mezcla asfáltica se encuentra dentro del parámetro de 2 mm a 3.5 mm según la normativa (N·CMT·4-05-003/16, 2016).

En la **Fig. 3** se muestra la estabilidad Marshall correspondiente a la muestra testigo y a la mezcla con 20% de RCD, en la cual se puede observar que, para el porcentaje óptimo de asfalto del 6.84%, la mezcla asfáltica se encuentra por encima del parámetro mínimo de estabilidad que es de 816 kN, según la normativa (N·CMT·4-05-003/16, 2016).

A continuación, se presenta la **Fig. 4**, en la cual se realizó un análisis comparativo donde:

Mezcla 1, es el diseño óptimo con agregado pétreo 100% natural.

Mezcla 2, es el diseño óptimo con agregado pétreo 80% natural y 20% reciclado.

Como se puede observar, la masa requerida de agregado por m³ disminuye conforme aumenta el agregado de RCD, debido a que la densidad de este es menor al agregado pétreo natural, lo cual tiene repercusión en ahorro económico, y disminución del impacto ambiental al requerir menor masa de material, tanto en RCD como menor cantidad de asfalto para llegar al mismo volumen que la mezcla testigo.

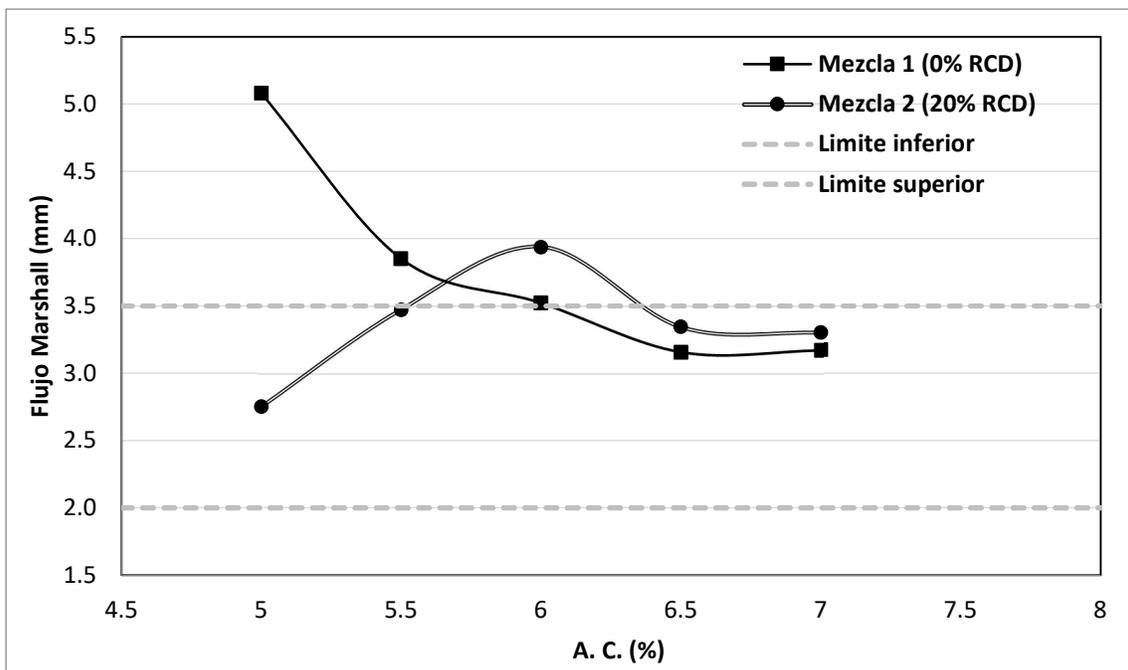


Figura 2. Flujo Marshall.

Conclusiones

Lo más sobresaliente del diseño óptimo con agregado grueso con 20% RCD y 80% natural, es la sustitución de agregado pétreo natural por agregado pétreo reciclado, que no afecta el desempeño físico-mecánico de la mezcla asfáltica respecto a la testigo, como

se puede observar en las **Figs. 1 y 2**. De hecho, se registraron resultados muy parecidos en cuanto a flujo y estabilidad y cumple con las características de calidad marcados por la SCT (N-CMT-4-05-003/16, 2016). Como beneficio adicional, es un material amigable con el medio ambiente, ya que ayuda a contrarrestar la explotación excesiva de bancos de material de agregados naturales, como lo podemos observar en la **Fig. 3**,

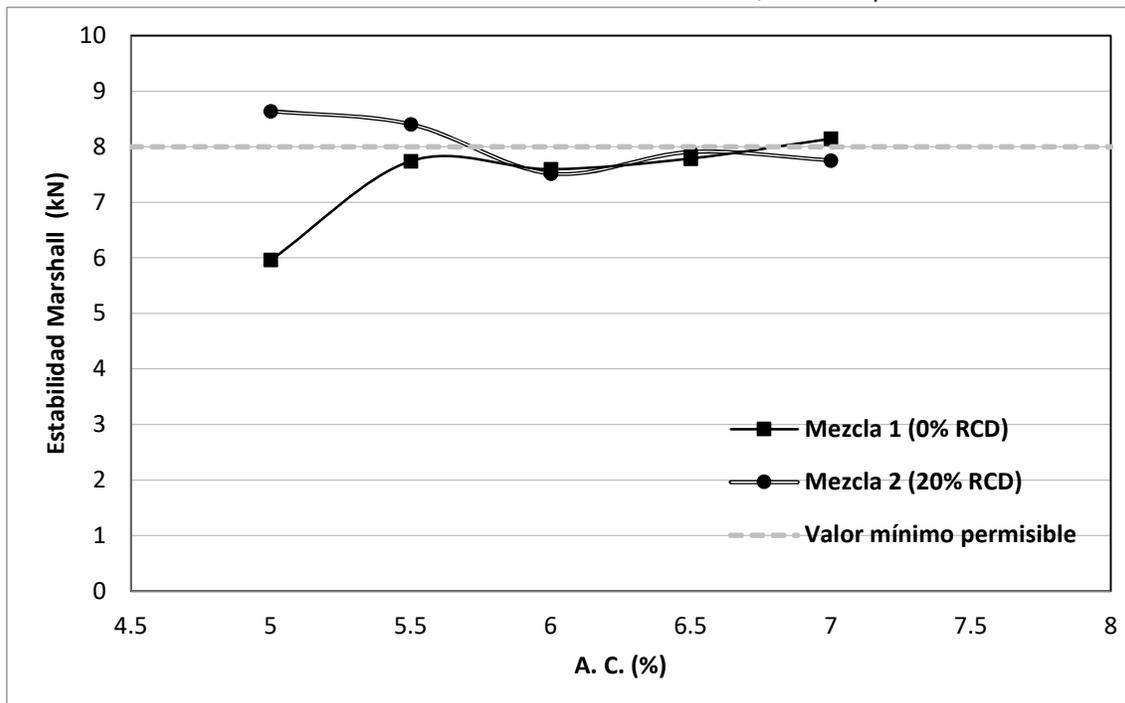


Figura 3. Estabilidad Marshall.

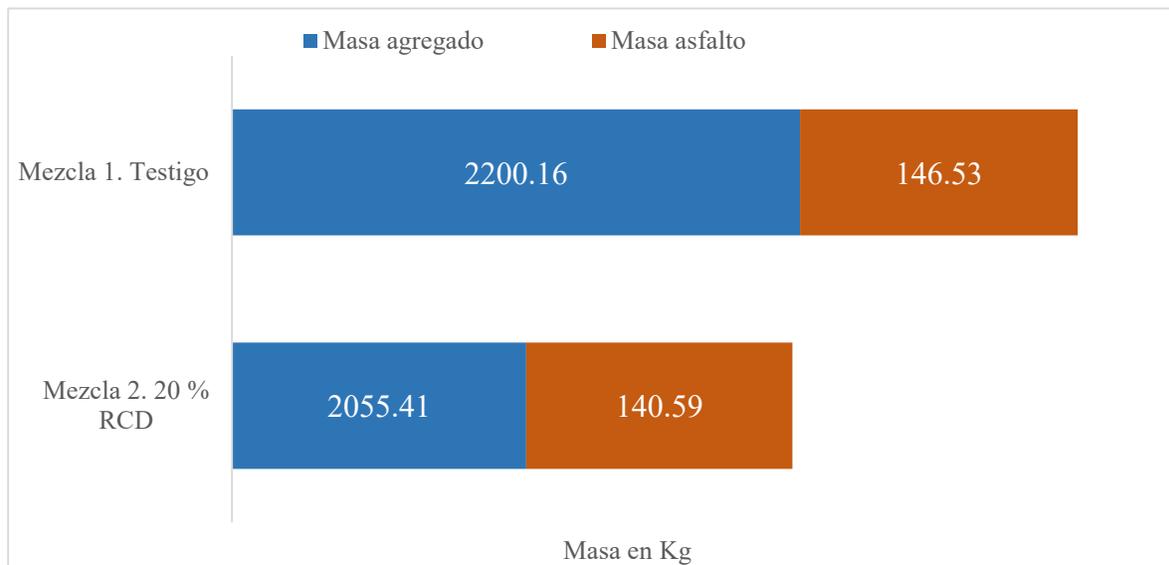


Figura 4. Masa por m³ de mezcla asfáltica producida.

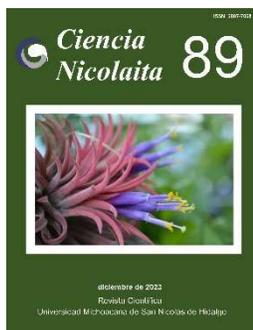
en donde se muestra que, para llegar al mismo volumen, se requiere menor cantidad de material reciclado debido a que su densidad es menor a la del agregado pétreo natural, por lo tanto, se necesita menor masa de este y menor masa de asfalto para llegar al mismo volumen.

Los parámetros de flujo y estabilidad, según la metodología Marshall (Humboldt, Asphalt Testing Equipment, 2023), cumplen adecuadamente con los valores establecidos por la normativa de la SCT (N·CMT-4-05-003/16, 2016), para tráfico de más de un millón, y hasta 10 millones de ejes equivalentes. Otra de las conclusiones a destacar, es que cuando se sustituye el 20% de RCD en la mezcla asfáltica, la estabilidad mejora y el flujo se mantiene prácticamente igual, debido a las características que adquiere por la sustitución del agregado reciclado.

Referencias

- ASTM International. 2012. ASTM D4402-06 Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. ASTM Standards
- ASTM International. 2015. ASTM C127-15 Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM Standards
- ASTM International. 2019. ASTM D4791-19 Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. ASTM Standards
- ASTM International. 2019. ASTM D71-94 Standard test method for relative density of solid pitch and asphalt (displacement method). ASTM Standards
- ASTM International. 2022. ASTM D2419-22 Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate. ASTM Standards
- Humboldt, Asphalt Testing Equipment. 2023. *Marshall Mix Design*. Illinois, U.S.A.
- Imelda Martínez D. 2013. Residuos de construcción y demolición (RCD) situación actual y correcta gestión para el proceso de reciclaje en la industria mexicana. Ciudad de México.
- M·MMP-1-08/03. 2003. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 1. Suelos y materiales para terracerías. 08. Masas volumétricas y coeficientes de variación volumétrica. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M·MMP-2-02-023/18. 2018. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 2. Materiales para estructuras. 02. Materiales para concreto hidráulico. 023. Masa volumetrica de los agregados pétreos. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M·MMP-4-04-002/02. 2002. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. 002. Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M·MMP-4-04-003/18. 2018. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos.

04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. 003. Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M-MMP-4-04-004/16. 2016. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. 004. Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M-MMP-4-04-005/08. 2008. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. 005. Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M-MMP-4-04-006/02. 2002. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. 006. Desgaste mediante la prueba de los Angeles de materiales petreos en mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- M-MMP-4-05-005/02. 2002. MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4. Materiales para pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 005. Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- Martínez-Molina W, Torres-Acosta AA, Alonso-Guzmán EM, Chávez-García HL, Hernández-Barrios H, Lara-Gómez C, Martínez-Alonso W, Pérez-Quiroz JT, Bedolla-Arroyo JA, González-Valdéz FM. 2015. Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT* 5(3):235-248.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2019. Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Madrid: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España.
- N-CMT-4-04/17. 2017. CMT. Características de los materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- N-CMT-4-05-003/16. 2016. CMT. Características de los materiales. 04 Materiales para pavimentos. 05 Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 003 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- N-CMT-4-05-004/18. 2018. CMT. Características de los materiales. 4. Materiales para pavimentos. 05. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. 004. Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG). Normativa para la infraestructura del transporte, SCT, México.
- Pérez I, Toledano M, Gallego J, Taibo J. 2007. Propiedades Mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. *Materiales de Construcción* 57(285):17-29.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Diseño metódico de un tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda

Methodical design of a drive train for a tip-wheel arrangement

Luis Enrique Ontiveros Rocha*, Juan Felipe Soriano Peña, Luis Alberto Valencia Garay, J. Jesús Pacheco Ibarra y Jesús Eduardo Rodríguez Gutiérrez

Para citar este artículo: Ontiveros Rocha Luis Enrique, Soriano Peña Juan Felipe, Valencia Garay Luis Alberto, Pacheco Ibarra J. Jesús y Rodríguez Gutiérrez Jesús Eduardo, 2023. Diseño metódico de un tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda. Ciencia Nicolaita no. 89, 177-195. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.709>



Historial del artículo:

Recibido: 14 de marzo de 2023
Aceptado: 1 de agosto de 2023
Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: 0935627g@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Diseño metódico de un tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda

Methodical design of a drive train for a tip-wheel arrangement

Luis Enrique Ontiveros Rocha*, Juan Felipe Soriano Peña, Luis Alberto Valencia Garay, J. Jesús Pacheco Ibarra y Jesús Eduardo Rodríguez Gutiérrez

Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

Este estudio se enfoca en el diseño de un subsistema de transmisión de potencia que será usado en la propulsión de un robot móvil con extremidades y ruedas; debe permitir al sistema robótico un desplazamiento en superficies estructuradas, y accidentadas, consumir la menor energía posible, y contar con un sistema de transmisión compacto y ligero. Para ello se presenta un modelo del comportamiento del arreglo de transmisión interactuando con el sistema robot donde se utilizarán como base del sistema engranajes armónicos, que tienen como principales características altas relaciones de transmisión en configuraciones espaciales relativamente pequeñas. Se emplea una metodología de diseño con un marco de referencia lógico de siete etapas, cuyo resultado es un concepto del sistema de transmisión que satisface los requerimientos específicos de operación.

Palabras clave: Diseño mecánico, metodología de diseño, arreglo extremidad-rueda, reductor armónico.

Abstract

This study focuses on the design of a power transmission subsystem that will be used in the propulsion of a mobile robot with limbs and wheels; it must allow the robotic system to move on structured and unstructured surfaces in addition to consuming as little energy as possible and allow the transmission system to be compact and light. For this, a model of the behavior of the transmission system interacting with the robot system is presented, where harmonic gears will be used as the base of the system, whose main characteristics are high transmission ratios in relatively small spatial configurations. A seven-stage logical framework design methodology is used, resulting in a transmission system design concept that satisfies specific operating requirements.

Keywords: Mechanical design, design methodology, wheel-leg array, harmonic drive.



Nomenclatura

A menos que sea indicado de otra manera, la nomenclatura utilizada se muestra a continuación:

Símbolo	Descripción
RMR	Robot móvil por ruedas.
WG	Generador de ondas.
FS	Flexspline.
CS	Cercha circular.
BC	Carcasa exterior.
n	Velocidad de rotación.
\emptyset (mm)	Diámetro.
OD (mm)	Diámetro exterior.
ID (mm)	Diámetro interior.
PC	Paso circular.
M	Módulo.
PD	Paso diametral.
R	Relación de transmisión.
Z_1	Número de dientes de la cercha circular.
Z_2	Número de dientes de la cercha flexible.
θ	Posición angular.
ω	Velocidad angular.
τ (N·m)	Torque.
v (m/s)	Velocidad lineal.
$m_{Max RMR}$ (Kg)	Masa del robot móvil por ruedas.
$V_{Max RMR}$ (m/s)	Velocidad máxima del robot móvil por ruedas.
$t_{para v max}$ (s)	Tiempo para alcanzar la velocidad máxima.
a_{Max} (m/s ²)	Aceleración máxima.
$\tau_{per motor}$ (N·m)	Torque requerido por motor.
r_{rueda} (m)	Radio de la rueda.

Introducción

Uno de los componentes más importantes de los sistemas robóticos móviles por ruedas (RMR) es el sistema de movilidad, el cual debe estar integrado por componentes que permitan transmitir la potencia de un motor eléctrico a un arreglo de rueda, comúnmente el tipo de rueda usado para para este propósito es el tipo castor.

El arreglo o sistema de transmisión de potencia debe permitir al robot desplazarse por terrenos donde, no solo se tengan obstáculos fijos, sino también obstáculos móviles con patrones de movimiento impredecibles.

Los sistemas de transmisión de potencia, en general, son complejos mecanismos cuya función consiste en recibir movimiento y torque de algún tipo de fuente giratoria (como puede ser un motor eléctrico) y transmitirlo a un componente de salida; estos sistemas pueden aumentar o reducir la velocidad, a la vez que modifican el torque (Gurocak, 2016; Stokes, 1992; Ugural, 2015; Uicker *et al.*, 2016).

Existe una gran variedad de transmisiones de potencia, las más empleadas son las que usan engranes, cuyas características dependerán de múltiples parámetros como los son:

- La naturaleza de la máquina impulsada.
- La cantidad de potencia por transmitir.
- La velocidad de rotación de la fuente motriz.
- La velocidad de salida deseada en la transmisión.

Una de las opciones actuales son los sistemas de engranajes armónicos, que pueden ser configurados como reductores, los cuales proporcionan altas relaciones de transmisión en configuraciones espaciales relativamente pequeñas, y en una sola etapa (Angeles, 2007; Jones *et al.*, 1998). Desde su invención por C. Walton Musser (1959), estos sistemas de engranajes han encontrado gran aceptación y uso entre los ingenieros mecánicos para un amplio número de aplicaciones como la robótica, equipos médicos, prensas de impresión y vehículos, etc. (Perez-Diaz *et al.*, 2015; Tuttle, 1992;1993).

En general, los arreglos de engranajes armónicos, emplean una onda continua de deflexión a lo largo de un engrane flexible que permite el contacto gradual de los dientes. Todas las transmisiones de engranajes armónicos están compuestas por al menos tres partes (Harmonic Drive AG, 2019), como se muestra en la **Fig. 1**.

1. **Generador de onda elíptica.** Es el elemento que recibe la potencia del eje del motor de la fuente motriz, consiste en un arreglo de rodamientos con un elemento rígido y elíptico que se encuentra en el centro y un elemento flexible de pared delgada en el exterior.
2. **Cercha flexible (flexspline).** Es un casquillo cilíndrico de pared delgada dentado en el exterior de su porción cilíndrica.

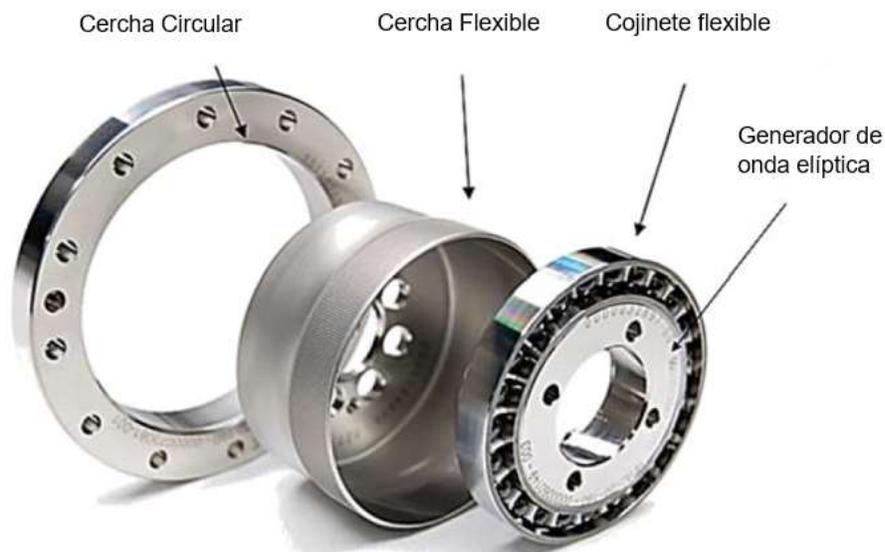


Figura 1. Partes de un sistema de engranajes armónico.

3. **Cercha circular.** Es un anillo rígido con dientes maquinados a lo largo del interior con un diámetro de paso ligeramente más grande que el de la cercha flexible.

El ensamblaje del sistema se muestra en la **Fig. 1**, en donde, el generador de onda queda anidado dentro de la cercha flexible, forzando al perfil dentado de pared delgada a adoptar la forma elíptica del generador de ondas. A su vez, el subensamble del generador de ondas y la cercha flexible son introducidos dentro de la cercha circular, entonces los dientes externos de la cercha flexible engranan con los dientes internos de la cercha circular a lo largo del eje mayor de la elipse del generador de ondas (Jelaska, 2012; Tuttle, 1992).

El diseño que se presenta, se basa en un tren de transmisión de tipo armónico, para el sistema de movilidad de un arreglo extremidad-rueda, capaz de integrarse a la plataforma de un RMR cuyas características geométricas, y necesidades de desplazamiento se describen en la **Tabla 1**.

Tabla 1
Condiciones de operación del robot deseadas.

	Valor	Unidades
r_{rueda}	0.085	m
$m_{Max RMR}$	25	Kg
$V_{Max RMR}$	1.5	m/s
$\tau_{Min rueda}$	2.15	N-m
$t_{Para Vmax}$	1.5	s
a_{Max}	1	m/s ²

Modelo matemático de los reductores armónicos

La velocidad de rotación de la cercha circular está definida por la relación de transmisión de acuerdo a la ecuación 1:

$$N = \frac{z_2}{z_2 - z_1} \quad (1)$$

Donde z_2 es el número de dientes en la cercha flexible y z_1 el número de dientes en la cercha circular. Dado que z_2 es tomado comúnmente como $z_2 = 100 \dots 640$, y que $(z_1 - z_2) = 2$ entonces la relación

de transmisión de estos sistemas comúnmente está en el orden de $i = 50 \dots 320(!)$.

En los catálogos comerciales, se le asigna a cada reductor armónico una relación de transmisión, N , con la cual se describe el comportamiento de su posición, velocidad y torque. Específicamente dada una rotación conocida de dos o tres de los puertos del sistema armónico, así como el valor de N , la rotación ideal del tercer puerto del sistema armónico puede ser predicho por la siguiente ecuación (Tuttle, 1992):

$$\theta_{wg} = (N + 1)\theta_{cs} - N\theta_{fs} \quad (2)$$

Donde θ_{wg} es la posición angular del generador de onda, θ_{cs} es la posición angular de la cercha circular y θ_{fs} es la posición angular de la cercha flexible. La posición angular de los tres elementos descritas en la ecuación (2) están definidas en el mismo marco de referencia.

Entonces, dado que N es constante bajo asunciones ideales, la derivada de esta relación produce una restricción de velocidad similar:

$$\omega_{wg} = (N + 1)\omega_{cs} - N\omega_{fs} \quad (3)$$

Donde ω_{wg} , ω_{cs} y ω_{fs} representa la velocidad angular de los tres componentes del sistema de engranajes armónicos. En estas ecuaciones, se puede observar que, si la velocidad de la cercha circular es cero, el generador de onda puede rotar en dirección opuesta N -veces más rápido que la cercha flexible. En una configuración diferente, al fijar la cercha flexible, obliga a que el generador de onda gire $(N + 1)$ veces más rápido que la cercha circular en la misma dirección. Al aplicar la ley de conservación de la energía en las partes del sistema armónico, el comportamiento del torque ideal se puede definir de la siguiente forma:

$$T_{wg} = \frac{1}{(N+1)}T_{cs} = -\frac{1}{N}T_{fs} \quad (4)$$

Donde T_{wg} , T_{cs} y T_{fs} son los torques, definidos con una convención idéntica de signos, vista para los tres componentes del sistema armónico. Se aprecia que el torque en uno de los elementos del sistema armónico establece el comportamiento de los otros dos elementos. Denotando que el torque en la cercha flexible es cercanamente equivalente a el torque en la cercha circular, siendo aproximadamente N -veces más

grande que la del torque en el generador de onda. Así, al aplicar las ecuaciones de torque, velocidad y posición presentadas arriba, el comportamiento dinámico del sistema de transmisión armónico queda completamente definido bajo suposiciones ideales.

Metodología de diseño conceptual

Para el diseño del sistema de transmisión, una metodología con marco de referencia lógico es utilizada, de manera que el proceso de diseño se realice de forma sistemática y ordenada brindando un mayor esclarecimiento del trayecto de diseño que se tuvo para llevar hasta la presentación de la solución final de diseño.

En la **Fig. 2** podemos observar las siete etapas de diseño colocadas dentro del modelo simétrico de problema/solución, donde podemos ver cómo se relaciona cada etapa con los problemas, soluciones generales y secundarias que se tienen (Cross, 2000).

En este modelo se integran los aspectos procedurales del diseño con los aspectos estructurales de las problemáticas de diseño. El aspecto procedural es representado por la secuencia de métodos enlistados

del uno al siete; mientras que los aspectos estructurales son representados por las flechas azules que muestran las relaciones conmutativas entre problema y solución, la relación jerárquica entre problema general/problema secundario, y soluciones secundarias/solución general.

Clarificación de objetivos

La creación de un árbol de objetivos ofrece un formato claro y útil para el planteamiento del problema, entendiéndose como objetivos de diseño las necesidades del usuario o propósito del producto. En el proceso de clarificación de objetivos de diseño, se crea un listado jerárquico de los objetivos, así como las diversas relaciones entre ellos (Ver **Fig. 8** en anexos). Es decir, partimos en la cúspide con la descripción completa del problema de diseño general, avanzando hacia abajo, nivel a nivel, dividiendo el problema general en problemas secundarios planteando la pregunta: ¿Cómo?; hasta conseguir una subdivisión del problema en el que cada problema secundario sea claro y manejable.

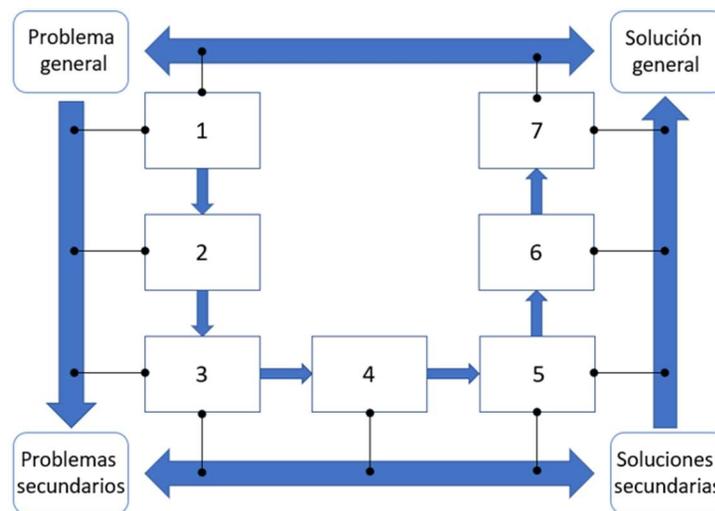
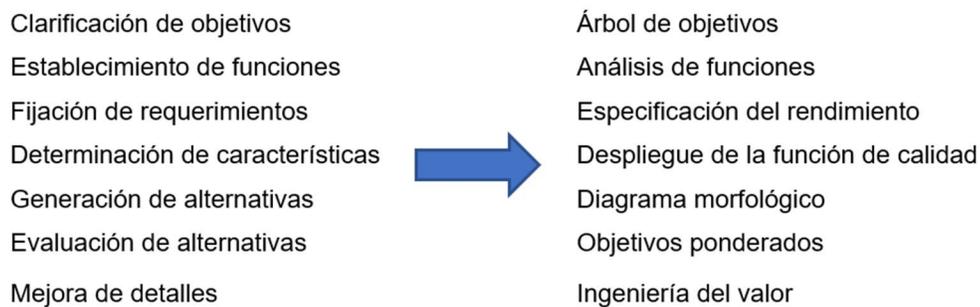


Figura 2. Siete etapas del proceso de diseño dentro del modelo simétrico de problema/solución (Cross, 2000).



Una vez se llegue hasta el nivel más bajo del árbol, se debe regresar hacia arriba planteando la pregunta: ¿Por qué?; de manera que el nivel superior del árbol sea el porqué del nivel en que nos encontremos.

Establecimiento de funciones

Las funciones esenciales son aquellas que debe satisfacer el subsistema motor que se diseñará independientemente de su morfología. Para realizar esto se utiliza el modelo de caja negra, que se muestra en la **Fig. 3**; además se puede crear un diagrama de bloques que muestra las interacciones entre las funciones secundarias, dentro de la caja.

Podemos observar, en azul, el modelo de caja negra cuyo objetivo es esclarecer aquello que debe hacer el diseño del subsistema motriz y no el cómo se va a lograr; dentro de la caja se encuentran todas las funciones necesarias para convertir las condiciones de entrada en condiciones de salida. Es conveniente que el sistema de caja negra sea lo más simple posible; para después exponer (abriendo la caja) las interacciones entre subfunciones que se encuentran dentro de ella. Se han planteado tres subfunciones que componen el subsistema motriz o tren de transmisión; esto de acuerdo a las transformaciones que debe sufrir la energía, es decir, se requiere un motor que genere el desplazamiento, posteriormente un sistema que acondicione la velocidad y el torque del motor (o reductor) y finalmente un sistema que permita frenar al robot (o freno).

Fijación de requerimientos

En las etapas tempranas de diseño usualmente se enumera una serie de características que representan el funcionamiento ideal del dispositivo, y frecuentemente, dichas características están mezcladas entre las de tipo cualitativas y las cuantitativas. Por ello, es común emplear, en primera instancia, un listado que fije aquellas características que definan al objeto-idea.

En la **Tabla 2** se muestra una lista de fijación de requerimientos para asentar aquellas características que son demandas y algunas otras que se pueden separar como deseos. Es decir, las demandas son aquellas características que son necesarias para que el diseño cumpla su función mientras que los deseos son características que, si bien no son esenciales, están presentes en la mente del usuario final. Es construida con la finalidad de tomar en cuenta las necesidades y preocupaciones del sistema dentro del robot móvil. Como podemos observar, del lado derecho se encuentran los requerimientos establecidos por el diseñador y del lado izquierdo la asignación de “demanda” o “deseo” que se le otorga a cada uno.

Determinación de características físicas

La determinación de características físicas del tren de transmisión se ha llevado a cabo mediante la implementación del método de despliegue de la función de calidad o QFD por sus siglas en inglés (*Quality Function Deployment*). Este método permite traducir aquellos atributos del diseño que son vistos desde la perspectiva del cliente o usuario final en características ingenieriles en términos de sus variantes físicas;

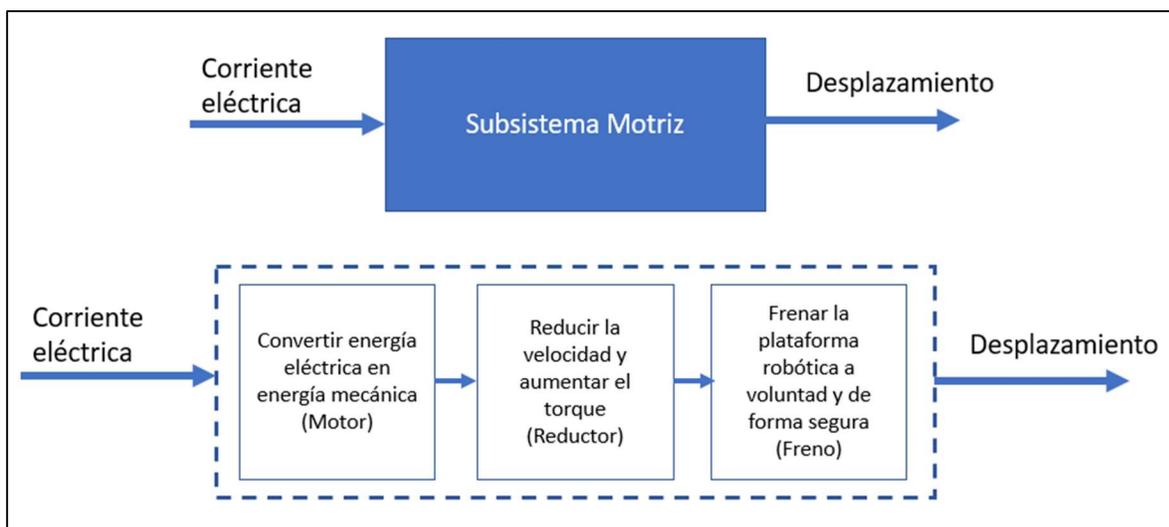


Figura 3. Diagrama de caja negra y diagrama de bloques de funciones secundarias.

Tabla 2
Especificación de rendimiento y separación en demandas y deseos.

Subsistema de movilidad	
D y d	Requerimientos
D	Compacto (Un cubo de 150×150×150 mm aprox.)
d	Ligero (Preferiblemente menos de 1 Kg y no más de 1.5 Kg)
d	Que todas las partes integradas estén en una sola carcasa
D	Fácil de acoplar con los otros subsistemas de la plataforma robótica
D	Eficiencia energética
d	Que sea visualmente estético
D	Freno de respuesta rápida
D	Velocidad de salida similar al andar de una persona (1.5 m/s aprox.)
D	Que use baterías
d	Que este protegido del polvo y tierra
D	Que las partes móviles internas no sean un riesgo para el usuario
D	Baja velocidad de rotación y alto torque
d	Ensamble sencillo
d	Pocas piezas
D	Costo reducido en comparación a los existentes en el mercado
d	Piezas de geometría simple
d	Resistente a la corrosión
D	Fácil lubricación

D – Demandas; d – deseos

priorizando de esta manera la voz del cliente sobre la de ingeniería. El método consta de los siguientes pasos (Cross, 2000):

1. Identificar los requerimientos del cliente en términos de los atributos del producto.
2. Determinar la importancia relativa de los atributos.
3. Evaluar los atributos de los productos de la competencia.
4. Dibujar una matriz de atributos del producto contra características de ingeniería.
5. Identificar las relaciones entre características de ingeniería y atributos del producto.
6. Identificar cualquier interacción relevante entre características de ingeniería
7. Establecer cantidades objetivo a ser alcanzadas por las características de ingeniería.

En la **Tabla 8** (ver anexos) se presenta una matriz de atributos del producto contra las características de ingeniería; esto con la finalidad de relacionar las propiedades de ingeniería que influyen en los atributos finales del subsistema de movilidad.

En la parte superior se muestran los atributos técnicos definidos como requerimientos de ingeniería y en la parte izquierda se muestran los atributos que representan el funcionamiento deseado del RMR (Robot Móvil por Ruedas), la matriz de atributos es completada, estableciendo como es que los requerimientos de ingeniería impactan en los requerimientos del cliente, para ello se estableció una escala de relaciones que va del 1 al 9, donde 1 representa una relación débil y 9 una relación fuerte. La importancia para el cliente es posteriormente multiplicada por cada valor de la matriz de relaciones para definir una puntuación ponderada de cada uno de los requerimientos del

cliente y cada uno de los requerimientos de ingeniería. Finalmente, gracias a esta matriz y siguiendo el método podemos establecer una escala de prioridades (del 1 al 12) dividiendo la puntuación de importancia técnica entre la puntuación total ponderada por el cliente, quedando como se muestra en la **Fig. 4**.

Gracias a este método ha sido posible entender a profundidad el problema de diseño, traduciendo las necesidades del cliente en características de ingeniería y estableciendo objetivos medibles.

Generación de alternativas

La generación de alternativas se llevará a cabo por medio de una tabla de análisis morfológico con la finalidad de determinar las posibles formas que puede asumir el subsistema de movilidad.

Esta tabla de análisis morfológico pretende desplegar el rango completo de elementos, componentes o soluciones secundarias que pueden ser combinadas entre sí para generar una solución general; ampliando de esta manera la búsqueda de posibles soluciones.

En la **Tabla 3** se muestra el diagrama morfológico que resume dicho análisis para la generación de alternativas de diseño del tren de transmisión; se muestran un máximo de 4 soluciones para un total de 4 subfunciones dándonos un total de 64 posibles combinaciones ($4 \times 2 \times 4 \times 2$).

A pesar de que se han podido discutir las 64 posibles combinaciones planteadas por la tabla de análisis morfológico, solo 3 alternativas de solución (las más prometedoras para el equipo) han sido exploradas a mayor profundidad:

1. Alternativa con un motor DC con escobillas, reductor armónico convencional y freno de tambor dentro de la cercha flexible.
2. Alternativa con un motor DC sin escobillas, un reductor armónico con cercha flexible recortada y sin sistema de freno integrado.
3. Alternativa con un motor de flujo axial PCB (*Printed Circuit Board*) y un arreglo de imanes permanentes, reductor de cercha flexible recortada sin sistema de freno mecánico.

Subsistema de movilidad	Importancia para el cliente	Peso máximo	Espacio máximo (15x15x15 cm)	Diámetro máximo	Velocidad máxima	T. para velocidad máx.	Angulo de ascenso máx.	Torque mínimo	Aceleración mínima	Eficiencia del motor	Eficiencia transmisión	# Baterías x Subsistema	Horas x Carga batería	Puntuación ponderada
Unidades	/	Kg	cm ³	cm	m/s	Seg	°	Nm	m/s ²	%	%	#	/	
Metas	/	2	3375	20	1.5	1	20	6	1.5	70	80	2	3	
Puntuación de importancia técnica	/	189	224	210	210	118	65	204	126	190.5	219.5	54	80	1890
Importancia %	/	10%	12%	11%	11%	6%	3%	11%	7%	10%	12%	3%	4%	100%
Rango de prioridades	/	7	1	3	3	9	11	5	8	6	2	12	10	

Figura 4. Resultados de la matriz de atributos del producto contra características de ingeniería, se ha establecido el rango de prioridades.

Tabla 3
Análisis morfológico para obtención de diferentes soluciones de diseño.

Soluciones		1	2	3	4
Subfunciones					
1	Desplazamiento	Motor DC con escobillas	Motor DC sin escobillas	Motor DC flujo axial, imanes de neodimio convencionales	Motor DC flujo axial, imanes de neodimio arreglo Hallbach
2	Velocidad/Potencia	Transmisión armónica convencional	Transmisión armónica con cercha flexible recortada	/	/
3	Freno	Freno de tambor dentro de la cercha flexible	Freno de disco fuera de la cercha flexible	Sin sistema de freno	Sistema de freno regenerativo
4	Salida	Salida por banda a rueda o brazo	Conexión directa a rueda o brazo	/	/

Evaluación de alternativas

Una vez definidos los diseños preliminares de las tres alternativas seleccionadas, se procede a realizar un análisis comparativo de las principales características ingenieriles de estos. Para ello es necesario determinar cómo se desempeña cada alternativa en cada característica de diseño que representa un objetivo. Se han considerado como objetivos de diseño aquellas características morfológicas que afectan directamente el desempeño del tren de transmisión y que fueron obtenidas gracias el modelado en 3D.

Características ingenieriles u objetivos de diseño:

- a. Volumen
- b. Diámetro
- c. Largo
- d. Masa
- e. Número de piezas

Se han ordenado las características ingenieriles a través de una sencilla comparativa entre ellas; tomando una característica y comparando si dicha característica es más importante que las otras, creando así una tabla con ceros y unos de la que obtenemos el peso de cada una de ellas (**Tabla 4**).

Tabla 4

Tabla comparativa de pares de objetivos.

Objetivos	A	B	C	D	E	Totales de fila
A	-	1	1	1	1	4
B	0	-	0	0	1	1
C	0	1	-	1	1	3
D	0	1	0	-	1	2
E	0	0	0	0	-	0

Si el objetivo es más importante que aquel contra el que se le compara se asigna un 1; si no lo es, se asigna un 0. Una vez ordenados los objetivos por im-

portancia se asignan valores numéricos a cada uno representando su peso en relación a los otros objetivos (**Tabla 5**).

Tabla 5

Peso de cada objetivo de diseño.

0.30	A
0.25	C
0.20	D
0.15	B
0.10	E

Esta escala representa los valores de utilidad relativa comparada entre los mismos objetivos de diseño, siendo el volumen del dispositivo final el requerimiento más importante y cómo los demás requerimientos se comparan con él. Se emplea un diagrama de evaluación de objetivos ponderados para plasmar de una manera más clara, tanto la evaluación como la comparación de las alternativas de diseño. Cada objetivo de cada alternativa es calificado de manera que se le asigna el puntaje más alto (10) a la alternativa con la mejor magnitud, las otras dos soluciones son calificadas en función de la mejor magnitud través de la siguiente formula:

$$Calif_{sol} = 10 \times \left(\frac{Mejor\ magnitud}{Magnitud\ sol.x} \right) \quad (5)$$

Se obtienen valores numéricos para cada objetivo multiplicando el peso por la calificación; dicho valor es sumado con los otros valores de cada alternativa para obtener un valor general de utilidad (**Tabla 6**).

Ingeniería de detalle

Se ha tomado como el final de un primer ciclo de diseño todo el trabajo que se ha hecho previamente

Tabla 6

Diagrama de evaluación de objetivos ponderados para las tres alternativas de solución para el diseño de un tren de transmisión.

Objetivo	Peso	Parámetro	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
			Magnitud	Calificación	Valor	Magnitud	Calificación	Valor	Magnitud	Calificación	Valor
Volumen	0.3	cm ³	948	6.8	2.0	642	10.0	3.0	1037	6.2	1.9
Largo	0.25	mm	175	3.6	0.9	63.5	10.0	2.5	96.5	6.6	1.6
Peso	0.2	Kg	1.356	5.7	1.1	0.775	10.0	2.0	0.854	9.1	1.8
Diámetro	0.15	mm	138	9.9	1.5	193.5	7.1	1.1	137	10.0	1.5
# de Piezas	0.1	/	31	8.1	0.8	25	10.0	1.0	26	9.6	1.0
Valor General de Utilidad					6.4		9.6		7.8		

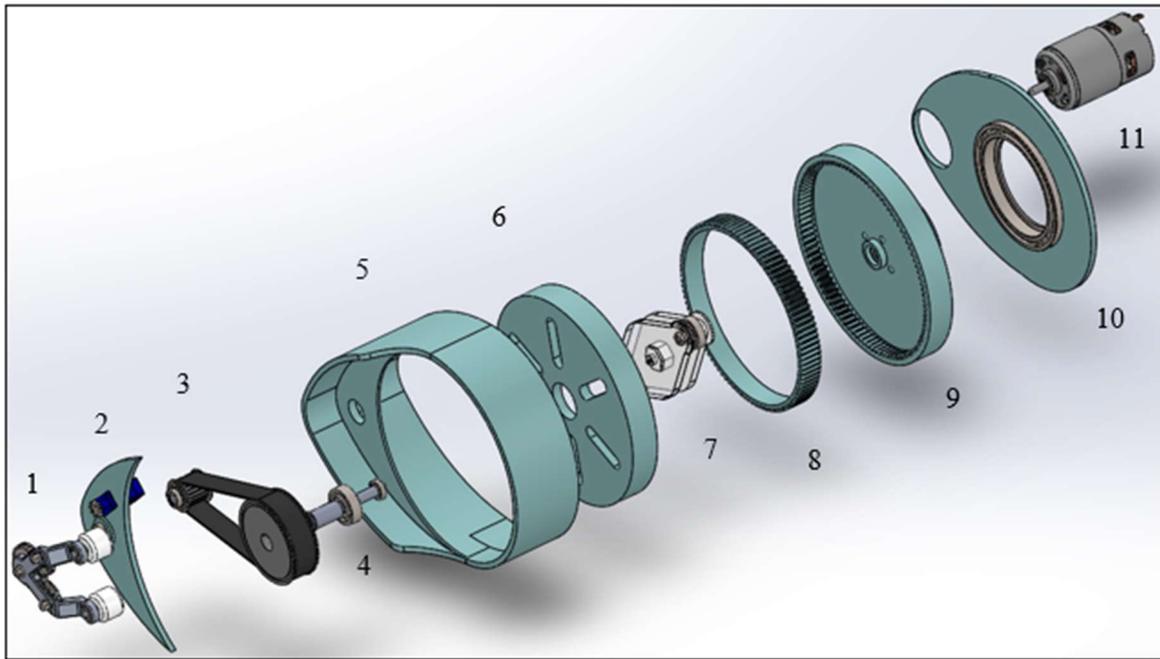


Figura 5. Diseño final del tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda, vista explosionada. Prototipo Final V2.5. De izquierda a derecha tenemos: 1. Subsistema tensor de banda, 2. Tapa superior de la carcasa, 3. Subsistema poleas y banda síncrona, 4. Eje del reductor con rodamientos, 5. Cuerpo de la carcasa exterior, 6. Tapa superior del reductor, 7. Subsistema generador de ondas, 8. Flexspline recortado, 9. Tapa inferior del reductor, 10. Tapa inferior de la carcasa, 11. Motor RS-550.

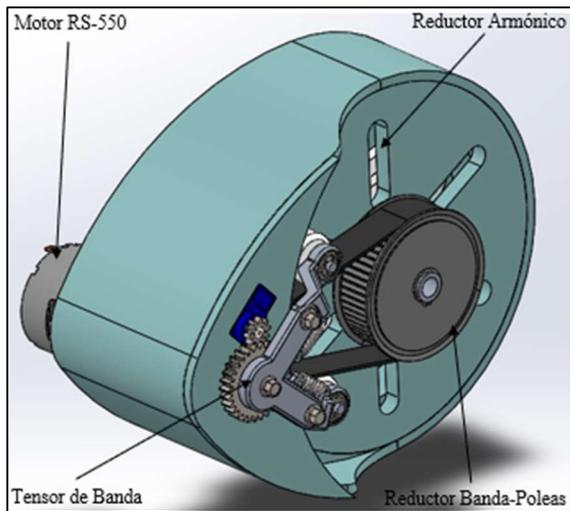


Figura 6. Subsistemas del diseño final del tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda.

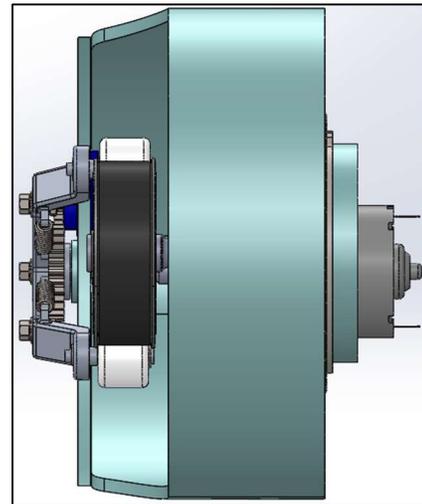


Figura 7. Diseño final del tren de transmisión para un arreglo extremidad-rueda, vista lateral.

hasta este punto. En las **Figs. 5, 6 y 7**, se muestran las características físicas finales del tren de transmisión para el RMR de locomoción por extremidades-ruedas.

Después de múltiples iteraciones de diseño sobre la alternativa 2, se ha diseñado un tren de transmisión híbrido con un sistema de poleas y banda síncrona cuya relación de reducción es de 3:1, en serie con un reductor armónico de relación 50:1; por lo que su velocidad final máxima es de 1.57 m/s y su torque pico

es de 71 N-m. Dicho sistema ocupa un espacio de 205 × 156.9 × 119.6 mm en las tres coordenadas en sus elementos más alejados; y su peso final es de 1.102 Kg de acuerdo a las propiedades del modelo 3D.

Modelo dinámico del tren de transmisión en Simulink Simscape

Se ha modelado el comportamiento dinámico del robot móvil por ruedas con ayuda de Simulink Simscape (**Fig. 10** anexo) con la finalidad de determinar las relaciones de transmisión del reductor armónico, del sistema de poleas y banda síncrona, considerando tanto las variables de entrada al sistema reductor (velocidad angular del motor, torque del motor e inercias de los elementos que lo componen) como el comportamiento de las variables de salida del sistema reductor (velocidad lineal del robot, torque en el eje de la rueda y aceleración máxima del robot).

El comportamiento del torque y la velocidad angular a la salida del reductor armónico, así como la velocidad lineal del robot se muestran en las **Figs. 11, 12 y 13** (anexos).

Conclusiones

El uso tanto de técnicas creativas como de métodos con marco de referencia lógico proveen al diseñador de las herramientas adecuadas para alcanzar múltiples alternativas de diseño, sorteando bloqueos, definiendo claramente las demandas del dispositivo diseñado y la subsecuente validación de la elección de una de las alternativas de diseño encontradas sobre las otras. Esto nos ha permitido concentrarnos en el diseño de un solo prototipo, teniendo en mente los requerimientos finales del producto para avanzar a la ingeniería de detalle y dejar el camino trazado para una subsecuente etapa de ingeniería de valor.

Los reductores armónicos son sistemas sumamente eficientes para reducir la velocidad contra el espacio que necesitan; en la **Fig. 9**, comparando contra sistemas epicicloidales convencionales; podemos observar una pendiente más pronunciada en la recta que representa la relación de reducción vs el diámetro del sistema. Es decir, la relación entre el diámetro del sistema vs la relación de transmisión se comporta de manera lineal (idealmente) y dependerá de manera directa de la geometría del diente y las restricciones dimensionales del reductor final; no obstante, al reducir el tamaño de diente, el sistema manifiesta problemas como la manufactura del mismo y una complejidad de ensamblaje mayor; al reducir el tamaño del diente, debe reducirse también la tolerancia de

coaxialidad entre el flexspline y la cercha circular, volviéndose además proporcionalmente más susceptibles a perturbaciones en forma de vibración.

Referencias

- Angeles, J. 2003. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. En *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/b97597>
- Cross, N. 2021. *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. http://elibrary.unpas.ac.id/index.php?p=show_detail&id=17843
- Gurocak, H. 2015. Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications. https://openlibrary.org/books/OL29302717M/Industrial_Motion_Control
- Harmonic Drive AG. 2019. Reducer Catalog. Harmonic Drive Systems, Inc. https://www.harmonicdrive.net/_hd/content/documents1/reducer%20catalog_US.pdf
- Jelaska, D. 2012. *Gears and Gear Drives*. <https://www.amazon.com/Gears-Gear-Drives-Damir-Jelaska/dp/111994130X>
- Jones, J., Seiger, B. A., & Flynn, A. M. 1998. *Mobile Robots: Inspiration to Implementation, Second Edition*. <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429065118>
- Pérez-Díaz, J., Díez-Jiménez, E., Valiente-Blanco, I., Cristache, C., Álvarez-Valenzuela, M. A., Sánchez-García-Casarrubios, J., Ferdeghini, C., Canepa, F., Hornig, W., Carbone, G., Plechacek, J., Amorim, A., Frederico, T., Gordo, P., De Abreu, J. F., Sanz, V., Ruiz-Navas, E. M., & Martínez-Rojas, J. 2015. Performance of Magnetic-Superconductor Non-Contact Harmonic Drive for Cryogenic Space Applications. *Machines*, 3(3), 138-156. <https://doi.org/10.3390/machines3030138>
- Stokes, A. 1992. *Manual Gearbox Design*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA17182573>
- Tuttle, T. D. 1992. Understanding and Modeling the Behavior of a Harmonic Drive Gear Transmission. En *NASA STI/Recon Technical Report N* (Vol. 93, p. 24152). <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a259610.pdf>
- Tuttle, T., & Seering, W. P. 2002. *Modeling a harmonic drive gear transmission*. <https://doi.org/10.1109/robot.1993.291889>
- Ugural, A. C. 2015. Mechanical Design of Machine Components. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/b18000>



Uicker, J. J., Pennock, G. R., Shigley, J. E., & McCarthy, J. M.
2003. *Theory of Machines and Mechanisms*. *Journal of
Mechanical Design*, 125(3), 650.
<https://doi.org/10.1115/1.1605769>

Anexos

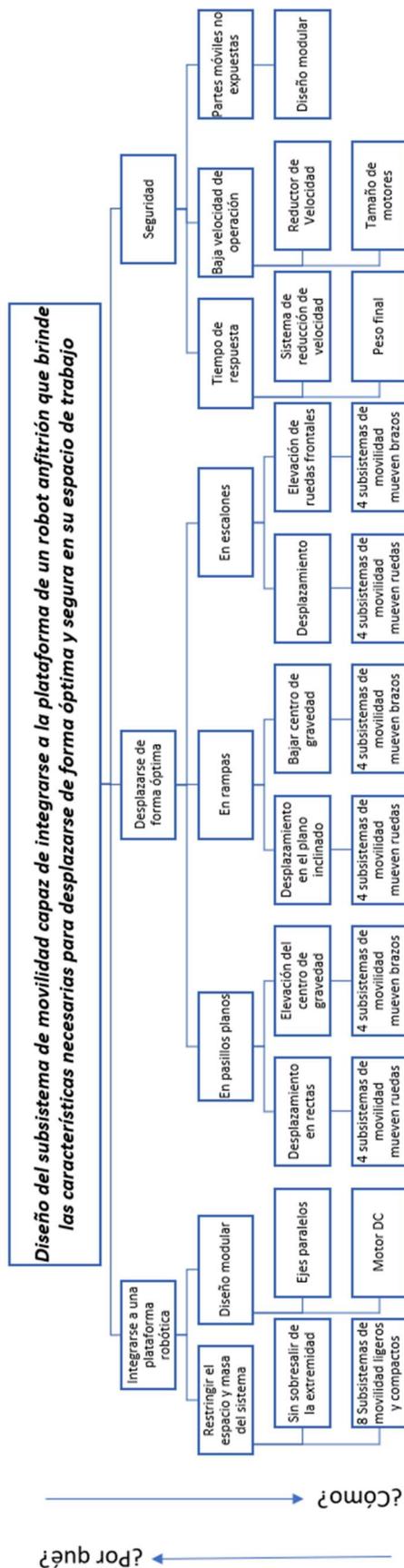


Figura 8. Árbol de objetivos para el diseño del tren de transmisión. Leyendo de arriba hacia abajo encontramos el cómo y leyendo de abajo hacia arriba encontramos el por qué.



Tabla 7
Matriz de interacciones de requerimientos para el tren de transmisión (o subsistema de movilidad).

Subsistema de movilidad			REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA													
			Importancia para el cliente	Peso máximo	Espacio máximo (15x15x15 cm)	Diámetro máximo	Velocidad máxima	T. para velocidad máx.	Angulo de ascenso máx.	Torque mínimo	Aceleración mínima	Eficiencia del motor	Eficiencia transmisión	# Baterías x Subsistema	Horas x Carga batería	Puntuación ponderada
Desempeño funcional	Ensamblaje	Piezas sencillas	2	3	1	3										14
		Fácil de ensamblar	3		3	3										18
		Pocas piezas	2	6	7	5										36
	Funcionamiento del RMR	Baterías como fuente	*													
		Fuerza de los brazos	5	8	8	6	8	7		9		8	9		8	355
		Baja velocidad	5				9	4	6	8		7	9			215
Espacio y peso	Acoplamiento al RMR	Eficiente	4								9	9			72	
		Fácil mantenimiento	2		8	6									28	
		Modular	4		9	7									64	
	Tiempo de respuesta ante obstáculos	No sobresalga	3		9	8									51	
		Ligero	5	9	7	5	6	5	6	8	7	7	7	9	8	420
		Freno rápido	4	8			9				8					100
Apariencia	Maniobrabilidad	3	9			8	6		8	8	4	4	3		150	
	Robusto	3	9		7				5		5	5			93	
	Compacto	5		9	9	7	4	1	8	7					225	
	Silencioso	3.5									5	9			49	
Unidades		/	Kg	cm ³	cm	m/s	Seg	°	Nm	m/s ²	%	%	#	/		
Metas		/	1	3375	20	1.5	1	20	6	1.5	70	80	2	3		
Puntuación de importancia técnica		/	189	224	210	210	118	65	204	126	190.5	219.5	54	80	1890	
Importancia %		/	10%	12%	11%	11%	6%	3%	11%	7%	10%	12%	3%	4%	100%	
Rango de prioridades		/	7	1	3	3	9	11	5	8	6	2	12	10		

*Requerimientos ineludibles

Importancia para el cliente

5	1
Elevada	Baja

Relaciones

9	3	1	
Fuerte	Moderado	Débil	Ninguna

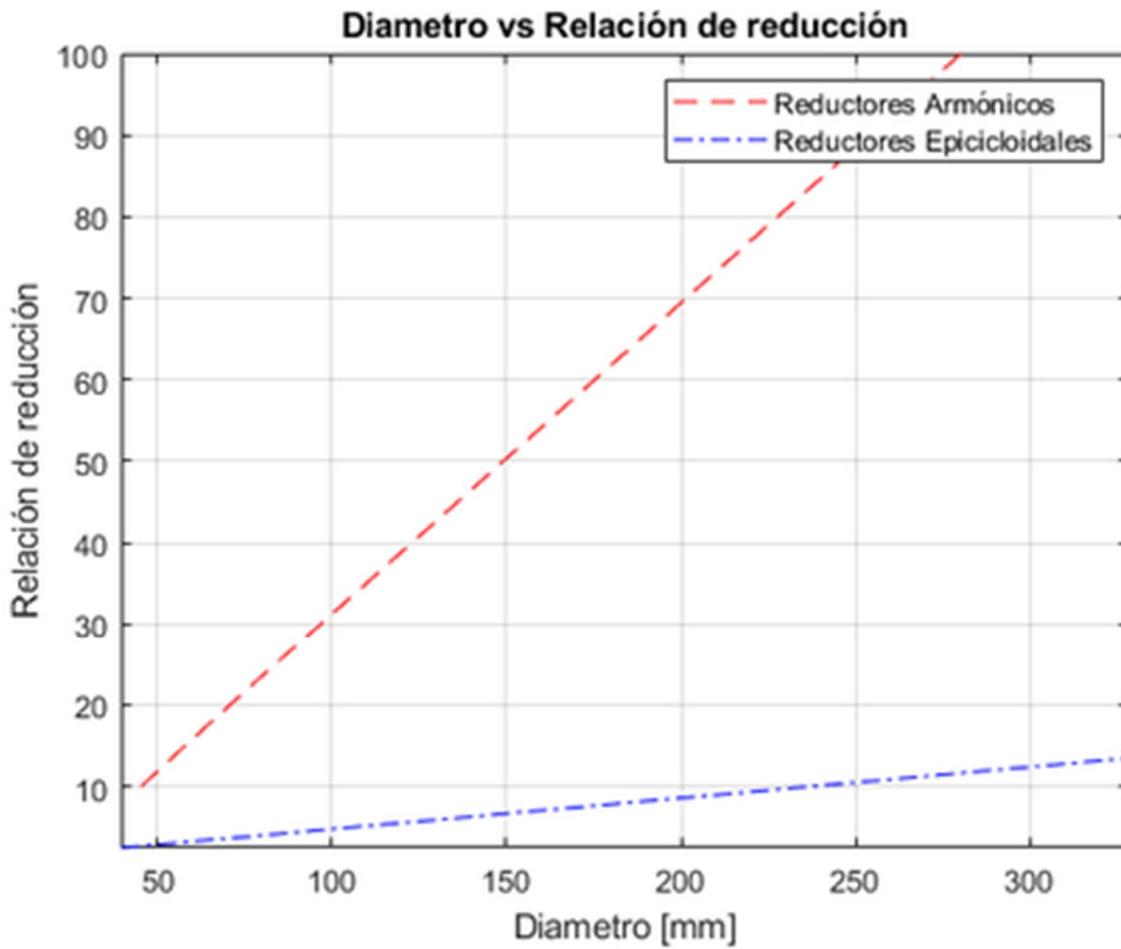


Figura 9. Gráfico comparativo de capacidad de reducción de velocidad reductor armónico vs reductor epicicloidal.

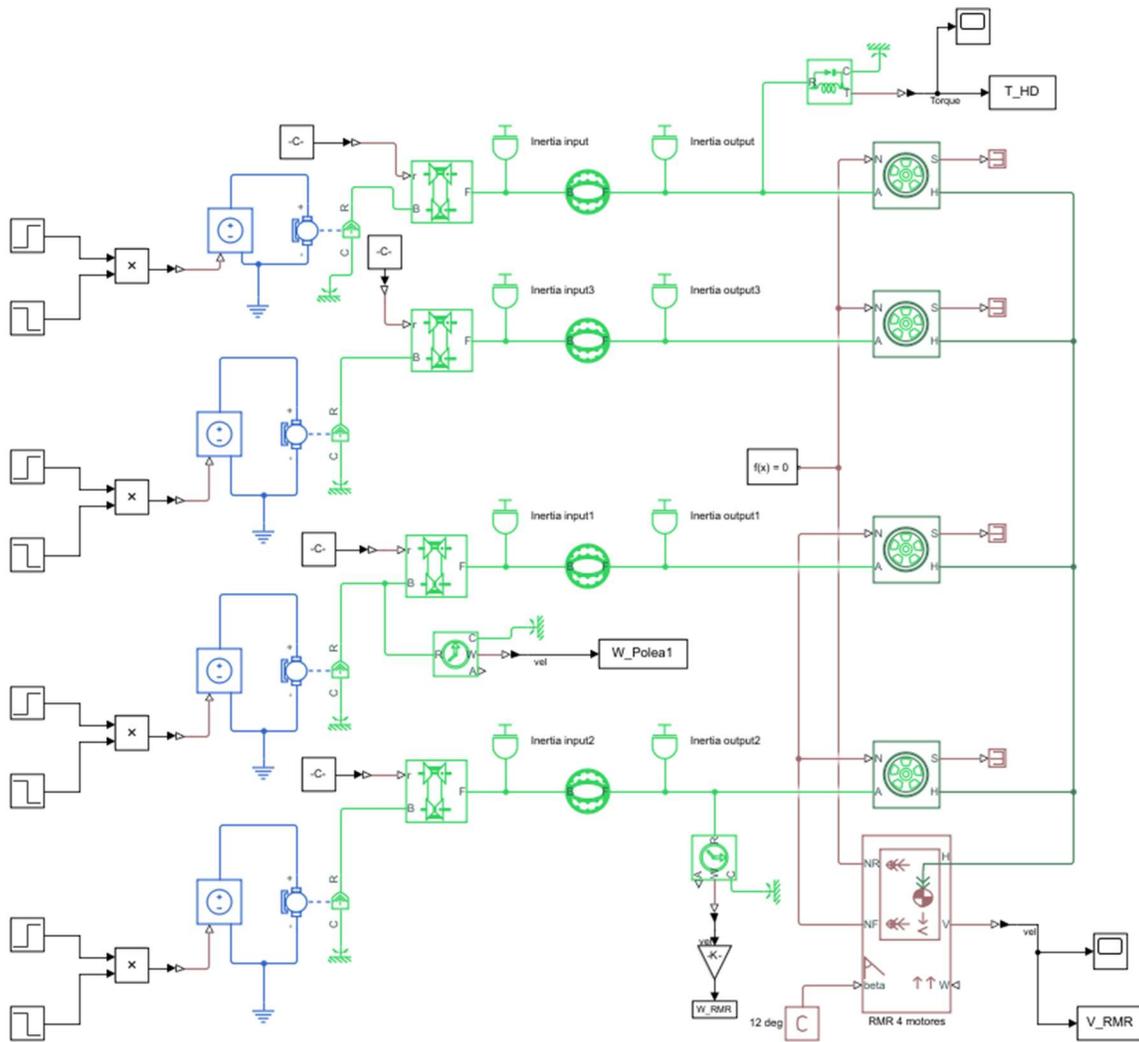


Figura 10. Modelo SimScape del RMR con motores, poleas y reductores armónicos (uno en cada rueda).

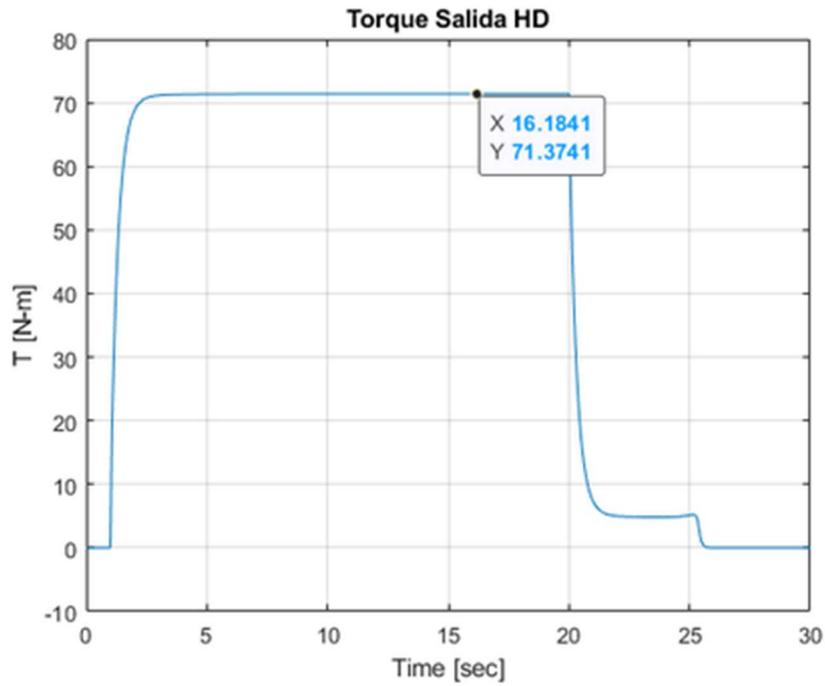


Figura 11. Torque a la salida del reductor armónico con banda síncrona.

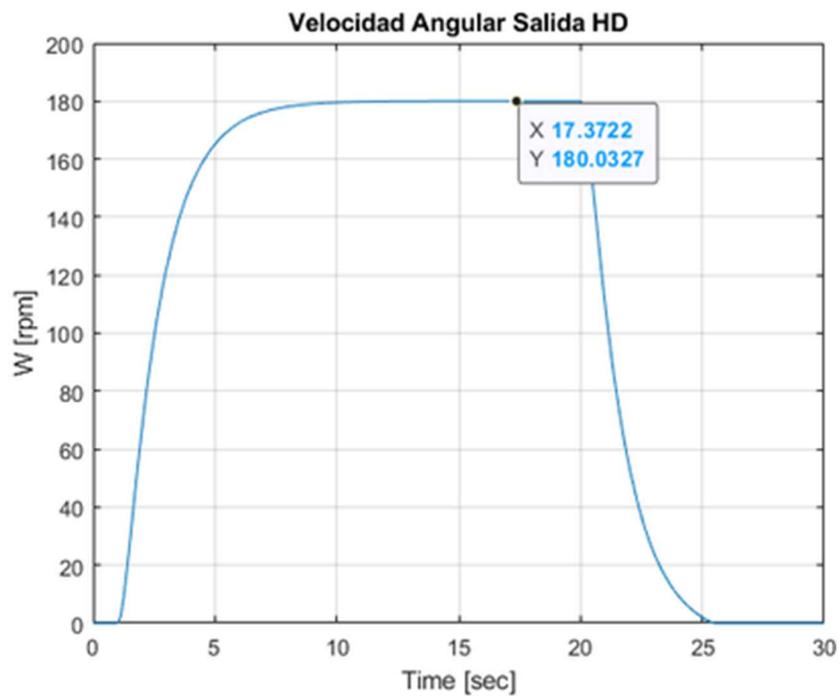


Figura 12. Velocidad Angular a la salida de la banda síncrona + reductor armónico.

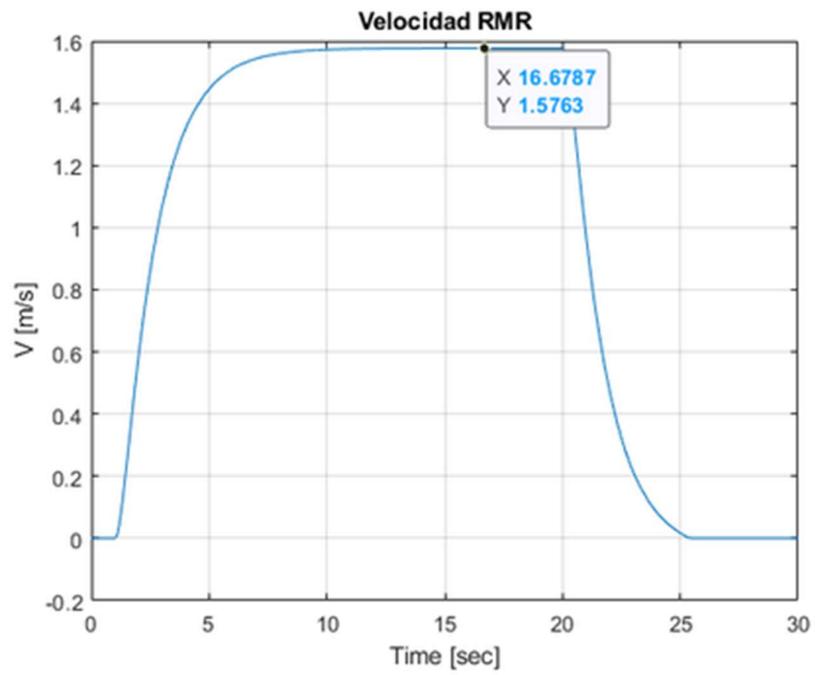
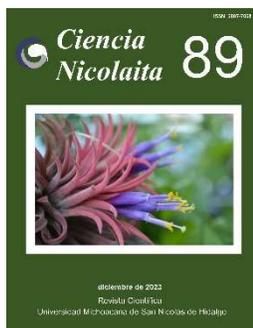


Figura 13. Velocidad lineal del RMR con banda síncrona + reductor armónico.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo

Process of forming an objective function of the blades of a wind turbine using the optimal design

Josué Jordi Zavala Morales*, Erasmo Cadenas Calderón, Rafael Campos Amezcua

Para citar este artículo: Zavala Morales Josué Jordi, Cadenas Calderón Erasmo, Campos Amezcua Rafael, 2023. Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo. Ciencia Nicolaita no. 89, 196-207. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.717>



Historial del artículo:

Recibido: 17 de mayo de 2023

Aceptado: 12 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: 1731329j@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Proceso de conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo

Process of forming an objective function of the blades of a wind turbine using the optimal design

Josué Jordi Zavala Morales^{a*}, Erasmo Cadenas Calderón^a, Rafael Campos Amezcua^b

^aFacultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Doctorado en Ingeniería Mecánica.

^bCentro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México.

Resumen

En el presente trabajo se muestra el proceso de la conformación de una función objetivo de los álabes de una turbina de viento usando el diseño óptimo. La aportación principal es la función matemática tridimensional, la cual permite generar múltiples diseños que optimizan la masa del álabes, bajo restricciones que se encuentran en el dominio del esfuerzo de Von Mises y la velocidad específica. La teoría BEM es utilizada en el diseño aerodinámico y estructural de los álabes. Se tomaron como parámetros una potencia en la turbina de 12.5 kW y un perfil aerodinámico NRELS818. Se realizaron simulaciones de elemento finito, utilizando tres hipótesis de carga, bajo la norma IEC 61400-2, con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de los álabes. Los resultados mostraron que la función objetivo obtenida es adecuada con base en los estadísticos de ajuste con valores de SSE=0.094 y R-cuadrado ajuste = 0.9929. Dicha función, permitió la generación de 23 diseños adicionales, en una región de diseño de los álabes en la cual co-existen aquellos con diferentes masas que satisfacen las restricciones de diseño. Lo anterior, se puede utilizar como apoyo para generar álabes de turbina de viento en condiciones óptimas y disminuir los costos de manufactura.

Palabras clave: Diseño óptimo, turbinas de viento, función objetivo.

Abstract

This paper shows the process of shaping a wind turbine blade objective function using the optimal design. The main contribution of the work is the three-dimensional mathematical function, which allows generating multiple designs that optimize the blade mass, under constraints that are in the domain of the Von Mises stress and the tip speed ratio. The BEM theory is used in the aerodynamic and structural design of the blades. Turbine power of 12.5 kW and airfoil NRELS818 were taken as parameters. Finite element simulations were performed, using three load hypotheses, under the IEC 61400-2 standard, in order to know the mechanical behavior of the blades. The results showed that the objective function obtained is adequate based on the adjustment statistics with

values of $SSE=0.094$ and $R\text{-squared adjusted}=0.9929$. This function allowed the generation of 23 additional designs, in a design region of the blades in which co-exist those designs with different masses that satisfy the design constraints. This should be used as a support to generate wind turbine blades in optimal conditions and reduce manufacturing costs.

Keywords: Optimal design, wind turbines, objective function.

Introducción

Las fuentes de energías renovables han tenido una participación notable en los últimos 10 años, fuentes como la energía eólica empiezan a tener un papel más importante alrededor del mundo para la producción de energía eléctrica. Las turbinas modernas buscan aprovechar de una mejor forma el potencial del viento. Gracias a las investigaciones científicas y a la ingeniería, se han tenido avances significativos en esta área, los cuales han impulsado a la energía eólica a nivel mundial reduciendo los costos de las turbinas con el paso de los años (IRENA, 2016). La implementación de parques eólicos a gran escala, ha resultado en la búsqueda de nuevas herramientas para potenciar la extracción de energía eólica y en la optimización de las turbinas de viento. El aumento de tamaño de los rotores, se traduce en una mayor captación del viento, pero contar con aerogeneradores de dimensiones mucho más grandes implica medidas de durabilidad y rendimiento estructural más exigentes (IRENA, 2019). Tomando en cuenta estas consideraciones, el diseñar una turbina de viento se vuelve un problema complejo, es por ello que se ha convertido en un problema de optimización en donde se tienen restricciones de diseño y una función objetivo.

En la optimización de turbinas de viento, se utilizan diferentes técnicas y teorías para lograr la máxima potencia de salida posible. En el diseño clásico de una turbina, se ha usado la teoría de BEM en función de su velocidad específica, también usando métodos numéricos y funciones de costo para maximizar la producción anual de energía (Gur y Rosen, 2008). Existen modelos que optimizan la distribución de la cuerda y el ángulo de torcimiento en las turbinas de eje horizontal, la optimización aerodinámica se obtiene al maximizar el coeficiente potencia mediante un algoritmo (Déborah, 2013). Se muestra un modelo de optimización para minimizar el peso y las vibraciones y maximizar la rigidez (Karam y Hani, 2017). Un método para minimizar el costo de energía (COE) ocurre en turbinas

de viento offshore, en donde se optimiza la velocidad del viento y el radio del rotor por medio de un algoritmo (Longfu, 2018). También se usa un algoritmo evolutivo en combinación del software ANSYS para encontrar el mejor coeficiente de potencia, empleando la optimización para encontrar la mejor forma del perfil aerodinámico (Mohamed, 2010) y con la ayuda de un algoritmo genético en una turbina de eje horizontal como método de optimización, considerando la generación de potencia como su función objetivo, los algoritmos genéticos se basan en mecanismos de selección natural (Mojtaba, 2014).

En los últimos años el constante uso de los combustibles fósiles han sido los principales causantes del cambio climático que afronta nuestro planeta. Ante esta problemática se han desarrollado diferentes soluciones con el propósito de frenar o disminuir los efectos negativos del CO_2 . En años recientes la implementación de las energías verdes, ha permitido aprovechar los recursos renovables, tal es el caso de la energía eólica, que busca aprovechar el potencial del viento en la generación de energía eléctrica. En gran parte del mundo, las energías renovables se han convertido en una fuente económica de generación de energía, en el caso de la energía eólica, se han tenido avances prometedores en la disminución de su costo hasta llegar a ser proyectos rentables y estos costos seguirán disminuyendo con futuros avances tecnológicos.

El enfoque de este trabajo es obtener la función objetivo de los álabes de una turbina de viento de baja capacidad para un perfil aerodinámico NRELS818, usando las variables de la velocidad específica y los esfuerzos de Von Mises, con la finalidad de obtener una función matemática con la capacidad de generar múltiples diseños óptimos que satisfacen las restricciones de diseño.

Metodología

La teoría BEM se utiliza en la metodología de diseño de los álabes de una turbina de viento, los cuales fueron ensamblados en modelos 3-D mediante el uso de software CAD Solidworks y ANSYS.

El rotor es una de las partes principales de una turbina de viento, con propiedades mecánicas y aerodinámicas, es una parte fundamental entre la interacción del viento y el rotor de la turbina, siendo un factor importante en la producción de energía. El análisis clásico de una turbina de viento se reportó por Wilson y Lissaman (1974), los autores analizaron el rendimiento aerodinámico usando la teoría de momento axial, en donde se asume que el viento es un flujo unidimensional sin viscosidad e incompresible. La teoría BEM en conjunto con la teoría de momento axial, permiten realizar un estudio más detallado del rendimiento de una turbina de viento (Glauert, 1976). Trabajos más recientes en donde se ha implementado la teoría BEM en conjunto con algoritmos, demuestran resultados interesantes, tal es el caso de Özkan *et al.*, (2023) en donde optimizan la geometría aerodinámica del aspa de un aerogenerador de baja capacidad usando un algoritmo de colonias de abeja artificial en conjunto con la teoría BEM. El-Shahat *et al.*, (2022) presentan un modelo de la teoría BEM modificado para turbinas de corriente de marea, el modelo es combinado con teorías de ondas lineales y no lineales, mejorando el empuje de la turbina y disminuyendo los momentos de flexión.

Teoría BEM

Este método nace de la combinación de la teoría de pala y de momento, la cual permite calcular las fuerzas a las cuales se ve sometida el álabes de una turbina de viento. El álabes es dividido en una serie de secciones, para ello se asume que no hay interacción aerodinámica entre los elementos, las fuerzas en el álabes son determinadas únicamente por las características de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico (**Fig. 1**). El método permite calcular diferentes características como: el empuje, la potencia, el par, etc. La fuerza normal, dF_N y la fuerza de empuje, dF_T se encuentran relacionadas con las fuerzas de sustentación y de arrastre, dF_L y dF_D .

$$dF_N = dF_L \cos\phi + dF_D \sin\phi \quad (1)$$

$$dF_T = dF_L \sin\phi - dF_D \cos\phi \quad (2)$$

La fuerza normal neta y el torque creado por la fuerza tangencial, desde el centro del rotor, quedan expresadas en función de los coeficientes de sustentación y de arrastre:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_r^2 e_l (\cos\phi + dF_D \sin\phi) dr \quad (3)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_r^2 e_l (\sin\phi - dF_D \cos\phi) cdr \quad (4)$$

Las fuerzas dF_L , dF_D , dF_N , dF_T y dQ , Fig.2, que son desarrolladas con la teoría de momento y la teoría de pala, pueden consultarse en la referencia (Manwell,

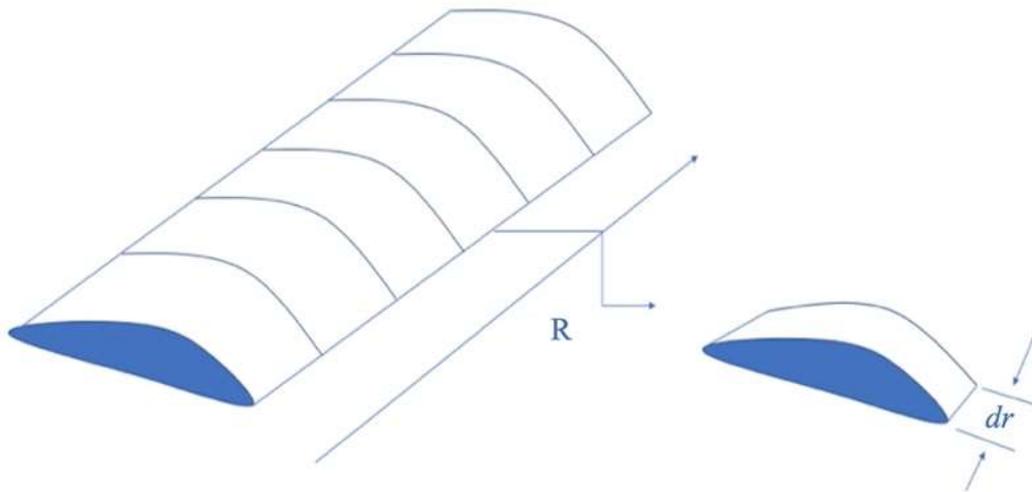


Figura 1. Elemento de aspa.

2009). Las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), son las expresiones principales para llevar a cabo el diseño del aspa de una turbina de viento, en el procedimiento el elemento es dividido en secciones y se asume un factor de inducción axial inicial (**Fig. 2**).

De las ecuaciones de momento y de la teoría de elemento de pala se pueden derivar expresiones que incluyen a los coeficientes de inducción axial y radial.

$$a = \frac{1}{[1+4se^{-2\phi/\sigma'}C_l\cos\phi]} \quad (5)$$

$$a' = \frac{1}{[(4\cos\phi/\sigma'C_l)-1]} \dots \quad (6)$$

Proceso de diseño

El diseño del aspa inicia con la selección de los parámetros del rotor y la selección del perfil aerodinámico, el perfil seleccionado en este trabajo fue el NRELS818 (**Fig. 3**), que forma parte de una familia de perfiles desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). Este perfil mantiene un buen rendimiento en un rango de operación amplia y presenta una baja sensibilidad a los efectos de rugosidad.

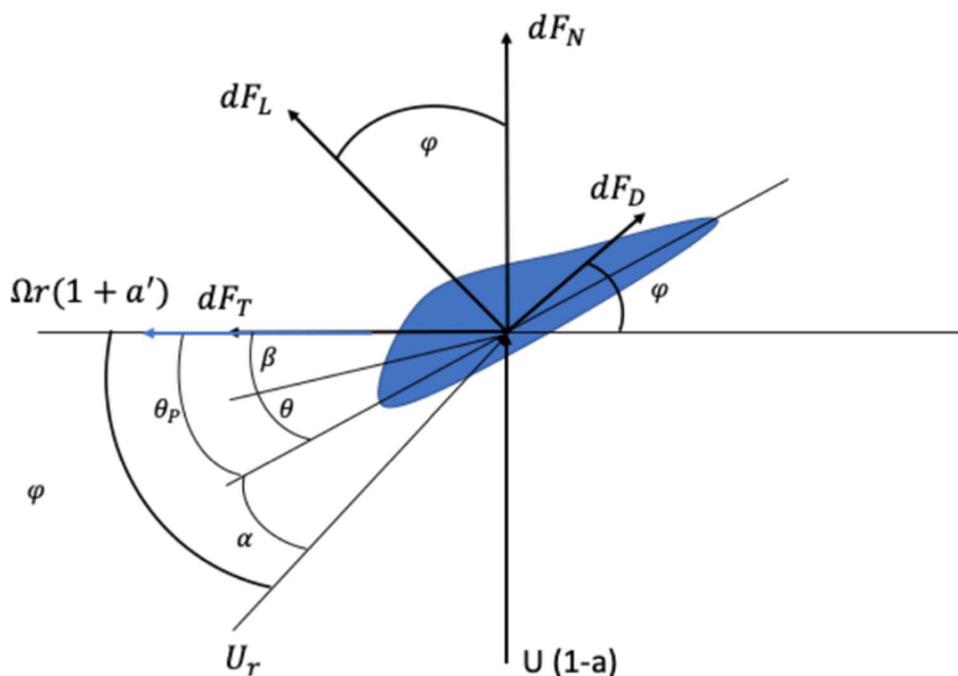


Figura 2. Geometría de álabes para el análisis de una turbina de eje horizontal.

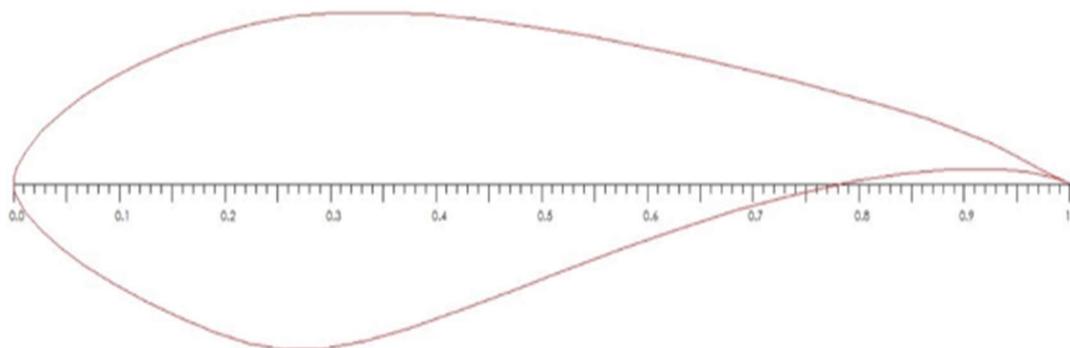


Figura 3. Perfil aerodinámico NRELS818 (NREL, 2014).

En base a la teoría BEM se establece una metodología para diseñar 3 álabes de una turbina de viento usando el perfil aerodinámico NRELS818. Este perfil es simulado en el software QBlade, el cual permite conocer su comportamiento aerodinámico (Brøndsted, 2005).

Los siguientes parámetros fueron considerados en el diseño: una velocidad de nominal del viento de 12 m/s, una temperatura de 25 °C, una densidad del aire promedio de 1.28 kg/m³ y una viscosidad dinámica de 1.8490×10^{-5} kg/ms y un número de Reynolds de 8.3072×10^{-5} .

El rango de velocidades específicas para los diseños es de $\lambda = 8 - 10$, ya que para la generación de energía eléctrica los rangos de la velocidad específica se encuentran entre $\lambda = 4 - 10$ (Manwell, 2009). El modelado de los álabes en 3 dimensiones se llevó a cabo usando el programa Solidworks, en la **Tabla 1**, se muestran las características de los 3 álabes diseñados. En la **Fig. 4**, se muestra uno de los álabes diseñados en el programa. Solidworks permite obtener la masa de los álabes a través de sus herramientas de trabajo, el material seleccionado para los 3 diseños de aspas fue Glass-E (Brøndsted, 2005), con una rigidez de 38 GPa, una resistencia a la tracción de 1800MPa y una densidad de 1.87g/cm³.

Análisis por elemento finito

El análisis por elemento finito nos permite analizar el desempeño mecánico de cada álabe bajo diferentes condiciones de carga, estas simulaciones nos brindan

la información adicional necesaria para complementar el estudio y la metodología de diseño óptimo (Chakrabarty, 2016; Jensen y Branner, 2013).

El diseño de los álabes en el programa ANSYS se realiza con los parámetros obtenidos de los cálculos de la teoría BEM (**Fig. 5**). Los 3 diseños de álabes son modelados en este programa, con el propósito de realizar el análisis de elemento finito (Thompson y Thompson, 2017).

En el diseño de un aerogenerador es importante tomar en cuenta las condiciones a las cuales estará sometido durante su operación. La norma IEC 61400-2 considera aspectos como el montaje, el izado, el mantenimiento y los modos de funcionamiento bajo condiciones extremas. En este trabajo, las hipótesis de carga A, la hipótesis de carga D y la hipótesis de carga E fueron usadas en el análisis, porque representan las condiciones usuales a las cuales se ve expuesto un aerogenerador (IEC, 2015).

En las simulaciones, el esfuerzo de Von Mises nos indica cuando un elemento estructural falla debido al sobrepaso de su energía de distorsión (de La Fuente, 2009). Las soluciones obtenidas por cada carga suministrada se muestran a través de una representación sobre el modelo, (**Fig. 6**).

Diseño óptimo

El diseño de un sistema puede ser formulado como un problema de optimización, en donde el rendimiento de las variables de diseño es optimizado mientras todos los demás requisitos se cumplen mediante métodos y conceptos de optimización (Arora, 2012).



Figura 4. Aspa diseñada en Solidwork.

Tabla 1
Características de los modelos de 3 aspa. Se muestran las diferencias entre los pesos de cada aspa.

Álabe	Perfil	Velocidad específica	Masa(kg)	Longitud (m)
1	NRELS818	8	8.20	2.94
2	NRELS818	9	6.32	2.94
3	NRELS818	10	4.38	2.94



Figura 5. Modelo de aspa diseñada en ANSYS.

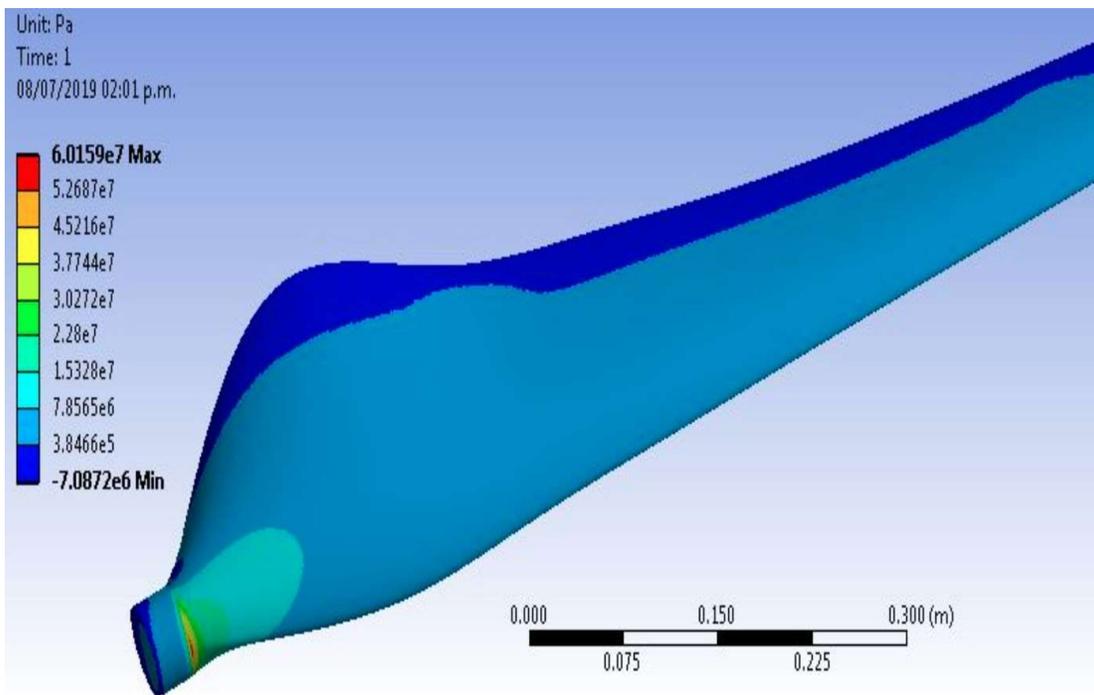


Figura 6. Esfuerzo de Von mises en el aspa 1.

Se puede derivar una expresión matemática para un diseño óptimo que abarque todas estas posibilidades.

Un vector $n \times x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de variables de diseño para minimizar o maximizar la función objetivo:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{7}$$

que esté sujeto a las restricciones de igualdad r :

$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; j = 1 \dots r \tag{8}$$

y las restricciones de desigualdad w :

$$g_i(x) = g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0; i = 1 \dots w \tag{9}$$

La mayoría de los problemas de diseño se encuentran sujetos a restricciones. Un conjunto factible de soluciones para un diseño óptimo es una colección de propuestas que satisfacen todas las restricciones y este se representa con la letra R .

$$R = \{x \mid h_j(x) = 0, j = 1 \dots r; g_i(x) \leq 0, i = 1 \dots w\} \tag{10}$$

El conjunto de diseños factibles se denomina región factible, especialmente para problemas de optimización con dos variables de diseño. La región factible generalmente se reduce cuando se agregan más restricciones al modelo y se expande cuando se eliminan algunas restricciones. Cuando la región factible se reduce, también se reduce el número de diseños posibles que pueden optimizar la función objetivo; es decir, hay menos diseños factibles.

Formulación del Diseño Óptimo de los álabes de una Turbina de Viento

La correcta formulación del problema es importante, no olvidar incluir restricciones en la formulación, de esta forma la solución se encontrará dentro de la región factible. La formulación del problema de diseño óptimo se conforma de los siguientes pasos:

1. Descripción del proyecto/problema: Diseñar un álabes de una turbina de viento, con una masa mínima y siguiendo las 3 hipótesis de carga simplificadas.

2. Recopilación de datos e información: una velocidad de viento de 12m/s , una temperatura de 25°C , una densidad del aire promedio de 1.28kg/m^3 , una viscosidad dinámica de $1.8490 \times 10^{-5}\text{kg/ms}$ y un Reynolds de 8.3072×10^5 . La longitud del ábabe es de 2.938 m , el material asignado en los álabes es Glass-E con una rigidez de 38 Gpa , que tiene una resistencia a la tracción de 1800Mpa y una densidad de 1.87g/cm .
3. Definición de las variables de diseño: esfuerzos de Von Mises y velocidad específica.
4. Criterio de Optimización: Una función matemática de la masa de los álabes en el dominio de la velocidad específica y el esfuerzo de von mises. La cual puede ser minimizada o maximizada.
5. Formulación de restricciones: Entre las restricciones designadas se tienen la velocidad específica, con un rango de $8\text{-}10$ y los valores de esfuerzos obtenidos de las simulaciones de análisis de elemento finito; esfuerzo de Von Mises con rangos de $9.0548 \times 10^8\text{Pa}$ a $1.3088 \times 10^7\text{Pa}$. Estas dos variables son expresadas como restricciones de desigualdad.

Resultados

Función objetivo de los alabes de una turbina de viento

La función objetivo es el criterio con el cual se optimiza un sistema, este criterio tiene que ser una función escalar, donde un valor numérico es obtenido

cuando el diseño satisface todas las restricciones. Para obtener la función objetivo del diseño de un ábabe de turbina de viento, se gráfica una superficie en 3 dimensiones de la función de la masa en el dominio de la velocidad específica (λ) y del esfuerzo de Von mises (σ). La ecuación de la función objetivo se obtiene al encontrar el polinomio que describe a esta superficie. Al sólo contar con 3 diseños o puntos dentro de la gráfica (**Fig. 7**), es necesario encontrar más de estos puntos o diseños que conforman a la superficie, de esta forma la aproximación del polinomio que describe a esta función será más precisa.

La técnica de la distancia inversa ponderada es un método matemático que usa las distancias que hay del punto que se desea conocer hacia los puntos conocidos. Con 3 valores conocidos dentro de los límites de la función es posible obtener más valores o puntos desconocidos dentro de la superficie de la función objetivo por medio de esta técnica (GIS, 2021; Lu y Wong, 2008; Shi, 2020; Shukla, 2019). Entre más cercanos sean los puntos conocidos de los puntos que se desea encontrar, la aproximación será más exacta. La fórmula para la distancia inversa ponderada es la siguiente:

$$Z_p = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (11)$$

En la **Tabla 2** los primeros 3 puntos (A, B, C) son los 3 diseños de álabes iniciales, el resto de los puntos

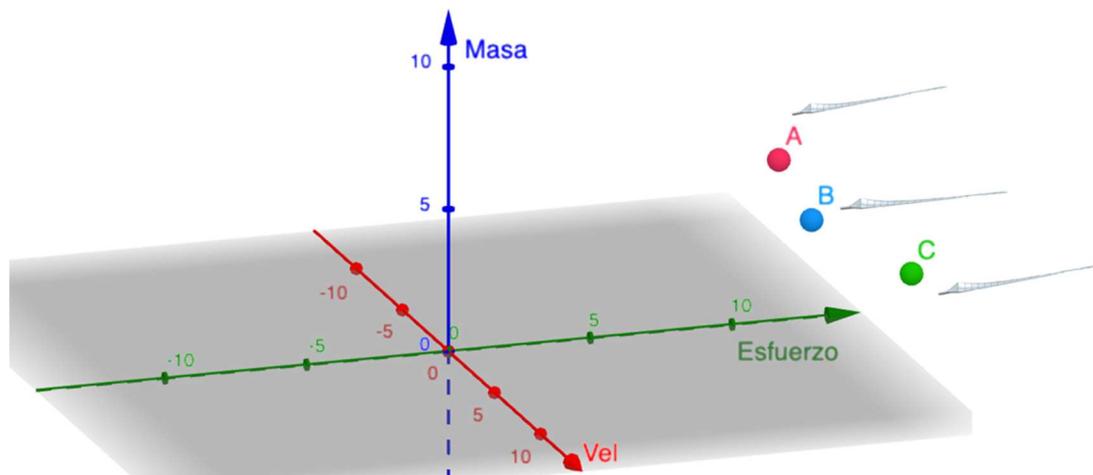


Figura 7. Diseños iniciales graficados en 3D.

Tabla 2

Puntos obtenidos con la técnica de la distancia inversa ponderada.

Point	x	y	z	Point	x	y	z
A	8.0	90.5	8.2	11	9.5	130.8	4.5
B	9.0	98.8	6.3	12	9.0	130.8	4.6
C	10	130.8	4.4	13	8.5	120.7	5.7
1	9	110.6	6.3	14	8.5	130.8	4.7
2	8.5	100.5	6.7	15	8.0	120.7	5.8
3	8.5	110.6	6.3	16	8.0	130.8	4.8
4	8	100.5	6.7	17	9.0	100.5	6.6
5	8	110.6	6.3	18	10.0	120.7	5.5
6	8.5	90.5	8.1	19	10.0	110.6	6.2
7	9	90.5	7.9	20	9.5	100.5	6.6
8	9.5	110.6	6.3	21	10.0	100.5	6.5
9	9.5	120.7	5.6	22	9.5	90.5	7.8
10	9.0	120.7	5.7	23	10.0	110.6	6.3

fueron calculados usando la Ec. 11 de la distancia inversa ponderada, obteniendo 23 puntos adicionales, de un total de 26 puntos. En la **Fig. 8** se muestran los 26 puntos que conforman a la función objetivo.

Se obtiene la gráfica, Fig. 8, de la función objetivo con los 3 puntos (A, B, C) de los diseños iniciales y también se grafican los 23 puntos obtenidos con la técnica de la distancia inversa ponderada.

En la **Fig. 8** se aprecia cada uno de los puntos que conforma a la función objetivo, cada uno de ellos representa un diseño de álabes óptimo que cumple con

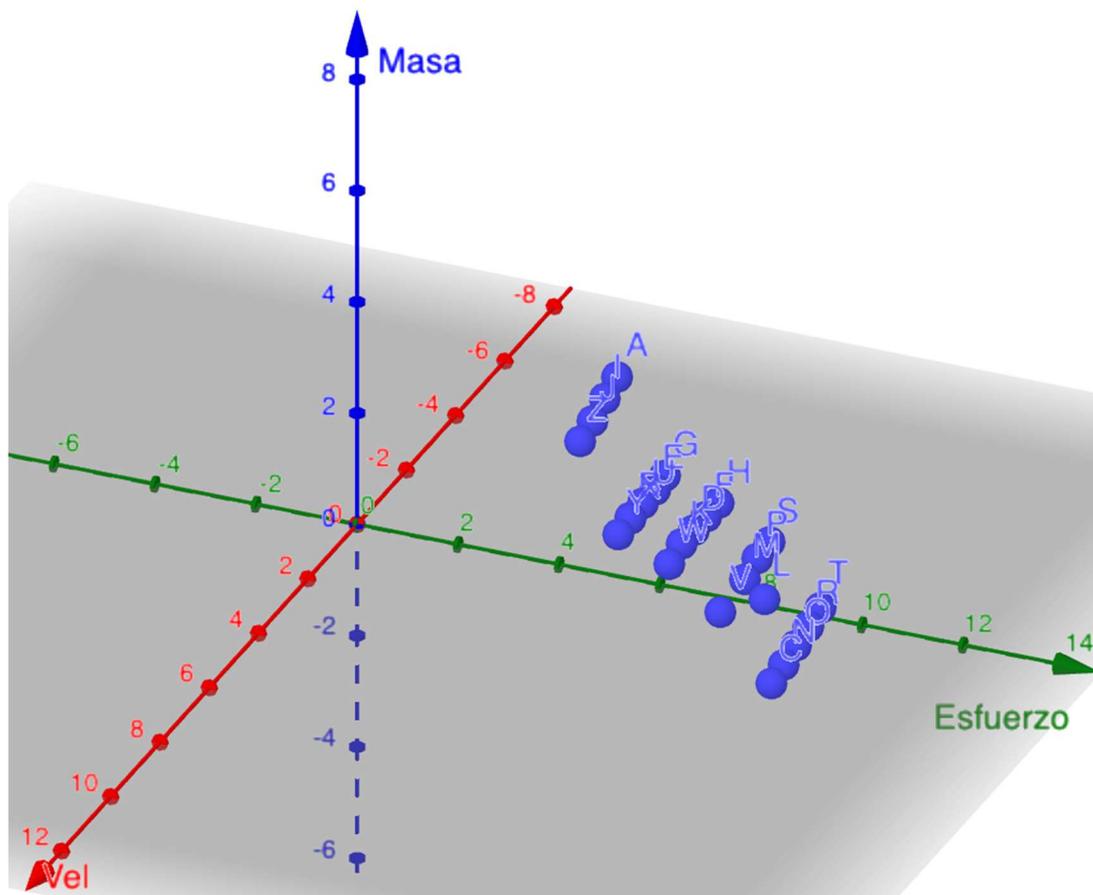


Figura 8. Gráfica de la función objetivo con 26 puntos en 3D.

las restricciones de diseño, es decir, ahora se cuenta con 26 diseños factibles partiendo de 3 diseños iniciales. Se encontró una expresión matemática que describe a la superficie en 3D, por medio de una interpolación polinómica con la aplicación Curve Fitting Toolbox del software Matlab. Para evaluar la certeza del ajuste, se usan los siguientes indicadores estadísticos:

- Suma de cuadrados por error (SSE): un valor cercano a 0 indica que el modelo tiene un componente de error aleatorio más pequeño, y que el ajuste será más útil para la predicción.
- R-Cuadrado (R^2): solo puede tomar valores entre 0 y 1, cuando el valor se encuentra más cercano a 1 indica una mayor varianza en el modelo.
- R-cuadrado ajustado: indica la calidad del ajuste, solo puede tomar valores menores o igual a 1, valores cercanos a 1 indican un mejor ajuste.
- Error Cuadrático Medio (MSE): hace una estimación de la desviación estándar del componente aleatorio en los datos, valores cercanos a 0 indican un ajuste más útil para la predicción.

Las fórmulas para evaluar la bondad del ajuste pueden ser consultadas en la Ref. (Math works, 2019).

Con estos indicadores estadísticos se encuentra un modelo apto que se ajuste adecuadamente a los datos. Los valores para cada uno de los estadísticos mencionados son: SSE = 0.0949, R-square= 0.9969, Adjusted R -square= 0.9929 y RMSE = 0.0928. De acuerdo a los resultados estadísticos, se puede concluir que el ajuste que realiza el programa es aceptable. Una vez

que el programa hace la aproximación, también se obtienen los valores de los coeficientes del polinomio que representan a la función:

$$f = 910.1 + 47.5x - 349.3y - 13.51x^2 + 8.377xy + 41.95y^2 + 1.008x^3 + 0.007295x^2y - 0.7167xy^2 - 2.216y^3 - 0.02554x^4 - 0.008621x^3y + 0.009702x^2y^2 + 0.0151xy^3 + 0.04433y^4 \quad (12)$$

En la **Fig. 9** se puede apreciar la superficie en 3D de la función objetivo, a la cual se le aplica una interpolación polinómica, como resultado se obtiene la ecuación matemática, Ec. 12, la cual puede ser maximizada o minimizada. Al evaluar la ecuación de la función objetivo con diferentes valores de velocidad específica y esfuerzos de Von mises, se obtienen diferentes valores de masa, los cuales corresponden a los diferentes posibles diseños de aspas que coexisten dentro de la función.

Conclusiones

La optimización de las turbinas de viento se ha vuelto un problema complejo, lo cual ha generado la necesidad de incorporar nuevas herramientas, como la metodología del diseño óptimo y la técnica de la distancia inversa ponderada, con las cuales se obtuvo la ecuación de la función objetivo, cuyos estadísticos de prueba de SSE=0.094 y R-cuadrado ajustado =0.9929 validan bondad del ajuste. También se consigue un sistema que permite al diseñador manejar la cantidad de variables necesarias y sus respectivas restricciones,

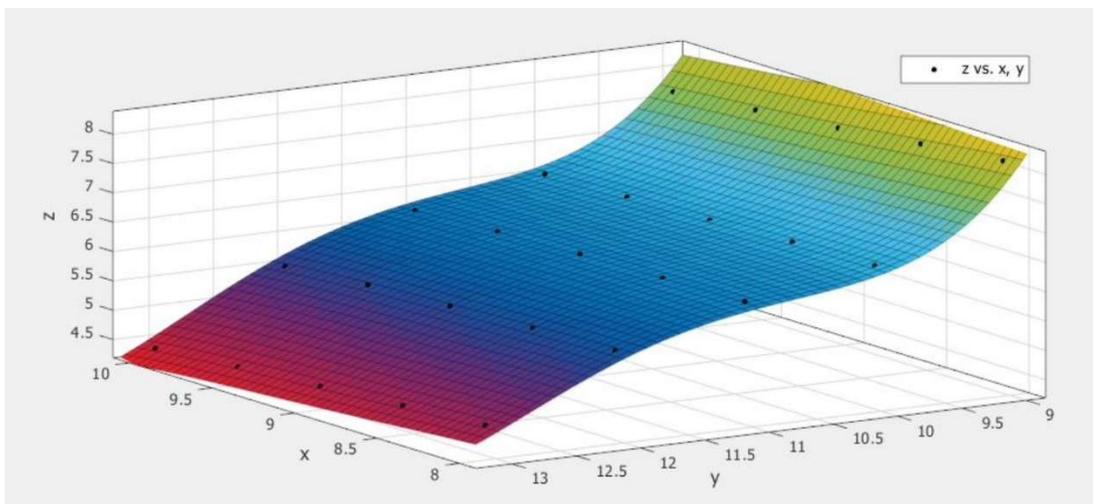


Figura 9. Superficie de la función objetivo.

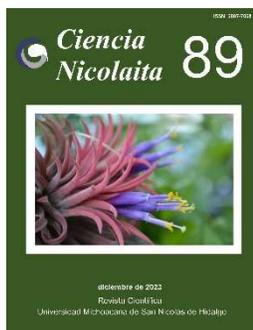
este enfoque otorga flexibilidad y factibilidad, en una función objetivo generada. La metodología permitió obtener 23 puntos o diseños dentro de la región de diseño, partiendo de solo 3 diseños de aspas iniciales. La función objetivo de la masa de los álabes de una turbina de viento, brinda una región de diseño factible, en el cual coexisten una diversidad de diseños técnicamente correctos, entre los cuales se encuentran el máximo y mínimo globales, que nos indican aquellos diseños con la menor y mayor masa.

Referencias

- Arora JS. 2012. Introduction to optimum design, Elsevier, ISBN: 978-0-12-381375-6.
- Brøndsted P, H. Lilholt, A. Lystrup. 2005. Composite materials for wind power turbine blades., Annual Review of Materials Research 35: 505–538.
- Chakrabarty, Mannan, Cagin. 2016. Multiscale modeling for process safety applications, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780123969750.
- Déborah A, Jerson R, André L, Joao T, Antonio C. 2013. Optimum aerodynamic design for wind turbine blade with a rankine vortex wake, Renewable Energy 55:296–304.
- De la Fuente E. 2009. Von mises stresses in random vibration of linear structures, Computer and Structures 87:1253–1262.
- El-Shahat S, Fu L, Li G. 2022. Linear and non-linear wave theories coupled with a modified BEM model for quantifying dynamic loads of a tidal stream turbine, Ocean Engineering, 243, 110334.
- GISGeography, Inverse distance weighting interpolation, <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>, [consultado el 10 de agosto de 2022].
- Glauert H. 1976. Airplane propellers, in division of aerodynamic theory, W. F. Durand, ed., Springer-Verlag.
- Gur O, Rosen A. 2008. Optimal design of horizontal axis wind turbine blades, ASME.
- IEC 61400-2-2015 wind turbines design requirements for small wind turbines, 2015.
- IRENA. 2019. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. 2016. Wind power technology brief, <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Wind-Power> [consultado el 13 de junio de 2022].
- Lu GY, Wong DW. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, Computers and Geosciences 34:1044-1055.
- Longfu L, Z. Xiaofeng, S. Dongran, T. Weiyi, Y. Jian, L. Li, T. Xiaoyu, WW. 2018. Optimal design of rated wind speed and rotor radius to minimizing the cost of energy for offshore wind turbines, Energies, 10, 2728.
- Manwell JF, McGowan AL, Rogers JG. 2009. Wind Energy Explained, Wiley, Chichester, England.
- MathWorks, evaluar la bondad del ajuste, <https://la.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>, [consultado el 5 de septiembre de 2022].
- Mohamed M, E. Janiga, E. Pap, D. Thévenin. 2010. Optimal blade shape of a modified savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade, Energy Conversion and Management, 52: 236–242.
- Mojtaba L, Tahmine S, Kiana R, Pouria A, Aerodynamic. 2013, optimal design of wind turbine blades using, genetic algorithm, Energy Equipment and Systems, 2, 185–193.
- Karam Y, M. Hani. 2017. Optimal frequency design of wind turbine blades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics p. 90, 961–986.
- Molholt Jensen F, Branner K. 2013. Introduction to wind turbine blade design, Design and Materials 3–28.
- NREL, Nrel's s818 airfoil graphic and coordinates, https://wind.nrel.gov/airfoils/shapes/S818_Shape.html, [consultado el 5 de julio de 2022]
- Özkan R, Serdar Genç. 2023. Aerodynamic design and optimization of a small-scale wind turbine blade using a novel artificial bee colony algorithm based on blade element momentum (ABC-BEM) theory, Energy Conversion and Management, Volume 283,116937, ISSN 0196-8904.
- Shi Y, He W, Zhao J, Hu A, Pan J, Wang H, Zhu H. 2020. Expected output calculation based on inverse distance weighting and its application in anomaly detection of distributed photovoltaic power stations, Journal of Cleaner Production 253: 119965.
- Shukla K, Kumar P, Mann GS, Khare M. 2019. Mapping spatial distribution of particulate matter using kriging and inverse distance weighting at supersites of megacity Delhi, Sustainable Cities and Society 54: 101997.
- Thompson M, Thompson J. 2017. Introduction to ANSYS and finite element modeling, Butterworth-Heinemann, Kidlington, United Kingdom, ISBN: 0128129816.



Wilson R, Lissaman P. 1974. Applied aerodynamics of wind power of wind power machines, National Science Foundation Report.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico

Selection of a small capacity wind turbine for domestic use

Neiffe Valencia Calderón*, Erasmo Cadenas Calderón y Josué Jordi Zavala Morales

Para citar este artículo: Valencia Calderón Neiffe, Cadenas Calderón Erasmo y Zavala Morales Josué Jordi, 2023. Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico. Ciencia Nicolaita no. 89, 208-220. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.720>



Historial del artículo:

Recibido: 17 de mayo de 2023

Aceptado: 12 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: neiffe.valencia@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico

Selection of a small capacity wind turbine for domestic use

Neiffe Valencia Calderón^{1*}, Erasmo Cadenas Calderón² y Josué Jordi Zavala Morales³

¹Facultad Popular de Bellas Artes, UMSNH

²Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH

³Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH

Resumen

Se presenta el proceso de selección de una turbina eólica de pequeña capacidad, que puede ser utilizada para uso doméstico. Lo anterior se plantea, debido a que la mayoría de los arquitectos y constructores que pretenden colocar pequeñas turbinas, cuentan con poca información para tomar las decisiones adecuadas en su elección, descargando la mayor parte de la responsabilidad en el vendedor. Como ejemplo práctico se realizó un ejercicio de selección en un sitio ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, en donde existe potencial eólico. El proceso comienza con el cálculo de la necesidad energética por parte del usuario y se asume que no se cuenta con la información necesaria para realizar una prospección eólica, es decir, no hay mediciones anemométricas. Se muestra la manera en que se pueden obtener dichas mediciones de velocidad y dirección de viento, con la finalidad de calcular las dimensiones necesarias de la turbina, para poder elegir una en el mercado o fabricarla. La elección de la turbina, se realizó generando un análisis costo-beneficio, el cual consistió en el cálculo de la energía disponible en el sitio y en la simulación de turbinas de viento a diferentes capacidades, con la finalidad de cubrir la demanda de energía propuesta de 281 kWh por mes, que es el consumo promedio de un hogar en México según el Fideicomiso para el ahorro de energía en el año 2021. La capacidad de la turbina elegida fue de 2.0 kW. De la misma manera se calcula la dirección del viento dominante utilizando el software libre WRPLOT. El artículo aporta información importante de dimensionamiento de una turbina eólica de pequeña capacidad, y muestra la manera en que se pueden obtener datos de mediciones de velocidad y dirección del viento de cualquier lugar del mundo, así como un software libre para generar la rosa de los vientos del lugar elegido, enlazándose con Google Earth. Finalmente se hace la selección de la turbina con todas sus características y su curva de potencia.

Palabras clave: Energía eólica, selección de turbina eólica, datos anemométricos.

Abstract

The selection process of a small capacity wind turbine, which can be used for domestic use, is presented. The above is proposed because most architects and builders who intend to place small turbines have little information to make the right decisions in their choice, attributing most of the responsibility to the seller. As a practical example, a selection exercise was carried out at a site located in Tepuxtepec, Michoacán, where there is wind potential. The process begins with the calculation of the user's energy needs and it is assumed that the necessary information to perform a wind prospecting is not available, i.e., there are no anemometric measurements. The way in which these wind speed and direction measurements can be obtained is shown, with the purpose of calculating the necessary dimensions of the turbine, in order to be able to choose one in the market or manufacture it. The choice of the turbine was made by generating a cost-benefit analysis, which consisted of calculating the energy available at the site and simulating wind turbines at different capacities, in order to cover the proposed energy demand of 281 kWh per month, which is the average consumption of a home in Mexico according to the FIDE in the year 2021. The chosen turbine capacity was 2.0 kW. In the same way, the dominant wind direction is calculated using the free software WRPLOT. The article provides important sizing information for a small capacity wind turbine, and also shows the way in which wind speed and direction measurement data can be obtained from any place in the world as well as a free software to generate the wind rose of the chosen place, linking with Google Earth. Finally, the selection of the turbine with all its characteristics and its power curve is made.

Keywords: Wind energy, wind turbine selection, anemometric data.

Introducción

Según las Naciones Unidas a través del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la quema de combustibles fósiles, las modificaciones en el uso del suelo y la silvicultura, así como los procesos industriales, han provocado un aumento drástico de los niveles de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (IPCC, 2023).

Las actividades anteriores ocurren principalmente en el medio urbano, el cual ha crecido debido a la migración ocurrida en el medio rural, principalmente por la búsqueda de oportunidades y de una mejor calidad de vida de las personas. México, sigue la tendencia mundial; según el INEGI, en el año 2020, solo el 21% de la población vivía en zonas rurales (INEGI, 2020), lo anterior representa un crecimiento importante que promueve el calentamiento global, pues además de la emisión de gases de efecto invernadero, hay pérdida de ecosistemas y transformación y contaminación de causas acuáticas.

El crecimiento urbano, necesariamente va acompañado con necesidades de energía, principalmente electrificación. Esta energía normalmente se hace lle-

gar a las ciudades a través del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es decir, la energía es importada, por lo que el problema de calentamiento global es más drástico cada día.

Contra el deterioro ambiental, las energías renovables siguen siendo una oportunidad para ayudar al planeta a través de la disminución del consumo de energía tradicional. En este contexto, se deben explorar los sistemas aislados de energía (Olivia *et al.*, 2021), ya sean solares, eólicos o híbridos (Javed *et al.*, 2020), que permitan el autoconsumo de los usuarios (Bautista *et al.*, 2020).

La energía eólica se ha convertido en una opción atractiva en el medio urbano, ya que no es necesario vientos intensos (las pequeñas turbinas arrancan entre 2.5 y 3 m/s) para poder extraer su energía, pues las turbinas eólicas se utilizan para cargar bancos de baterías. La configuración urbana toma un papel importante debido a que provoca turbulencias y perturba la velocidad del viento, aunado a aspectos como la seguridad, las vibraciones o el impacto visual que limitan su integración arquitectónica en los edificios (Barra-gán *et al.* 2019). Lo anterior ha sido superado debido

al avance tecnológico y las turbinas modernas funcionan de manera confiable y segura.

El presente artículo, aborda la selección de una turbina de pequeña capacidad, destinada al complemento de energía en el medio urbano. Se indican las actividades iniciales que se deben realizar en cuanto al ahorro de energía en un hogar común, para posteriormente exponer la forma en que se realiza la proyección eólica. Se muestra la manera en que se debe elegir el sitio a través de las coordenadas geográficas, las cuales son necesarias para la obtención en línea de datos anemométricos cuando no se cuenta con ellos y para el cálculo de los vientos dominantes a través del software libre WRPLOT (Lakes, 2023). Se calcula la densidad de potencia del viento (WPD, por sus siglas en inglés) del lugar, se describen las componentes de una turbina de eje horizontal, y finalmente se propone una turbina. Para ejemplificar el proceso, se eligió la ciudad de Tepuxtepec en el estado de Michoacán, ya que es uno de los pocos lugares en donde existen vientos que se pueden aprovechar para generar energía. Finalmente se hace la selección de la turbina realizando un análisis de costo-beneficio.

1. Reducción del consumo energético de una casa habitación

No es necesario instalar equipos que generen electricidad con energías renovables para reducir el consumo energético en una casa habitación. En la actualidad es una obligación combatir el calentamiento global. En este contexto, proyectar la instalación de un

equipo de estas características, es una buena oportunidad para concientizar a los usuarios y modificar su entorno.

Para hacer una casa más eficiente energéticamente, es necesario conocer el consumo que se tiene y tratar de mitigarlo con las siguientes medidas:

1. Orientar apropiadamente los espacios del proyecto de casa-habitación.
2. Considerar el aislamiento de las paredes.
3. Cambiar la iluminación con lámparas más eficientes (utilizar leds).
4. Aprovechar la luz natural lo más posible, es decir, abrir cortinas y persianas durante el día y limitar el uso de la luz artificial.
5. Apagar dispositivos electrónicos y desconectarlos cuando no se utilicen.
6. Usar electrodomésticos eficientes, con etiqueta de eficiencia energética.
7. Ahorrar agua caliente o instalar calentador solar.
8. En caso de tener calefacción, sellar puertas y ventanas para evitar que el aire caliente o frío escape de casa-habitación.

Algunas de las acciones mencionadas se pueden ver reflejadas en una casa energéticamente eficiente como la de la **Figura 1**.

Con lo anterior se puede reducir el consumo energético entre un 10 y 20%, en una casa habitación cuyo consumo depende del tamaño de ésta, las personas que la habitan, el tipo de electrodomésticos y electrónicos que se usan y los hábitos cotidianos, y hasta un 50% con la mejora de la eficiencia térmica. De acuerdo con el fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica

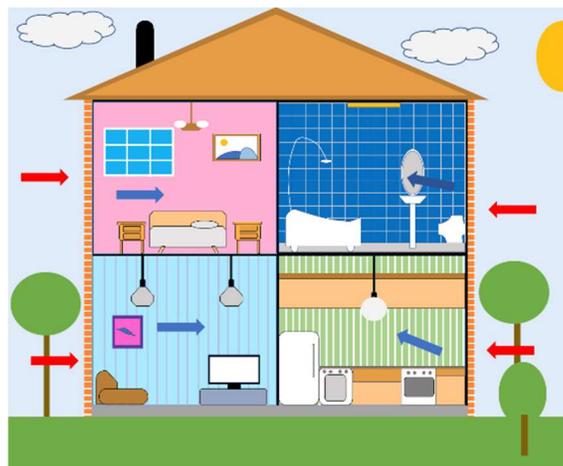


Figura 1. La casa energéticamente eficiente.

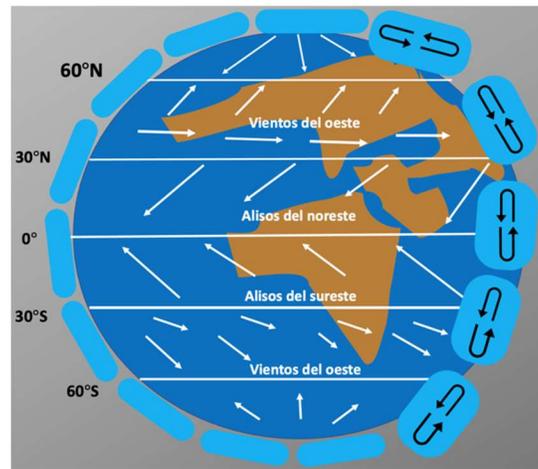


Figura 2. Circulación atmosférica.

(FIDE, 2023), el consumo promedio en hogares de México en 2021 fue de 281 kWh al mes (Zambak, 2021).

2. Recurso eólico

La energía eólica se obtiene a través del movimiento de las masas de aire que conforman la atmósfera. Las corrientes de aire son debido al calentamiento desigual que sufre nuestro planeta y por ende la atmósfera que lo rodea. Así el aire caliente asciende y el aire con menor temperatura llena ese espacio, ocasionando su circulación como en la **Figura 2**.

Para establecer si podemos utilizar la energía eólica para cubrir nuestras necesidades energéticas, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Que el lugar cuente con un buen recurso eólico.
- b. Que exista el espacio necesario para colocar los equipos.

- c. Que los reglamentos de la comunidad lo permitan. Es importante que se tome en cuenta, si en la comunidad en donde se desea instalar un aerogenerador, no se restringen la altura de las estructuras.

Si se cumple lo anterior, sería conveniente estudiar la posibilidad de incorporar un sistema eólico en el lugar.

2.1. Selección del sitio

Para ilustrar la forma en que se realiza la prospección eólica, vamos a proponer la instalación de una pequeña turbina en la Presa de Tepuxtepec, Michoacán, cerca del pueblo denominado San Antonio Molinos, en dónde debido a las condiciones del lugar existen vientos que se pueden aprovechar para generar energía. En la **Figura 3** se muestra el lugar con el indicador rojo de localización.



Figura 3. Ubicación del sitio seleccionado (Cortesía Google Maps).



La Presa de Tepuxtepec, se encuentra a 25 km al norte de Tlalpujahua, en la parte baja del municipio de Contepec, al sur de su cabecera municipal, en la región noreste del estado de Michoacán. Las coordenadas geográficas del lugar en decimales son: 20.061289, -100.244488. Es necesario contar con las mediciones de la velocidad y dirección del viento para generar una estimación de la cantidad de energía que podemos extraerle. En caso de que no fuera posible una estimación de éstas, las podemos obtener de la página: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, es un servidor manejado por la NASA que permite el acceso a mediciones de diversos datos meteorológicos al registrarse.

La **Figura 4**, muestra la serie de tiempo horaria de la velocidad del viento del sitio seleccionado durante un año, 8, 760 horas aproximadamente, medidas a 50 metros sobre el nivel del terreno.

La estadística descriptiva se muestra en la **Tabla 1**.

En la tabla siguiente se refleja el cálculo de la media, la desviación estándar, la moda, la velocidad mínima, la velocidad máxima y el rango. El promedio de la velocidad no es alto, sin embargo, las velocidades máximas que se presentan son aceptables.

Para apreciar de mejor manera la frecuencia con la que soplan las diferentes velocidades de viento, se debe generar un histograma y observar la cantidad de velocidades que se pueden aprovechar para extraer energía con un aerogenerador, como en la **Figura 5**.

Las turbinas eólicas de baja capacidad pueden arrancar hasta 2.5 m/s, por lo que se puede apreciar del histograma de la **Figura 5**, la mayoría de las velocidades que se presentan en el lugar están por arriba de esta velocidad, lo que garantiza el funcionamiento del equipo la mayor parte del año. Otra característica importante que se aprecia en el histograma es su cola larga, la mayoría de los lugares en donde se caracteriza la energía eólica, tienen esta particularidad, por lo que se pueden representar por un modelo de probabilidad de Weibull (Villarubia, 2013).

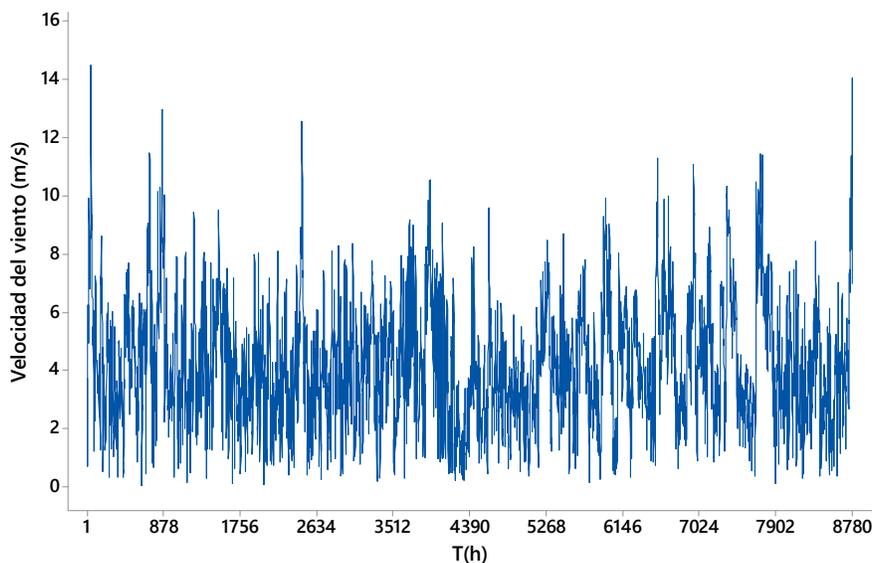


Figura 4. Series de Tiempo de la velocidad del viento de Tepuxtepec (cortesía de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Tabla 1

Estadística Descriptiva de las mediciones de la velocidad del viento en Tepuxtepec, Michoacán.

Lugar/Medida	Datos	\bar{x} (m/s)	σ (m/s)	Moda (m/s)	Vmín.	Vmáx.	Rango
Tepuxtepec	8760	4.27	2.06	3.47	0.05	14.51	14.46

Es posible proyectar las velocidades de viento a una altura mayor. Para realizar lo anterior, es necesario utilizar la siguiente expresión:

$$Ve(z) = Ve(z_r) \left[\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \right] \tag{1}$$

dónde:

Ve(z) = Velocidad estacionaria media, a la altura z (altura de referencia).

Ve(z_r)= Velocidad estacionaria estimada a la altura z.

z₀ = Factor de rugosidad del terreno.

z₀= Rugosidad superficial.

La rugosidad superficial se puede obtener de la **Tabla 2**.

2.2. El recurso eólico

La estimación del recurso eólico requiere el cálculo del concepto denominado Densidad de Potencia Eólica, en inglés Wind Power Density (WPD), que parte de la expresión de la energía cinética:

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2}$$

dónde:

Ec = Energía cinética contenida en el viento.

m = Masa de aire contenida en un volumen de control (kg).

v = Velocidad del viento (m/s).

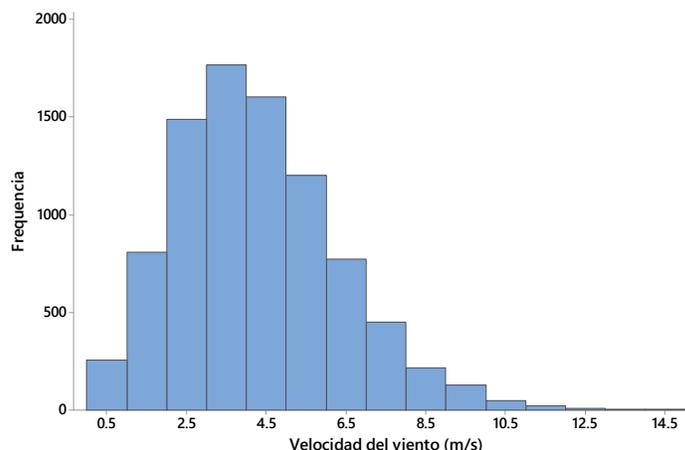


Figura 5. Histograma de velocidades del sitio seleccionado.

Tabla 2

Valores de rugosidad para diferentes tipos de terreno.

Valores de rugosidad (Z₀) para diversos tipos de terreno	
Tipo de terreno	Z ₀ (mm)
Muy suave, hielo o lodo	0.01
Muy abierto en calma	0.20
Muy picado	0.50
Superficie de nieve	3.00
Césped	8.00
Pasto quebrado	10.00
Campo preparado para cultivo	30.00
Cultivo	50.00
Pocos árboles	100.00
Varios árboles, hileras de árboles, pocas construcciones	250.00
Bosques, tierras cubiertas de árboles	500.00
Suburbios	1500.00
Centros de ciudades con edificios altos	3000.00

El caudal másico (m) de densidad (ρ) que fluye con velocidad (v) a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección del flujo es:

$$m = \rho Av \quad (3)$$

La potencia disponible (P_d) del caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Finalmente, WPD disponible o potencia disponible por unidad de área es [11]:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5)$$

Las unidades resultantes de la expresión anterior son de: w/m^2 (watts por metro cuadrado), por lo que proporcionan una estimación de la cantidad de energía que se puede obtener en el sitio seleccionado por metro cuadrado. La densidad del aire es un parámetro que depende del lugar y de las condiciones del sitio, sobre todo la elevación a nivel del mar, sin embargo, para fines de cálculo es posible tomar el valor de la densidad estándar que es: $1.225 \text{ kg}/m^3$.

Para las mediciones del Salto de Tepuxtepec, representadas en la **Figura 4**, que representan las mediciones del año 2020 en el lugar, aplicando la expresión 5, obtenemos $WPD = 72.9 \text{ w}/m^2$. Para establecer un campo eólico que sea rentable, se estima que la WPD debe de ser de al menos $200 \text{ w}/m^2$ (Departamento de

Energía, EE.UU., 2007), sin embargo, para nuestro caso es solamente la propuesta de una turbina eólica para uso doméstico o bombeo de agua, destinada a cargar baterías especiales o conectarse a la red eléctrica.

2.3. Turbinas de baja capacidad

El rango de turbinas pequeñas se encuentra entre los 20 watts y los 100 kilowatts (kW). Las más pequeñas o “micro” (de 20 a 500 watts) se emplean en aplicaciones como carga de baterías para vehículos recreacionales y de veleros. Las turbinas de 1 a 10 kilowatts pueden ser usadas para bombear agua. Las turbinas para aplicaciones residenciales pueden estar en el rango de los 400 watts y hasta los 100 kW (para cargas muy grandes) (Departamento de Energía, EE.UU., 2007).

3. El viento dominante

Cuando existen vientos persistentes o aprovechables, algunos suelen provenir de una dirección determinada y con más fuerza. Para tener un diagnóstico completo que nos ayude a orientar nuestra turbina, es necesario generar una rosa de los vientos que nos indique la dirección de los vientos dominantes.

En la **Figura 6**, se aprecia el sitio seleccionado en una fotografía de Google Earth, la cual tiene superpuesta la rosa de los vientos generada con el software WRPLOT.

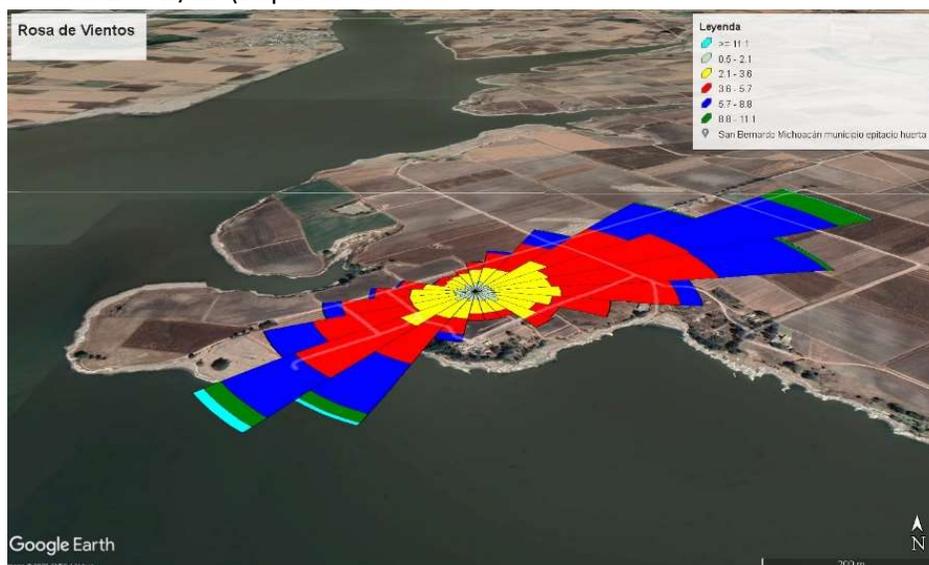


Figura 6. Rosa de los vientos del lugar (generada con el software libre WRPLOT).

En la figura se aprecia que los vientos dominantes, así como la mayoría de las velocidades más altas (color verde), provienen del Noreste. Es importante resaltar que, en el contacto entre la tierra y el agua de la presa, es decir, en la dirección Noreste (color cyan), se presentaron las velocidades más altas y debido a que fueron pocas, no se puede considerar esta orientación como la dominante. Por lo anterior, si fuera necesario elegir la orientación de un aerogenerador, debería ser en este lugar la dirección Noreste.

De la misma manera el software WRPLOT, nos permite generar un gráfico de distribución de frecuencias, el cual se presenta en la **Figura 7**. Se puede apreciar que la mayoría de las velocidades son aprovechables, si tomamos en cuenta que un aerogenerador de pequeña capacidad, comienza a generar entre 2 y 3 m/s.

4. Elección de la turbina

La elección de una turbina de viento, se hace en función del uso que tendrá, bombeo de agua, molienda de granos, aplicaciones residenciales, etc.

4.1. Partes básicas de una turbina de viento

La parte más importante de un aerogenerador es su rotor, es la parte que permite la captura de la energía del viento, entre más completo el diseño aerodinámico, más energía generará. Actualmente la mayoría de los aerogeneradores son de eje horizontal, como el que se muestra en la **Figura 8**. Es importante mencionar que el diseño estructural, así como la elección del material puede ser un tema especializado, comúnmente se usan materiales compuestos, fibra de vidrio o incluso madera.

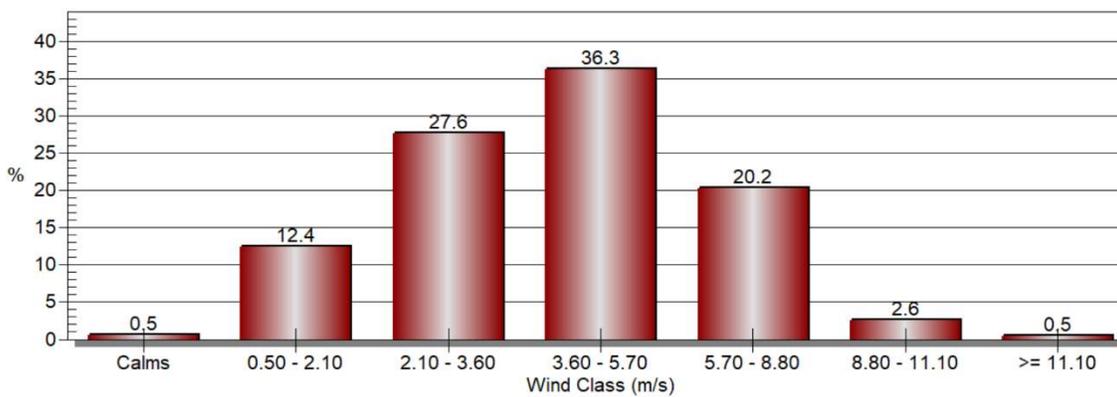


Figura 7. Gráfico de distribución de frecuencias (Realizado con el software WRPLOT).

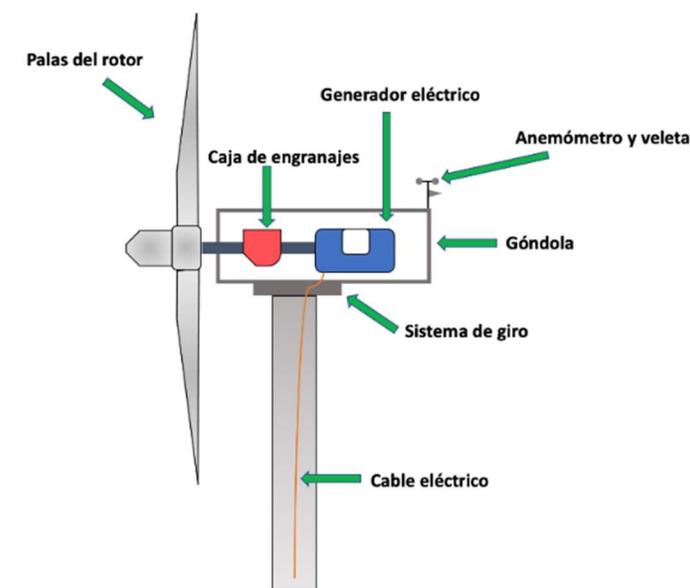


Figura 8. Partes básicas de una turbina de viento.

Debido a que la velocidad del viento es más fuerte a niveles más altos del suelo, las turbinas eólicas se montan en una torre. Al estar la turbina en un lugar alto, se evitan las turbulencias, debido a los obstáculos existentes (árboles, edificios). Inversiones en torres altas, reditúa en una ganancia de energía.

El aerogenerador cuenta con un sistema mecánico que es depositado en un contenedor llamado Góndola. La Góndola contiene una caja de engranajes que permite multiplicar la velocidad de giro de los ejes conectados. De la misma manera, la Góndola contiene un Generador que produce la electricidad. Finalmente, la electricidad es conducida por un cable eléctrico.

Las turbinas pequeñas, generalmente se montan en un mástil y cuentan con una cola en forma de veleta, la cual les permite orientarse en la dirección del viento, como la que se muestra en la **Figura 9**.

4.2. Otros componentes

Además de los componentes descritos en esta sección, existen otros que dependen del sistema, es decir, si se conectará a la red o estará aislado. Por lo anterior, es posible que se necesite un controlador, baterías de almacenamiento, un inversor y el cableado.

4.3. Curva de potencia de un aerogenerador

Cada aerogenerador cuenta con una curva de potencia, como la que se muestra en la **Figura 10**.

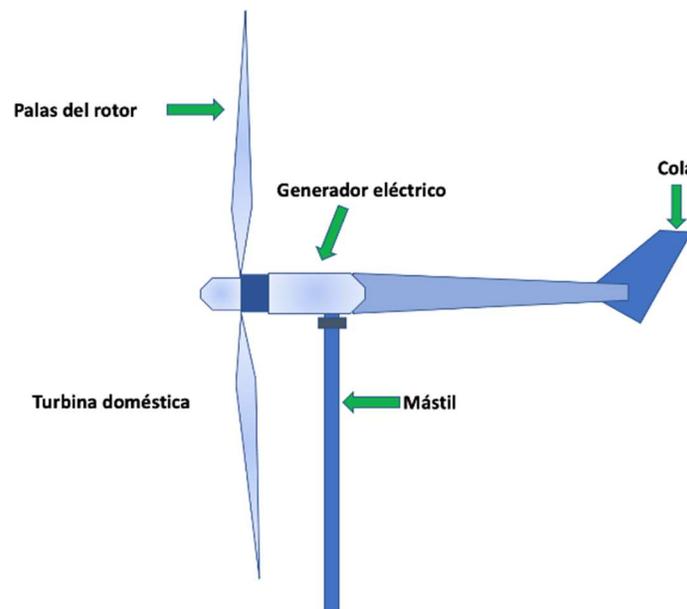


Figura 9. Turbina doméstica.

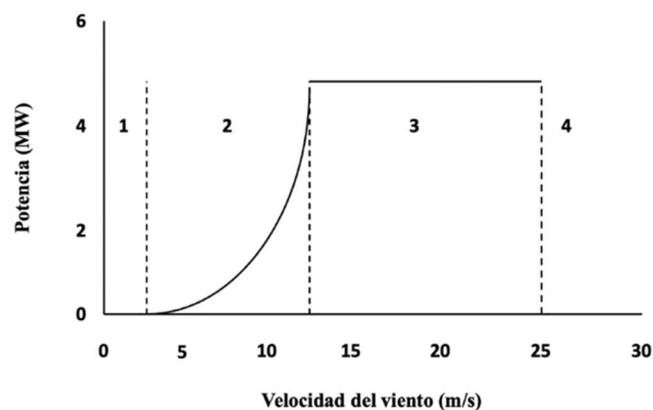


Figura 10. Curva de potencia de una turbina de 5 kW.

La curva de la **Figura 10**, muestra la generación de la potencia de una turbina en función de la velocidad. En la curva se aprecia que el arranque de la generación es aproximadamente a 3 m/s, otro punto destacado se encuentra aproximadamente a 12 m/s, que es la velocidad nominal, es decir, la velocidad a la que la turbina alcanza la máxima potencia (5 kW). Una vez que la velocidad se incrementa después de este punto, la potencia se mantiene hasta el valor de 25 m/s, si la velocidad es más grande la turbina saldrá de funcionamiento por protección.

La curva de potencia, es un elemento importante que deben proporcionar el fabricante y el vendedor, para que el usuario pueda tener una estimación de la energía que la turbina puede producir. Finalmente es importante comentar que existen diversas opciones cuyos detalles se pueden encontrar en línea.

5. Análisis costo-beneficio

Con la finalidad mostrar un ejercicio que involucre la cantidad de energía que se puede obtener en el sitio seleccionado, utilizando Turbinas eólicas con diferentes potencias y poder seleccionar una, se generó un simulador en Excel. El simulador utiliza las curvas de potencia de turbinas con capacidad de: 1kW, 1.5kW, 2 kW, 2.5kW y 3 kW, suponiendo una velocidad de arranque de los aerogeneradores de 2.5 m/s, una velocidad nominal de 12 m/s y una entrada en paro de 25 m/s. Combinando las curvas de potencia de las turbinas y contabilizando el número de horas aprovechables de viento, se obtuvo la **Figura 11**.

En esta figura se muestra la cantidad de energía que cada turbina puede generar en el sitio seleccionado en periodos mensuales. Se aprecia que con una turbina de 1 kW (azul claro), el déficit de energía es alto, cualitativamente se aprecia que no alcanza la demanda en ningún mes del año (verde), mientras que con una turbina de 3 kW (azul fuerte), hay un excedente de energía, los detalles de los cálculos se aprecian en la **Tabla 3**.

En la **Tabla 3**, la turbina de 3 kW, genera un excedente de energía de 529 kWh, sin embargo, el costo de inversión, que se refiere al costo de equipo, es más elevado. Una turbina de 2.5 kW, tiene un déficit de energía anual de 122 kWh, lo que parece razonable. Si consideramos el costo del kWh, de acuerdo con un recibo reciente de Comisión Federal de Electricidad (CFE), para el servicio intermedio, tenemos: 1.160 pesos por kWh.

Podemos resumir el déficit de energía, su costo y el costo de inversión de una turbina eólica, en la **Tabla 4**.

En la segunda columna se enlista el déficit de energía que cada turbina tiene en el sitio seleccionado, al multiplicar el déficit por el costo del servicio intermedio de CFE, obtenemos la columna tres. La columna cuatro es el costo de inversión de una turbina eólica (los precios varían de acuerdo con el fabricante) de acuerdo con su capacidad (solo se toma en cuenta el costo del equipo). Finalmente, la suma de los costos, nos da el gasto que se tendría que generar para cada turbina.

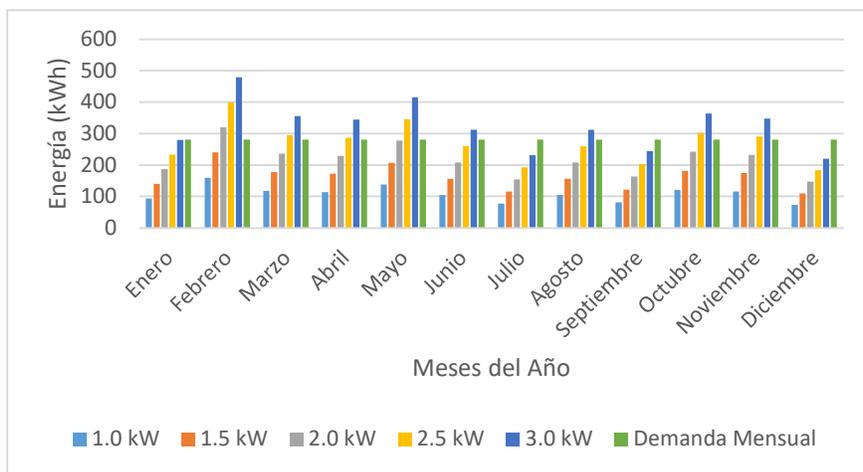


Figura 11. Energía generada por turbinas eólicas de capacidades diferentes, en el sitio seleccionado.



Tabla 3
Energía generada por turbinas eólicas de capacidades diferentes, en el sitio seleccionado.

Turbina/Mes	1.0 kW	1.5 kW	2.0 kW	2.5 kW	3.0 kW	Demanda Mensual
Enero	93	140	186	233	279	281
Febrero	159	240	320	399	479	281
Marzo	118	177	236	295	355	281
Abril	114	172	229	287	344	281
Mayo	138	207	277	345	415	281
Junio	104	156	208	260	312	281
Julio	77	116	154	193	231	281
Agosto	104	156	208	259	312	281
Septiembre	81	122	163	203	244	281
Octubre	121	181	242	302	363	281
Noviembre	116	174	232	291	347	281
Diciembre	73	110	147	183	220	281
Total (kWh)	1298	1951	2602	3250	3901	3372
Déficit (kWh)	2074	1421	770	122	-529	0

Tabla 4
Resumen de los costos de inversión.

Turbina (kW)	Déficit (kWh)	Costo déficit (\$)	Inversión (\$)	Total (\$)
1.00	2074.00	2405.84	3580.00	5985.84
1.50	1421.00	1648.36	4668.48	6316.84
2.00	770.00	893.20	5283.00	6176.20
2.50	122.00	141.52	7289.50	7431.02
3.00	0.00	0.00	9296.00	9296.00

De la misma manera, se aprecia de la **Tabla 4**, que, aunque la turbina de 3 kW abate el déficit por completo, debido al elevado costo de inversión, no es conveniente elegirla, algo similar ocurre con la turbina de 2.5 kW. Por otra parte, una turbina pequeña (1 o 1.5 kW), debido al alto déficit de energía, también genera un costo elevado, la turbina que garantiza un costo menor en este caso es la de 2.0 kW.

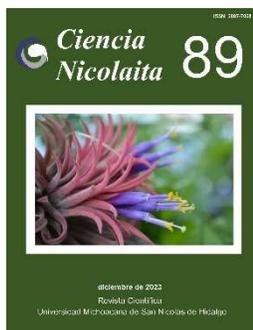
El gasto que se hace con una demanda de energía anual de la casa habitación, es de \$3, 911.52. Con una turbina de 2.0 kW, se reduce a \$893.20 anuales, el costo de inversión es de \$5, 283.00. Generalmente los equipos de este tipo tienen una vida útil de 20 años, por lo que se garantiza el retorno de la inversión. El análisis anterior, es un ejemplo sencillo de cómo puede generarse un análisis de costo, el cual debe estar más completo y con mayor detalle.

Conclusiones

Con este trabajo, se puede concluir que es importante el conocimiento de las diversas herramientas que están disponibles para la realización de la prospección eólica, como la obtención de datos anemométricos y el cálculo de la dirección del viento dominante de un sitio. Se destaca la importancia del ahorro de energía y se muestra la forma en que se debe calcular la densidad de potencia eólica de un sitio seleccionado. Finalmente, a través de un análisis costo-beneficio, en donde se calcula la potencia generada por diferentes turbinas, el costo de la energía producida y el costo de inversión de una turbina, se concluye que, para este caso específico, una turbina de 2.0 kW es adecuada para cubrir la demanda planteada de 281 kWh por mes.

Referencias

- Integrated Pollution Prevention and Control (IPCC), “Climate science 2023”, <https://climatescience2030.com>, [consultado el 12 de febrero de 2023].
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia (INEGI), Cuéntame de México, “Población rural y urbana”, https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P, [consultado el 20 de febrero de 2023].
- Oliva, R., Salvador, J., González, J. F., Cortez, N., Lescano, J., Triñanes, P., ... Luna, F. (2021). La normativa IEC para sistemas eólicos e híbridos aislados, y la utilización de tecnologías de medición remota: aplicación en contexto patagónico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 25, 234-245.
- Javed, M. S., Ma, T., Jurasz, J., Amin, M. Y. (2020). Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*, 148, 176-192.
- Bautista Blasco, J. A., García Cascales, M. S., Molina García, A. (2020). Análisis de viabilidad técnico-económica de proyectos de generación eléctrica eólica y solar para autoconsumo aplicado a la industria pesada, *24th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi*, 1436-1450.
- Barragán-Escandón, E. A., et al. (2019). *Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica*. Bitácora Urbano Territorial, 29 (2): 39-48. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.65720>
- Lakes software, “WRPLOT VIEW”, <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>, [consultado el 5 de abril de 2023].
- FIDE, “Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica”, <https://www.fide.org.mx/>, [consultado el 14 de abril de 2023].
- Zambak, M. F. (2021). The probability density function for wind speed using Modified Weibull Distribution. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Miguel Villarubia López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2013, Ed. Marcombo, S.A., 282 P. ISBN: 978-84-265-1580-7.
- Departamento de energía, EE.UU., *Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad, una guía para consumidores en Nuevo México*, <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42070.pdf>, [consultado el 26 de abril de 2023].



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida

An economic study of photovoltaic cells to be implemented in distributed generation

Luis Manuel Aguayo-Pérez, Dulce Celeste López-Díaz, Julio Armando de Lira-Flores

Para citar este artículo: Aguayo-Pérez Luis Manuel, López-Díaz Dulce Celeste, de Lira-Flores Julio Armando, 2023. Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida. Ciencia Nicolaita no. 89, 221-236. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.697>



Historial del artículo:

Recibido: 27 de octubre de 2022

Aceptado: 2 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: dulce.lopez@uaq.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estudio económico de las celdas fotovoltaicas para implementarse en generación distribuida

An economic study of photovoltaic cells to be implemented in distributed generation

Luis Manuel Aguayo-Pérez, Dulce Celeste López-Díaz, Julio Armando de Lira-Flores

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Cerro de las Campanas s/n Col. Las Campanas, Querétaro, Querétaro, 76010, México

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio económico para la selección de paneles fotovoltaicos, con el objetivo de cubrir una demanda específica de energía en un sector industrial. Para ello, mediante la compilación de datos eléctrico – térmicos de 26 celdas solares de silicio (monocristalinos - policristalinos), y los datos de las variables de entrada para cada tecnología, se determinó el costo de capital fijo, capital variable, de operación – mantenimiento e impacto ambiental para poder seleccionar el panel solar que brinde el mejor costo-beneficio. Se encontró que el panel M3 (policristalino) es el que mayor ahorro genera en un lapso de 25 años (vida útil) y las variables de mayor impacto en el análisis de sensibilidad es el costo del sistema de almacenamiento.

Palabras clave: Energía eléctrica, paneles fotovoltaicos, mejor tecnología, costo-beneficio.

Abstract

This article points out the economic study of the variables with the greatest impact on photovoltaic panels, to cover a specific energy demand in an industrial sector. Through the compilation of electrical - thermal data of 26 silicon solar cells (monocrystalline - polycrystalline), and the data of the input variable; the fixed capital cost, the variable capital cost, the maintenance and operation cost, and environmental impact for each of the systems was determined providing the best cost-benefit based on its variables. It was found that the M3 panel (polycrystalline) is the one that generates the greatest savings in 25 years (useful life) and the variable with the greatest impact in the sensitivity analysis is the cost of the storage system.

Keywords: Electric power, photovoltaic panels, better technology, cost-benefit.



Introducción

La demanda creciente de energía en el mundo, debido al aumento de la población en los últimos 10 años, ha provocado dificultades en la distribución de energía eléctrica (IEA, 2022). Por esta razón, hoy en día se están implementando tecnologías que hacen uso de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica; por ejemplo, paneles fotovoltaicos, turbinas hidráulicas y aerogeneradores (Nagpaland *et al.*, 2019). Estas tecnologías, amigables con el medio ambiente, se han propuesto para hacer más eficientes las redes de energía eléctrica disminuyendo las pérdidas por distribución y calor mediante el flujo eléctrico.

Uno de los objetivos de la Reforma Energética en México es que el país aumente el interés por el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente, un ejemplo de ello es al utilizar la combinación de fuentes de generación de energía eléctrica convencional y renovable; es decir, mediante la utilización de una red híbrida (Noreña, 2015). Para este fin, en México el uso de tecnologías renovables se ha fomentado a través de apoyos económicos y leyes que promueven la sustentabilidad (González-López y Giampietro 2018).

Los costos involucrados en una red eléctrica se han tratado de reducir a través de varios enfoques como: modelos matemáticos, materiales de construcción, balance de costos de entrada – salida en un periodo de tiempo determinado, redes inteligentes y análisis de sensibilidad de ciertas variables (Salim *et al.*, 2019). Un dato importante a resaltar es que en el 2018 se realizó la estimación a 6 y 12 años del panorama energético a nivel nacional, a medida que el país pueda generar el 35 % de energía eléctrica con tecnologías alternas, reduciendo un 22 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI por sus siglas en inglés) en función de la reestructura política que se aplica para la generación distribuida en México (Zinaman *et al.*, 2018).

Dentro de las fuentes de energía renovables, la energía solar destaca entre las más utilizadas mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Un panel fotovoltaico de este tipo está formado por un conjunto de celdas o células solares que producen electricidad a partir del efecto fotoeléctrico (capacidad de transfor-

mar la energía solar en eléctrica disponible), su eficiencia depende directamente del material, la cristalinidad y los datos de la zona en la que se instalarán (Paul *et al.*, 2017). La energía obtenida a partir de paneles fotovoltaicos ha despertado mucho el interés por la cantidad de radiación solar disponible, el promedio a nivel nacional es de 6 kW/m² (CRE, 2019). Por esta razón, una alternativa para reducir los costos de una red eléctrica es realizar estudios económicos mediante un análisis de sensibilidad de las variables que mayor impactan en la instalación de un parque fotovoltaico (Cheng *et al.*, 2021). A continuación, se señalan algunos trabajos que han estudiado la utilización de energías renovables, y en particular energía fotovoltaica, para reducir los costos y hacer más eficiente la generación y distribución de energía eléctrica.

Domínguez *et al.* (2012) diseñaron un sistema de distribución de energía eléctrica de forma lineal con diferentes acomodos de los equipos en una red eléctrica. Rezaee (2016) propuso una medida para la distribución de los equipos de una red eléctrica para la distribución, conexión y generación de energía utilizando turbinas eólicas para reducir las pérdidas de energía y el costo global. Adeferati y Bansal (2017) propusieron la regla 2/3, que se aplica en la ubicación eficiente de transformadores, líneas de distribución, generadores de energía y subcentrales, con el objetivo de disminuir la cantidad de material o equipos y, por tanto, los costos de la red eléctrica.

Atwa *et al.* (2014) diseñó una red eléctrica en función de paneles fotovoltaicos aplicando la regla de 2/3 para la ubicación de equipos y así reducir la pérdida de energía en un centro de carga estable de 10 paneles. Suarez (2016) determinó mediante un dimensionado lineal de los paneles fotovoltaicos la posición e inclinación ideal de los sistemas con el objetivo de reducir el costo de kW por pérdida de energía en la conducción por reducir la distancia entre equipos. Haupt *et al.* (2017) presentó uno de los primeros sistemas matemáticos para una red eléctrica con turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos, utilizando el software MATLAB, teniendo como objetivo la optimización del dimensionado de las tecnologías y su ubicación para disminuir los costos operacionales. Theo *et al.* (2017) desarrollaron un proceso complejo de cuantificación

de costos de inversión para paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, para reducir el costo de producción de energía.

Grossmann *et al.* (2017) presentaron una estrategia para minimizar la potencia eléctrica distribuida a los alimentadores principales de un sistema fotovoltaico de las subcentrales, transformadores y distribuidores de energía en una red eléctrica inestable. Shivarana y Sathish (2018) realizaron un balance de costos entre una fuente de generación eléctrica convencional y una renovable, para encontrar el dimensionamiento de una red eléctrica que reduce costos de inversión y mantenimiento. Hancevic *et al.* (2018) diseñaron un proceso que mide las condiciones ideales de una red eléctrica en función de sus propiedades eléctricas y térmicas al conectar un sistema de paneles fotovoltaicos aislados. Acha *et al.* (2019) desarrollaron un modelo matemático para determinar las condiciones óptimas de una instalación con paneles fotovoltaicos en relación a sus componentes de carga.

Aun cuando existe un gran número de trabajos en esta temática, no se han realizado estudios referentes a la selección de un panel fotovoltaico considerando el factor del impacto ambiental, el análisis de los costos fijos y variables del sistema de generación de energía eléctrica para su compra, instalación y puesta en marcha, esto para analizar el panel fotovoltaico que conviene adquirir dentro de un conjunto de opciones; es decir, si los dueños o accionistas de una empresa, deciden instalar un parque fotovoltaico, tendrían que contestar la pregunta: ¿qué panel fotovoltaico es conveniente comprar de acuerdo a la región o zona en la que se instalará? La respuesta requiere un análisis de los costos de adquisición y operación y como se ven afectados en función de las variables que modifican la eficiencia de una celda fotovoltaica, con la finalidad de satisfacer una demanda (dimensionado) de energía específica de un parque industrial. En este trabajo se realiza un análisis económico teniendo como objetivo implementar un análisis de sensibilidad con las propiedades de los paneles fotovoltaicos para encontrar el costo beneficio mejor evaluado mediante la selección de la mejor tecnología posible de 26 opciones disponibles de distintos proveedores de paneles fotovoltaicos. Para ello, se utiliza una superestructura de decisión que relaciona las variables de entrada y salida del sistema como punto clave (red eléctrica). Por otro

lado, es de importancia mencionar que la energía generada por los paneles fotovoltaicos estará comprendida en un rango del 25 – 35 % de la demanda total.

Metodología, materiales y métodos

La metodología utilizada se muestra en la Figura 1, la primera parte del trabajo fue seleccionar una zona de estudio, en este caso, se tomó como referencia la ubicación geográfica del Parque Industrial Querétaro (PIQ) para la recopilación y análisis de datos ambientales. Después, se hizo una suposición de la demanda de energía eléctrica. La siguiente etapa consistió en la elaboración de un compendio de las fichas técnicas de los 26 paneles fotovoltaicos de silicio con diferente cristalinidad para la identificación de las variables que influyen en los costos totales. En la etapa posterior, se comparó la generación de emisiones de CO₂ de fuentes de energía convencional y fotovoltaica y se elaboró una superestructura de decisión para visualizar el conjunto de variables presentes.

Los costos que comprenden el problema son:

- Costo capital fijo: indica todos los costos de inversión inicial o que solamente se realizan una vez durante todo el proyecto de instalación del parque fotovoltaico, de aquí se deducen los costos de compra de la unidad, instalación, cableado, permisos ambientales o regulatorios.
- Costo capital variable: están en función del periodo de funcionamiento del sistema, se hacen de manera frecuente y depende de las acciones que se lleven a cabo en tiempos indeterminados como la mano de obra y la obra civil requerida para la implementación del parque fotovoltaico.
- Costo de operación - mantenimiento: se consideran tres tipos, el de asignación que hace referencia al arreglo semanal de las bases de datos, el predictivo siendo la limpieza superficial de los paneles fotovoltaicos cada 8 meses promedio (dependiendo del panel y la zona de estudio) y el correctivo que se emplea promedio cada 3 años, el cual hace referencia al cambio total de una pieza del sistema.

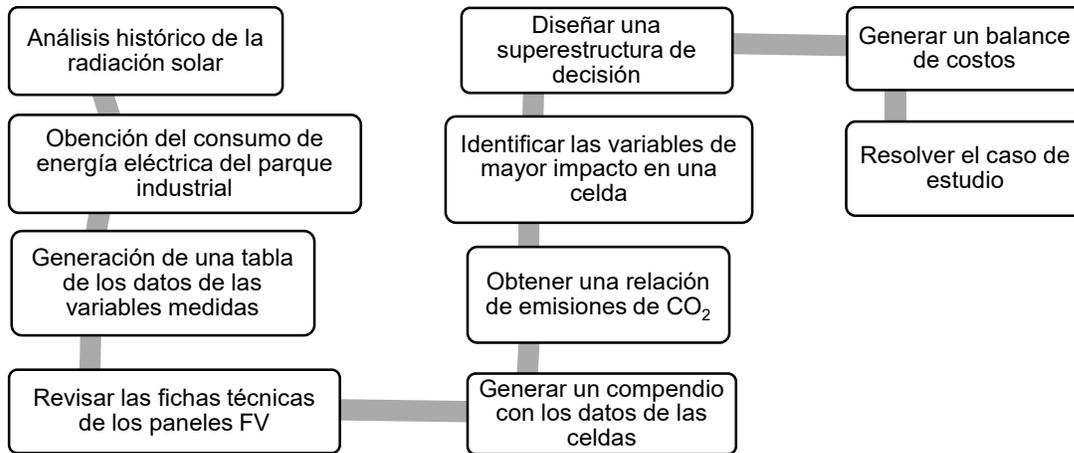


Figura 1. Diagrama de la metodología que se va a emplear para dar solución al problema de maximización de costo – beneficio.

- Costo de remediación ambiental: de forma monetaria se da un valor a las emisiones generadas enfocadas al CO₂ comparando la generación de energía eléctrica con los paneles fotovoltaicos y la red pública.

Obtención de datos de carga

El estudio de las variables ambientales del área de estudio comprende un periodo de cinco años, para reducir el nivel de sesgo. Para ello, se utilizó la base de datos de INEGI para recopilar datos del 2017 – 2022

a)

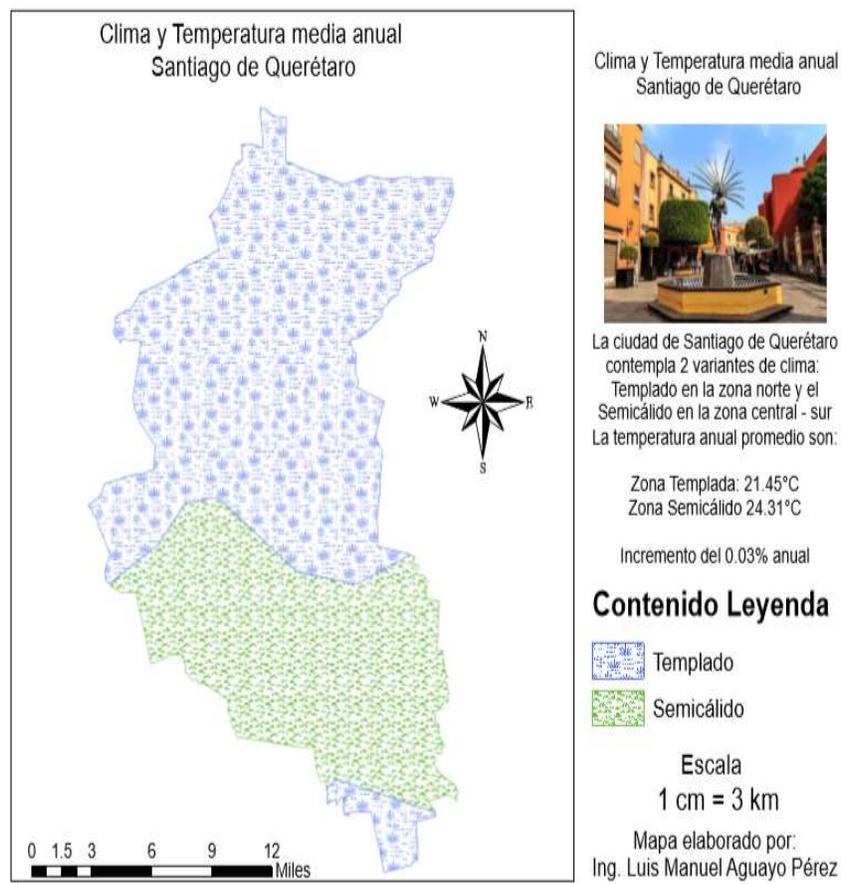


Figura 2. a) Mapa de radiación solar.

b)

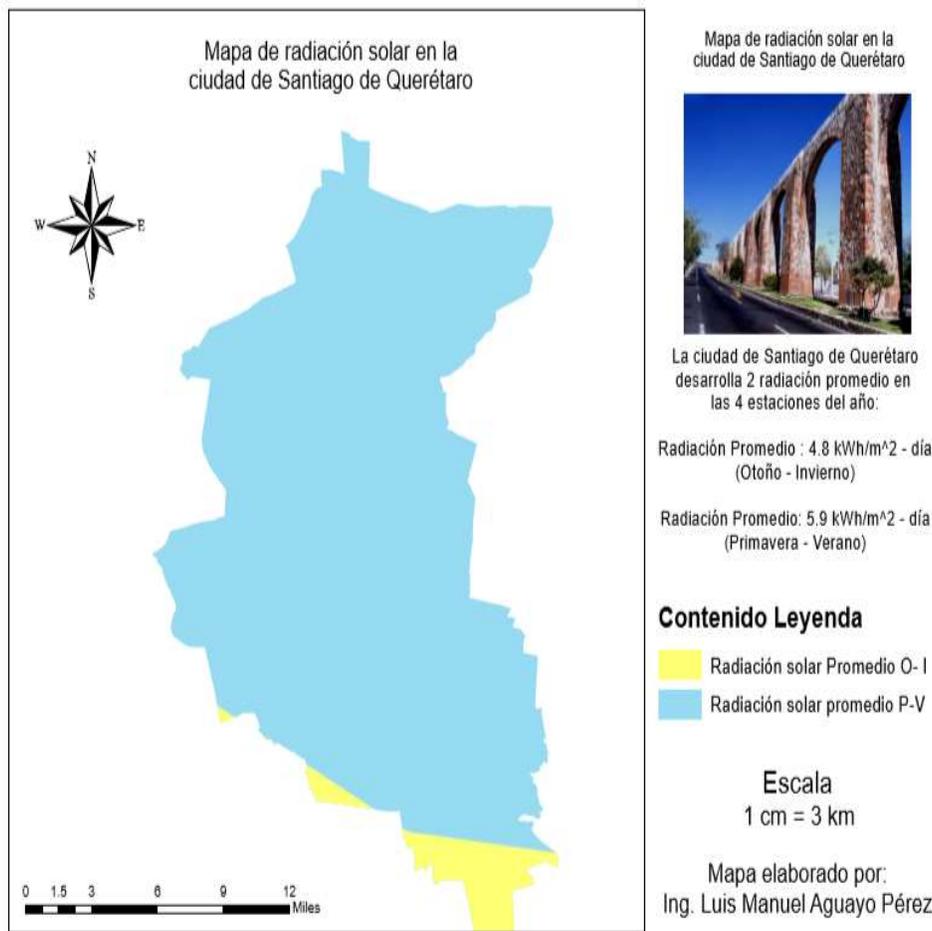


Figura 2. b) Mapa de temperatura de sitio para la zona de estudio del parque industrial.

generando un mapa de oferta de radiación solar disponible. En la Figura 2 se observan dos mapas, uno de radiación solar, a), con un valor promedio de 5.921 kW/m²d con un rango de 6.48 horas sol promedio, (9:00 am – 16:00 pm), con una inclinación fija de 33.545°, cabe resaltar que este ángulo depende directamente de la latitud de la zona de estudio, en la cual se utilizó un ángulo de azimut de 180° y con un promedio de 9.89 meses de luz directa. En la zona, se tiene un valor promedio de 0.25 octas para la nubosidad (¼ de cielo cubierto por nubes). De igual forma, en la Figura 2a se presenta un mapa de temperatura de posición, y Figura 2b, para el área de estudio con el mismo periodo de análisis, obteniendo valores de la base de datos de INEGI – CONABIO, con una temperatura diurna promedio de 29.65 °C, el coeficiente del área con relación a su tipo de vegetación, precipitación y tipo de suelo es de 1.15, bajo condiciones de tipo R dadas por el tipo de relieve.

La demanda de energía eléctrica supuesta de la zona de estudio se determinó considerando un total de 118 industrias, de las cuales 20 son de recurso primario (fabricante de productos), 80 de secundario (subproductos) y solo 18 pertenecen al terciario (caminos, administrativo o zonas verdes). Después, se tomó una muestra representativa de las industrias primarias, con un consumo promedio del 92.4 % del global del parque industrial. En la Tabla 1 se muestran los datos de las 10 industrias seleccionadas en función de su giro industrial, productos que generan y consumo de energía eléctrica diaria. Cabe mencionar que los cuatro giros pertenecen a las industrias Automotriz (Au), Metalúrgica (Me), Textil (Te) y Eléctrica (El); se observa que hay dos industrias que destacan por su alto consumo de energía eléctrica siendo estas la industria eléctrica (electrodomésticos) y la industria automotriz encargada de la elaboración de partes para vehículos de carga mediana con un 68.71 % del global, es decir que fabrican dispositivos de mayor volumen

de uso como refrigeradores, lavadoras, camionetas y grúas ligeras.

El compendio de las propiedades térmicas – eléctricas de los paneles fotovoltaicos de silicio, con diferentes niveles de cristalinidad, se generó tomando en cuenta 26 fichas técnicas de paneles fotovoltaicos otorgadas por diferentes proveedores. Estos paneles tienen una potencia estable de 250 W, con una vida útil promedio de 25 años, y dichas características están relacionadas a condiciones de operación estándar de 25 °C, 1 atm y 21 % de humedad relativa. En la Tabla 2 se muestran las propiedades de estos paneles, adicionalmente se agregaron los valores de los costos de mantenimiento (predictivo – correctivo) y los costos de inversión de compra inicial para cada uno de los sistemas. Es de suma importancia mencionar que se usaron sistemas fotovoltaicos de 250 W debido a que se contaban con las propiedades de entrada reales de los dispositivos como: temperatura nominal de funcionamiento, capacidad nominal, eficiencia bajo condiciones estándar (ideales), y se brindaron de manera directa con los proveedores nacional los datos económicos de producción en función de los costos de capital fija, capital variable, operación – mantenimiento y el factor de generación de gases de efecto invernadero enfocadas al CO₂, con el objetivo de reducir el sesgo de error por el uso de datos no específicos.

Diseño de la superestructura y planteamiento de las ecuaciones

La superestructura ayuda a relacionar las variables en la toma de decisiones de un problema dado. En la Figura 3 se muestra la superestructura utilizada para reducir los costos asociados al uso de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica renovable. Las variables consideradas incluyen el mantenimiento, la inversión, las emisiones de CO₂, el análisis de variables climáticas y el tipo de tecnología. En la Figura 4 se hace un desglose de los costos fijos y anuales de los paneles fotovoltaicos. A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas para determinar estos costos en función de la demanda energía eléctrica en un porcentaje entre un 25 y 35 % del total.

Costo beneficio

El costo-beneficio es la respuesta que deseamos encontrar mediante un análisis de sensibilidad de los paneles fotovoltaicos de este problema. Esta ecuación toma en cuenta costos fijos y anuales:

$$C_{ben} = \left((C_{prod} + C_{amb}) - C_{man} \right) PVE - C_{inv} \quad (1)$$

Tabla 1

Consumo de energía eléctrica en función del tipo de industria para la zona de estudio y su actividad principal.

Industria	Actividad o producto	Consumo de energía MW/d
A (EI)	Manufactura de herramientas	0.99
B (EI)	Equipos eléctricos complejos	1.773
C (EI)	Electrodomésticos	10.37
D (EI)	Partes de los electrodomésticos	1.49
E (Me)	Bases metálicas	0.98
F (Me)	Cableado de cobre – aluminio	0.59
G (Au)	Vehículos recreativos motorizados	1.47
H (Au)	Vehículos de carga mediana	10.43
I (Au)	Direcciones hidráulicas	2.42
J (Tex)	Pintado de vehículos	0.73

Tabla 2
Compendio de las propiedades económicas, eléctricas y térmicas de 26 paneles fotovoltaicos de silicio (mono-cristalinos y poli-cristalinos).

Características del panel fotovoltaico	Tipo de panel fotovoltaico																									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26
Temperatura nominal de la celda (°C)	45	48	47.5	48	46	47	46	47	46	46	45	45	48	49	47	47	45	48	49	48	48	48	46	43	47	48
Tiempo de vida útil (años)	25	25	25	20	25	25	25	25	23	25	23	25	25	25	25	25	20	25	20	25	25	25	23	25	25	25
Eficiencia de la celda (%)	18.7	19.4	19.9	18.8	19	18.2	19.1	17.6	17.9	18	18.4	18.4	18.6	13.2	12.4	12.8	13.5	12	12.4	12.6	13	12.8	11.4	11.8	11	12.7
Costo de mantenimiento USD/m² año	0.00081 (Se realiza cada 12 meses)													0.00029 (Se realiza cada 12 meses)												
Costo de inversión USD	678	710	771	642	694	713	679	750	732	748	673	652	631	339	305	368	461	331	397	358	424	344	307	401	328	371

Dónde C_{prod} es la diferencia entre los costos de producir un kW mediante una fuente convencional menos el costo de producir la misma energía, con una fuente renovable. C_{amb} es costo ambiental (remediación) y se determina con la diferencia que existe entre la cantidad de emisiones de GEI (CO₂) generadas por

utilizar una fuente convencional de energía y una renovable. C_{ener} es el costo que se genera al instalar los paneles fotovoltaicos a la red en función de la distribución de energía en una distancia determinada, el tipo de conexión que se tiene entre los paneles y la interconexión de celda – celda en el mismo sistema.

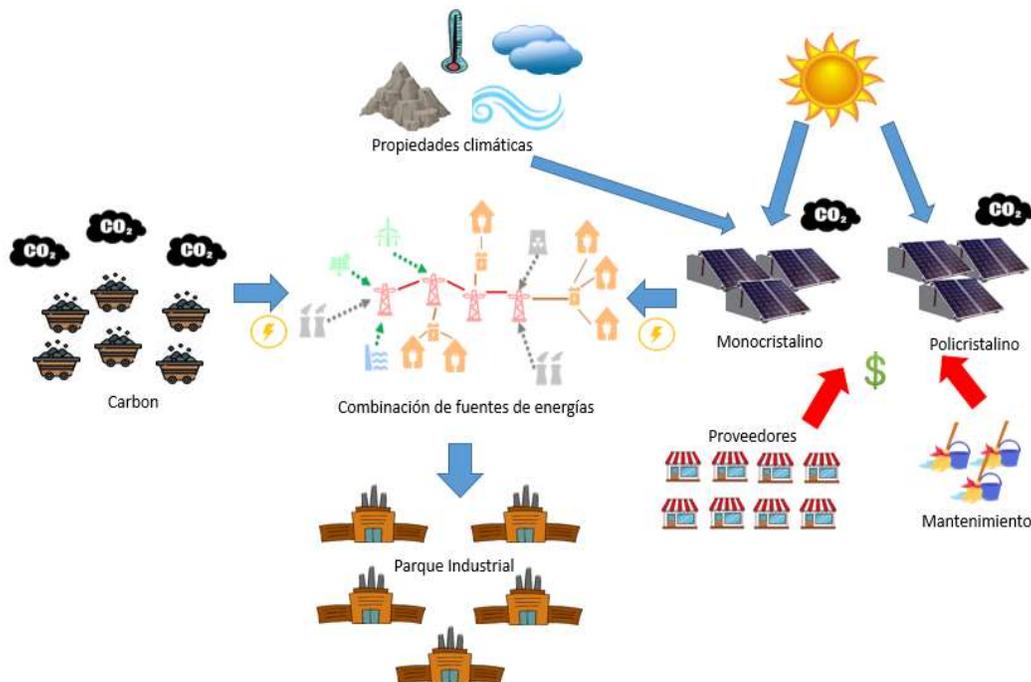


Figura 3. Superestructura de decisión para el problema de maximización del costo beneficio de una red eléctrica con paneles fotovoltaicos.

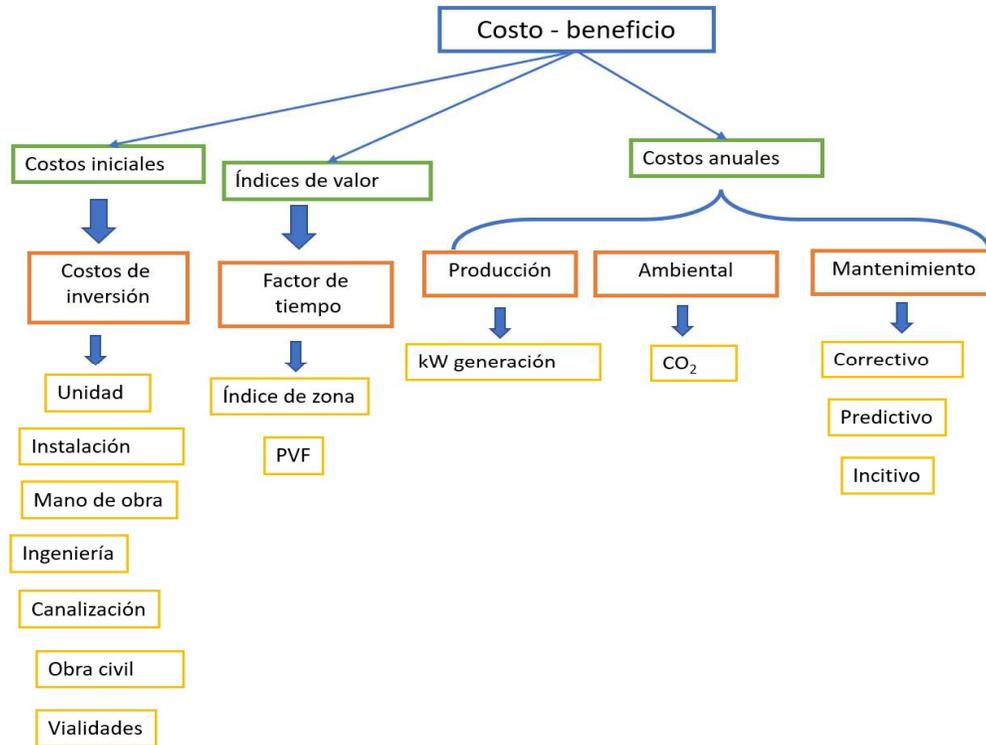


Figura 4. Esquema de las variables de mayor impacto para la aplicación de paneles fotovoltaicos en una zona específica.

C_{zona} es el costo que se produce por el impacto de las variables climáticas – ambientales como: la temperatura y la nubosidad en la eficiencia de transformación de energía directa de un panel fotovoltaico. El C_{man} es el costo de mantenimiento que se le da al panel solar de forma predicativa y correctiva durante un lapso de 25 años y el C_{inv} es el costo de comprar un panel fotovoltaico con ciertas propiedades eléctricas – térmicas, esta se hace con un proveedor de forma directa. PVE es el factor de valor presente, el cual multiplica los costos anuales, con un interés, R , del 0.05 % a un plazo, t , de 25 años con la ecuación (2).

$$PVE = \left(\frac{1 - (1 - R)^t}{R} \right) \quad (2)$$

Costos fijos o de inversión

El costo de inversión inicial o costo capital fijo son los valores que solamente serán adquiridos al inicio del proceso de instalación y verificación del proceso, los cuales incluyen los costos de unidad por panel fotovoltaico, los costos de instalación del equipo, los costos del cableado y los costos de ingeniería, siendo

los que hacen referencia a los permisos de ubicación de un sistema de generación eléctrica con alguna energía alterna. La ecuación 5 y 6 hacen alusión al dimensionamiento de los equipos, ya que es algo que se desea buscar de igual forma en el problema, este factor se señala mediante la ecuación 3 - 6:

$$C_{inv} = C_{inver} \cdot N_p \quad (3)$$

$$CCost = CCost^{PV} + CCost^{BS} \quad (4)$$

$$C_{Cost}^{PV} = \sum_{p=1}^{P=\delta} (\vartheta_p^{PV} \cdot N_p + \xi_p^{PV} \cdot W_p^{PV-cl}) \quad (5)$$

$$C_{Cost}^{BS} = \vartheta^{BS} + \xi^{BS} \cdot E^{BS} \quad (6)$$

Dónde C_{inver} es el costo de cada panel fotovoltaico con su instalación, puesta en marcha y el equipo de forma completa (panel fotovoltaico y batería) ϑ_p^{PV} depende de cada uno de los proveedores y N_p hace

referencia al dimensionado o número de paneles en un espacio determinado, el costo de inversión del panel $CCost^{PV}$ depende de la energía eléctrica generada del factor de costo por kWh ξ_p^{PV} y del dimensionado del sistema, mientras que la batería se relaciona $CCost^{BS}$ con el factor de costo por kWh almacenado ξ^{BS} y distribuido al cliente de forma directa E^{BS} en función de los días de operación ϑ^{BS} .

Costos anuales o dinámicos

Los costos anuales o dinámicos corresponden aquellos que están sujetos a cambios por factores como intereses o impuestos que puedan hacer que exista una modificación en su valor durante un tiempo establecido, para el cálculo de una red eléctrica en función de dos tecnologías es importante conocer la potencia generada de forma activa, para ello en la ecuación 7 se muestra la forma de calcularse:

$$G_{ijm} = V_o \cdot I_o \cdot FF_o \tag{7}$$

Dónde G_{ijm} es la potencia activa generada por un panel fotovoltaico, la cual depende directamente de las propiedades eléctricas que presenta el dispositivo como la corriente inicial I_o , el voltaje inicial al poner en marcha la tecnología V_o y al factor de llenado FF_o cuándo comenzará a construir la curva de potencia I – V. De igual forma, para el dimensionado de un sistema fotovoltaico en función de las propiedades ambientales de una zona en específico se calcula mediante la aplicación de las ecuaciones 8 y 9:

$$N_p = \left(\frac{Factor_p}{\frac{HrsSol}{CoefZona}} \right) \tag{8}$$

$$Factor_p = \left(\left(\frac{Pactiva}{P_{ot}} \right) + \left(\frac{Pactiva}{P_{ot}} \right) \cdot E_f \right) \tag{9}$$

Dónde N_p depende del factor de potencia del panel fotovoltaico $Factor_p$, el cual es una medida de la eficiencia o rendimiento del sistema eléctrico, este indicador mide el aprovechamiento de la energía eléctrica desde el punto de generación hasta el sistema de

consumo, considerando la energía que realmente llega al cliente, de la cantidad de horas de radiación disponible $HrsSol$ y del coeficiente de zona para una zona de estudio en específico $CoefZona$. Mientras que el $Factor_p$ está en función de la potencia activa que se genera en el celda solar $Pactiva$, la potencia nominal o inicial de la celda P_{ot} y la eficiencia real de equipo E_f . En este problema solo nos enfocamos en la selección del panel fotovoltaico en función de las propiedades económicas y ambientales de la zona, lo que no nos lleva a considerar el inversor o alguno otro sistema como auxiliar, dado el caso que estamos hablando de una tecnología intermitente lo que lleva al uso de una sistema de almacenamiento (batería de ácido – plomo), en donde de igual forma se busca su capacidad.

Los costos anuales se dividen en costos de producción, impacto ambiental, propiedades de zona y características eléctricas de un panel fotovoltaico: Costos de producción: es la diferencia que se genera al producir un kW de energía eléctrica con una fuente convencional y con una fuente renovable (celdas solares), se calcula mediante la ecuación 10 (Sánchez *et al.*, 2023):

$$C_{prod} = Demanda_{Co} \cdot 0.042 - Demanda_{Re} \cdot 0.042 \tag{10}$$

Dónde C_{prod} depende de la demanda de energía eléctrica que se cubrirá con una fuente convencional $Demanda_{Co}$, el costo de producción de un MW con esta tecnología 0.042 USD y de la demanda de energía eléctrica generada con los paneles fotovoltaicos $Demanda_{Re}$ y su costo por MW 0.042 USD, se utiliza el mismo margen de precio para evitar un sesgo de error al evaluar el mercado energético.

Costo ambiental: este costo se relaciona con el ahorro que existe entre producir un kW con energía convencional y al incorporar a la red eléctrica una fuente alterna como los paneles fotovoltaicos en función de las emisiones de CO_{2eq} colocando un impuesto al carbono, se calcula mediante la ecuación 11 (Kommalapati *et al.*, 2017):

$$\begin{aligned} Camb = & Demanda_{CO_2} \cdot 983 \text{ gCO}_{2eq}/kWh \\ & - Demanda_{Re} \cdot 275 \text{ gCO}_{2eq}/kW \end{aligned} \quad (11)$$

Dónde $Camb$ está en función de la $Demanda_{CO_2}$ y $Demanda_{Re}$ con sus respectivos precios de remediación para el CO_2 $983 \text{ gCO}_{2eq}/kW$ y $275 \text{ gCO}_{2eq}/kW$ respectivamente.

Costo de mantenimiento: el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos C_{man} se dividen en tres aspectos, el primero se conoce como mantenimiento de asignación (limpieza de software), el cual es considerado como $0.00008 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00003 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento predictivo es aquel que se hace de manera superficial en las celdas para eliminar el polvo o residuos que se puedan generar y que puedan ser factores que disminuyan la eficiencia de conversión, este valor se encuentran en $0.00029 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00011 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento correctivo, el cual es el arreglo parcial de alguna parte esencial del panel fotovoltaico, como el cambio de una celda o una falla en el cableado, es un cambio en la funcionalidad de la generación de energía eléctrica, el valor es de $0.00048 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles monocristalinos y $0.00015 \text{ USD}/m^2\text{año}$ para los paneles policristalinos, el mantenimiento global es la suma de los tres mantenimientos dados por la generación para cada kWh, en función del dimensionado del sistema, se calcula mediante la ecuación 12:

$$C_{man} = C_{mant} \cdot N_p \quad (12)$$

Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados al utilizar paneles fotovoltaicos para satisfacer un porcentaje de la demanda supuesta de energía eléctrica del parque industrial seleccionado en la ciudad de Santiago de Querétaro, la demanda global a cubrir es de 31 MW para 10 industrias primarias de producción activa manejando un rango de penetración con la fuente de energía renovable del 25 – 35 %. De esta forma, se determinó el costo beneficio de utilizar cada uno de los paneles en 25 años de vida útil con la información

presentada en la sección 3 de las propiedades ambientales y las fichas técnicas de los paneles fotovoltaicos (características térmicas, eléctricas y de costos).

El valor de la respuesta del costo-beneficio para este caso de estudio corresponde a 89, 879 USD siendo para el panel fotovoltaico monocristalino “M3”, que se seleccionó como la mejor alternativa de la muestra de las 26 opciones. En la Figura 5 se muestran los valores de la solución para una penetración del 25 – 35 %. Al considerar el factor más alto de 35 %, se genera un mayor ahorro en un lapso de tiempo más corto. Existe la posibilidad de seleccionar otro panel fotovoltaico en caso de que el seleccionado no se encuentre por alguna razón o circunstancia ajena, estos valores pueden modificarse si las condiciones del área se alteran o si se aplican en otro lugar, ya que dependen directamente de las variables climáticas; también indica qué paneles sufren cambios notables en su eficiencia de conversión eléctrica.

La red de energía mixta IP, que aplica la celda solar M3 seleccionada, genera una tasa de recuperación simple de 14 años con 7 meses; es decir, en este tiempo se recuperarán los que se invirtieron al 100 %, a partir de este momento, se indica que el ahorro de energía y valor monetario que se tiene en el sistema será una ganancia directa para el Parque Industrial, que se puede utilizar por compañías secundarias con un GDRM (Generación Distribuida Renovable Mixta) a menor capacidad. Por lo tanto, el ahorro anual de la generación distribuida implementada durante la vida útil del sistema FV será de 988, 669 USD, lo que representa un ahorro significativo para el sector industrial. El panel M3 que se seleccionó tiene una baja sensibilidad a la nubosidad y altas temperaturas de posición (12-21 % respectivamente), y su eficiencia de conversión es del 19.9 % (siendo la más alta en el compendio del panel PV).

La Figura 6 muestra el resultado de las variables analizadas dadas por estación del año, teniendo en cuenta la vida útil del sistema de 25 años. El factor de mayor relevancia en la red eléctrica GDRM es la nubosidad, ya que está relacionado con factores de eficiencia de conversión directamente en sistemas como: temperatura, energía suministrada y factor de estabilidad celular. De manera similar, la temperatura del sitio tiene un impacto considerable en la producción de la potencia efectiva real del sistema GDRM y la que tiene el menor impacto es la remediación inclinada al

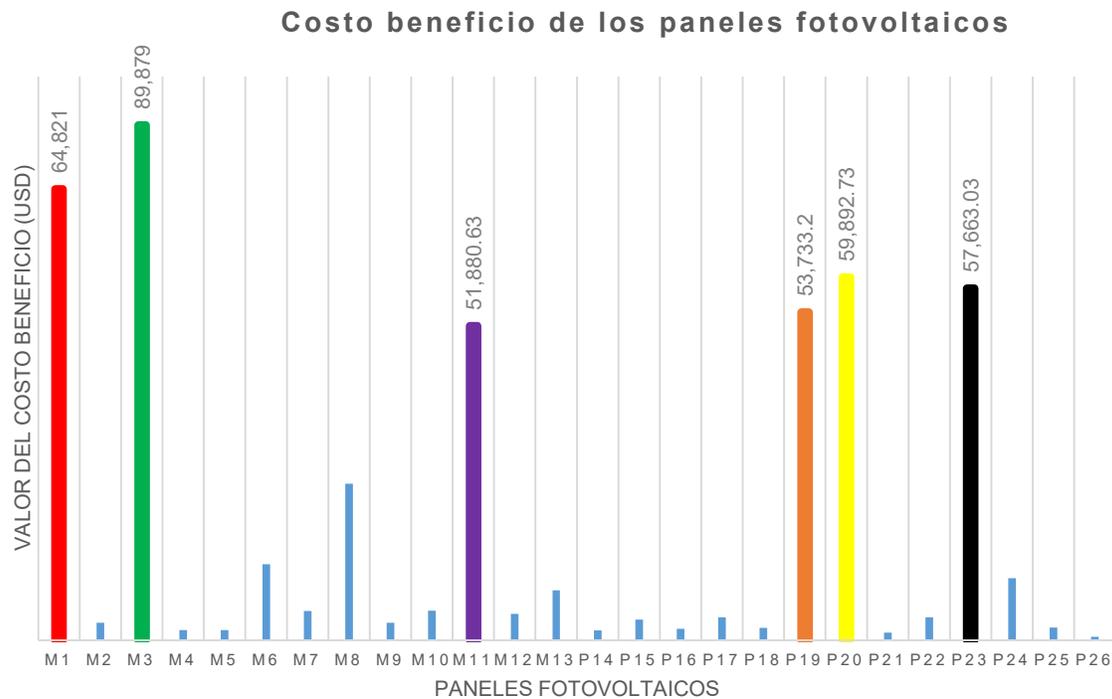


Figura 5. Costo beneficio para los paneles fotovoltaicos.

CO₂, ya que tiene un valor promedio de 320 USD. Sin embargo, dado que tiene una importancia socio ambiental en cooperación con los créditos de carbono, es de suma importancia tener en cuenta. En la temporada de primavera es cuando hay un mayor beneficio de costo para la cantidad de radiación disponible para ser transformada a electricidad, el índice de nubes es bajo y se puede dar una utilización del 100 %. Por otro

lado, en invierno hay un bajo uso de radiación solar para el número promedio de horas efectivas de radiación de 4.23 (reduce la eficiencia general).

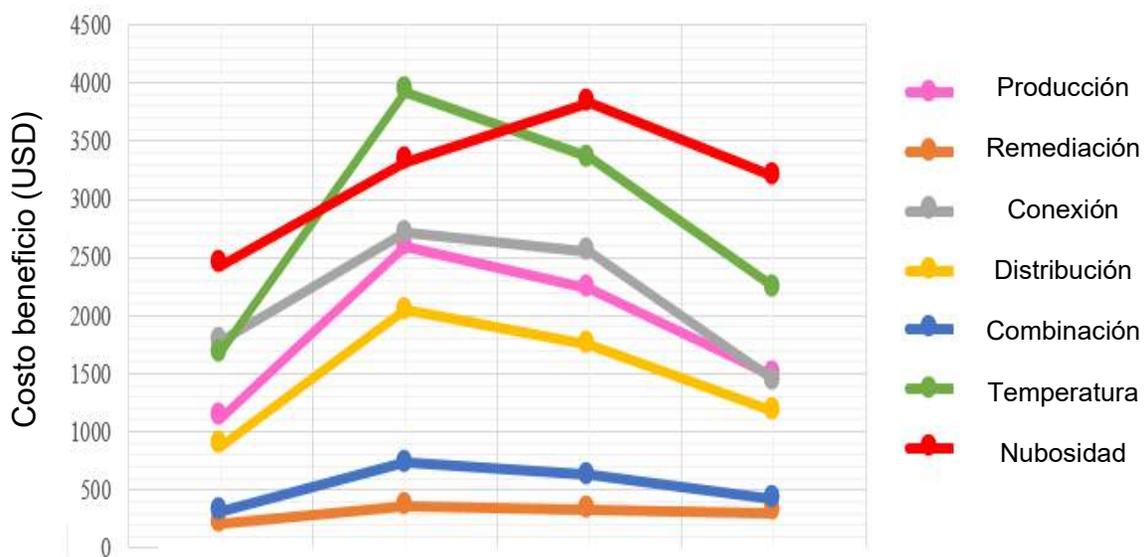
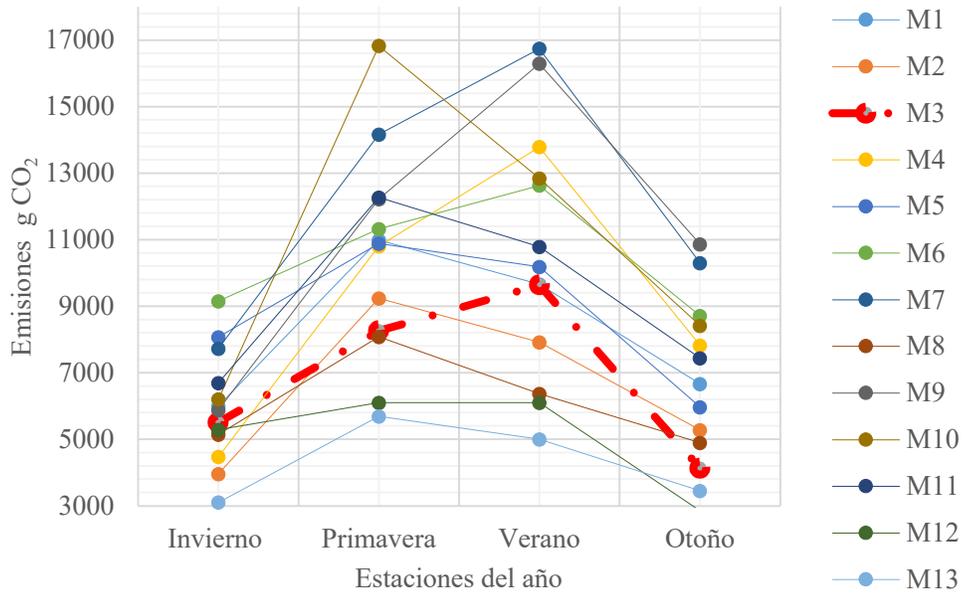


Figura 6. Impacto de las variables en el costo beneficio de una celda fotovoltaica.



Emisiones de CO₂ para los paneles monocristalinos



Emisiones de CO₂ para los paneles policristalinos

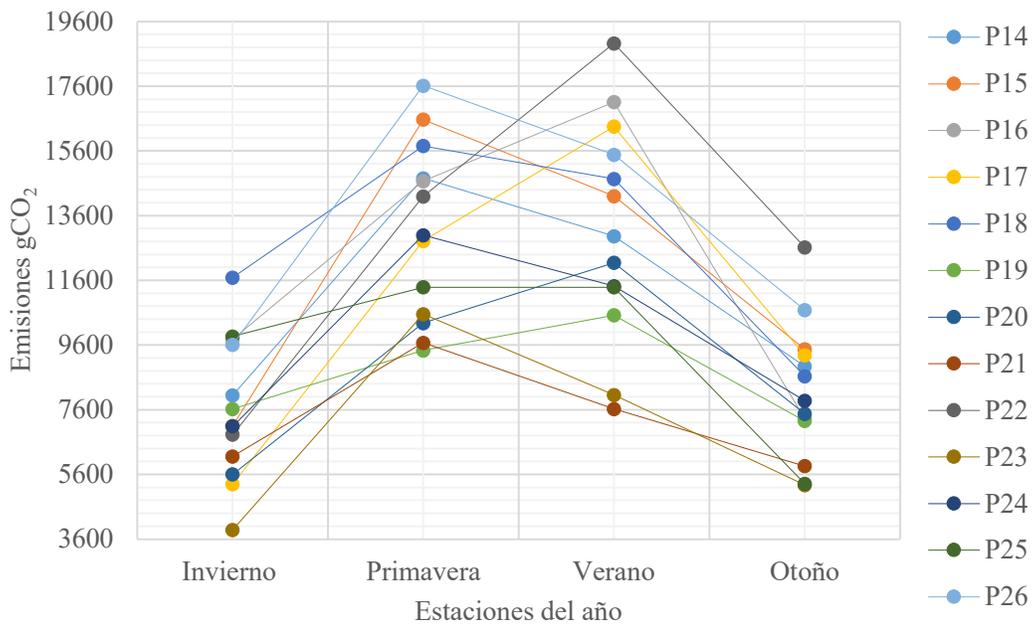


Figura 7. Factor de impacto ambiental para las celdas fotovoltaicas.

El valor del costo beneficio obtenido se debe, de manera porcentual, a la nubosidad 28.6 % y temperatura 21.89 % de la zona, tipo de conexión 16.31 %, producción de energía renovable 12.82 %, de distribución en la red 11.35 %, la combinación de 6.86 % de energías de generación y 2.17 % de remediación o factor ambiental. A la luz de esta información, concluimos

que no siempre el panel con mayor potencia activa será la mejor opción, ya que se deben considerar otros factores que tienen influencia en la producción de energía eléctrica, como los aspectos climáticos ya que modifican la eficiencia de transformación de energía.

La Figura 7 muestra la cantidad de emisiones que no se generaron por el uso de energía fotovoltaica en

combinación con la convencional, en la primera figura Se analizan las emisiones de CO₂ en paneles monocristalinos, destacando que hay un ahorro promedio de 11 toneladas para la vida útil de 25 años de los paneles fotovoltaicos, para el panel M3 (seleccionado) tiene un valor promedio de 8.14 toneladas, es decir, no es el que tiene la mayor cantidad de emisiones, ya que depende directamente del tipo de material, la producción de energía eléctrica y los coeficientes de temperatura.

En la segunda figura, se analizan las emisiones de CO₂ para los paneles fotovoltaicos de material policristalino, donde hay un promedio general de 12.75 toneladas de ahorro de emisiones contaminantes, siendo mayor que para el otro tipo de cristalinidad con un promedio de 12.87 toneladas y el que genera la menor contribución es el invierno con un valor de 7,62 toneladas, si la lógica de seleccionar el panel que ahorra la mayor cantidad de emisiones de CO₂ se guarda durante la vida útil de un sistema eléctrico o si ese fuera el objetivo del proyecto P22, M10 y M7 sería cada vez más seleccionado, ya que el M3 que se obtuvo como resultado es el duodécimo panel de los 26 presentados.

Conclusiones

El área seleccionada como zona de estudio para implementar el balance de costos en celdas fotovoltaicas para cubrir una demanda específica fue el Parque Industrial Querétaro ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro.

Se generó un mapa de disponibilidad de energía solar (radiación) en la zona de estudio con un promedio de 5.91 kW/m², de igual forma se diseñó un mapa de temperatura media con un factor de 29.81 °C promedio día. Se preparó un compendio de las propiedades eléctricas – térmicas de 26 paneles fotovoltaicos de silicio con diferente cristalinidad. Se diseñó una superestructura de decisión que muestra las variables de mayor impacto a la hora de implementar una tecnología fotovoltaica como abastecedor de energía para una zona en específico en combinación con una fuente convencional.

El mejor panel fotovoltaico seleccionado para el estudio de caso es el del material monocristalino llamado M3, que es óptimo, lo que genera un beneficio

de costo de 89,879 USD con un tiempo de recuperación simple de 14 años con 7 meses, el ahorro global del periodo de vida útil del sistema eléctrico es de 988,669 USD. El panel M3 ha generado una reducción de 6,812.5 gCO₂ de emisiones en el año con un costo de remediación global de USD 21,289.96. El panel M3 seleccionado tiene un factor de relleno de 0.824, con una eficiencia del 19.9 %, con un factor de capacidad de 0.159. Cuanto mayor sea el límite de penetración en la red eléctrica, mayor será el costo beneficio, esto depende de las propiedades termoeléctricas de los paneles fotovoltaicos, para este caso el porcentaje de penetración que proporcionó la mejor solución es del 35%.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro, y en especial a la Facultad de Química por darnos la oportunidad de desarrollar el proyecto en sus instalaciones y hacer uso de sus equipos computacionales. En particular, se le agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Energía (SENER), por el apoyo financiero mediante la BECA nacional de posgrado que se dio para llevar a cabo el proyecto durante un período de dos años.

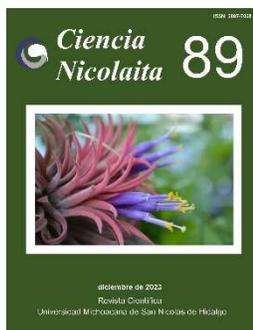
Referencias

- Acha, S., Mariaud, A., Shah, M., Markides, C.N., 2018, Optimal design and operation of distributed low-carbon energy technologies in commercial buildings, *Energy*, 142: 578-59. ISSN: 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.066>.
- Ackermann, T., Andersson, G., Söder, L., 2001, Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, 57(3): 195-204. ISSN 0378-7796. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8).
- Adefarati, T., Bansal, R.C., 2017, Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation, *Applied Energy*, 185: 158-171. ISSN: 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.087>.
- Conti, S., Rizzo, S.A., El-Saadany, E.F., Essam, M., Atwa, Y.M., 2014, Reliability assessment of distribution systems considering telecontrolled switches and microgrids, *IEEE Transactions on power systems*, 29(2): 598-607. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2287301>.



- Carpinelli, G., Rizzo, R., Caramia, P., Varilone, P., 2018, Taguchi's method for probabilistic three-phase power flow of unbalanced distribution systems with correlated Wind and Photovoltaic Generation Systems, *Renewable Energy*, 117: 227-241. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.048>.
- Cheng, Y., Sinha, A., Ghosh, V., Sengupta, T., Luo, H., 2021, Carbon tax and energy innovation at crossroads of carbon neutrality: Designing a sustainable decarbonization policy. *Journal of Environmental Management*, 294: 112957, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112957>.
- CRE, 2019, "Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética." Comisión de Energías, 1, 12 - 24 para: <http://www.cre.gob.mx/documento/3870.pdf>.
- Domínguez, H., 2012, Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el COBAEV 26 XALAPA: Msc Thesis, *Universidad Veracruzana*, 17-32.
- González-López, R., Giampietro, M., 2018, Relational analysis of the oil and gas sector of Mexico: Implications for Mexico's energy reform. *Energy*, 154: 403-414. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.134>.
- Haupt, S. E., Dettling, S., Williams, J.K., Pearson, J., Jensen, T., Brummet, T., Kosovic, B., Wiener, G., MacCandless, T., Burghardt, C., 2017, Blending distributed photovoltaic and demand load forecasts, *Solar Energy*, 157: 542-551. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.049>.
- Hussan, S.M, 2018, Design and implementation of a solar power system in rural Haiti: Msc Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*. 14-23.
- IEA, 2022, Unlocking the potential of distributed energy resources – power system opportunities and best practices. techreport, International Energy Agency – Energy Efficiency Division, May 2022. URL https://iea.blob.core.windows.net/assets/3520710cc8284001911cae78b645ce67/UnlockingthePotentialofDERs_Powersystemopportunitiesandbestpractices.pdf.
- Israel, L.M., 2010, La generación de energía eléctrica y el ambiente, *Gaceta Ecológica* 1(6): 02-09.
- Kommalapati, R., Kadiyala, A., Shahriar, M., Huque, Z., 2017, Review of the life cycle greenhouse gas emissions from different photovoltaic and concentrating solar power electricity generation systems. *Energies*, 10(3): 350, ISSN 1996-1073. <https://doi.org/10.3390/en10030350>
- Lara, C.L., Mallapragada, D., Papageorgiou, D., Venkatesh, A., Grossmann, I.E., 2017, Electric power Infrastructure Planning: Mixed-Integer Programming Model and Nested Decomposition Algorithm, *European of Operations Research*, 2: 1-35.
- Machida, S., Hirai, H., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Yagi, T., 2008, Structural changes of filled ice Ic structure for hydrogen hydrate under high pressure, *The Journal of Chemical Physics*, 129(22): 224-505. <https://doi.org/10.1063/1.3013440>.
- D. Nagpaland, B. Parajuli, Ferroukhi, R, 2019, Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: An opportunity not to be missed. techreport, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates
- Noreña, L. F. G., 2015, Diseño y operación de sistemas de distribución bajo un ambiente de redes inteligentes: Msc Thesis, *Universidad Tecnológica de Pereira*. 34 – 48.
- Arevalo, P.A.A., 2017, Impact of distributed generation and energy storage systems in electrical power distribution systems, *IPL technologies*, 12: 35 – 87.
- Rezaee Jordehi, A., 2016, Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 893-905. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.086>.
- Salim H.K., Stewart R.A., Sahin, O., Dudley M., 2019, Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 211:537–554, 2019. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>.
- Sánchez L., Echeverría, D., Wooders, P., Kuehne, K., Lean, T., Beaton C., Shama, S., Oharenko, Y., 2018, Improving and refocusing energy subsidies – options for optimization in Mexico. techreport, CONECC – BMU – SEMAR-NAT – SENER – International Institute for Sustainable Development – The German-Mexican Energy Partnership.
- Shivarama Krishna, K., Sathish Kumar K., 2018, Generation System Reliability Assessment Incorporating Photovoltaic Energy, *Advances in Power Systems and Energy Management*. 436: 647-654.

- Singh, B., Sharma J., 2017, A review on distributed generation planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 529-544. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>.
- Suarez, D. F. P., 2014, Diseño óptimo de sistemas de distribución: Tesis de Maestría, *Universidad Nacional de Colombia*. 148 – 153.
- Theo, W. L., Lim, J.S., Ho, W.S., Hashim, H., Lee, C.T., 2017, Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 531-573. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063>.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Violación de sabor en decaimientos raros del quark top en el modelo Bestest Little Higgs

Flavor violation on the rare decays of the top quark on the Bestest Little Higgs model

Jorge Isidro Aranda Sánchez, Tzihué Cisneros Pérez, María de los Ángeles Hernández Ruíz
y Eligio Cruz Albaro

Para citar este artículo: Aranda Sánchez Jorge Isidro, Cisneros Pérez Tzihué, Hernández Ruíz María de los Ángeles y Cruz Albaro Eligio, 2023. Violación de sabor en decaimientos raros del quark top en el modelo Bestest Little Higgs. Ciencia Nicolaita no. 89, 237-243. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.713>



Historial del artículo:

Recibido: 4 de abril de 2023

Aceptado: 13 de mayo de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: Jorge.isidro.aranda@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Violación de sabor en decaimientos raros del quark top en el modelo Bestest Little Higgs

Flavor violation on the rare decays of the top quark on the Bestest Little Higgs model

Jorge Isidro Aranda Sánchez¹, Tzihué Cisneros Pérez², María de los Ángeles Hernández Ruíz² y Eligio Cruz Albaro³

¹Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

²Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas.

³Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Resumen

En este trabajo, analizamos el efecto de la violación de sabor en los decaimientos raros del quark top a un lazo a través del modelo Bestest Little Higgs (BLH), para lo cual, incluimos un nuevo término de mezcla. Calculamos los procesos $t \rightarrow q_i V$ y $t \rightarrow q_i h^0$, donde $q_i = u, c$ son quarks ligeros y $V_i = Z, \gamma, g, h^0$, son bosones del Modelo Estándar (ME). Dichos procesos están mediados por los bosones pesados $W'^{\pm}, H^{\pm}, \phi^{\pm}$ y el bottom pesado B del BLH. Encontramos que los branching ratios (Br) tienen mayor sensibilidad a sus pares en el ME a excepción del gluón. Nuestros mejores resultados son $Br(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-6}$ y $Br(t \rightarrow ch^0) \sim 10^{-8}$, lo que proporciona indicios de nueva física.

Palabras clave: Violación de sabor, correcciones virtuales, partículas exóticas.

Abstract

In this report, we analyze the effect of flavor violation on the rare decays of the top quark to a one-loop through the Bestest Little Higgs (BLH) model, for which we include a new mixing term. We calculate the processes $t \rightarrow q_i V$ and $t \rightarrow q_i h^0$, where $q_i = u, c$ are light quarks and $V_i = Z, \gamma, g, h^0$, are Standard Model (SM) bosons. These processes are mediated by the heavy bosons $W'^{\pm}, H^{\pm}, \phi^{\pm}$ and the heavy bottom B of the BLH. We found that the branching ratios (Br) have a higher sensitivity than their peers in the EM except for the gluon. Our best results are $Br(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-6}$ y $Br(t \rightarrow ch^0) \sim 10^{-8}$, which provides hints of new physics.

Key words: Flavor-changing, virtual corrections, exotic particles.

Introducción

En la física de partículas, la investigación teórica y experimental adquirió un impulso mayor cuando se determinó en el año 2012 que se había detectado el bosón de Higgs en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN en inglés). Este bosón, cuya masa es de 125 GeV, se dio a conocer teóricamente en la década de 1960 mediante un procedimiento matemático llamado mecanismo de Higgs, el cual no solamente predecía la existencia de una nueva partícula dentro del ME sino que proporcionaba la masa para todas las partículas de dicho modelo. Las partículas del ME se dividen en seis leptones, como los electrones y neutrinos, y en seis quarks como el top (t) y el bottom (b). Precisamente, el quark top es la partícula más masiva del ME con una masa de 173 GeV aproximadamente, y esta propiedad es lo que, teóricamente, nos permitiría encontrar conexiones con hipotéticas partículas más pesadas, lo cual implicaría nueva física en alguna posible extensión del ME.

En el CERN existen experimentos orientados a encontrar señales de esas nuevas partículas más grandes, pero hasta ahora no se han tenido los suficientes indicios a nivel estadístico para asegurar que esos datos recopilados durante varios años sean nuevas partículas. Muchas personas a nivel mundial están dedicados a la búsqueda teórica de modelos que puedan explicar los resultados experimentales. Desde el inicio de la física de partículas, siempre se han propuesto modelos que explican ciertos fenómenos novedosos, algunos han tenido éxito y otros no. Una de las principales tendencias desde principios de la década del 2000, ha sido el estudio de los modelos del pequeño Higgs (Schmaltz, 2005) donde se implementan diferentes partículas hipotéticas utilizando el mecanismo de Higgs que también incluyen ideas para resolver el problema de la jerarquía de masas y la violación de sabor (Hong-Sheng, 2007). En este último tema, dedicamos nuestro esfuerzo en este artículo para establecer la violación de sabor en el modelo Bestest Little Higgs (BLH; Schmaltz, 2010) o del mejor pequeño Higgs. Este modelo contiene todas las características de sus antecesores y mejora otras, como un procedimiento para derivar las masas de los nuevos bosones y un enfoque más fuerte en el sector de los nuevos quarks, ya que son los embajadores de la nueva física.

El BLH, originalmente, no contaba con un sector de mezcla entre los nuevos quarks pesados y las primeras dos generaciones de quarks del ME, por lo que propusimos una extensión para obtenerlo. De esta manera, hemos llegado a resultados favorables en el cálculo de los respectivos Branching ratios (Br) o radios de ramaje, por medio de los cuales obtenemos una medida cuantitativa del radio entre las anchuras de los decaimientos raros del quark top respecto a la anchura del decaimiento $t \rightarrow bW$. Nuestros resultados superan en sensibilidad a los mismos resultados teóricos del ME (Aguilar-Saavedra, 2004). También es importante señalar que los datos experimentales (Aad, 2022; Particle Data Group, 2022) sobre estos procesos, aún están muy lejanos de los indicados por el ME, pero muy cercanos a los del modelo BLH.

El modelo Bestest Little Higgs

El modelo BLH está construido sobre el producto de dos grupos: $SO(6)_A \times SO(6)_B$. Estos grupos contienen la información sobre todas las partículas y campos tanto del modelo BLH como del ME. Se propone un campo sigma no lineal Σ que al adquirir un valor de expectación del vacío (vev): $\langle \Sigma \rangle = 1$, provoca que el grupo $SO(6)_A \times SO(6)_B$ se rompa o degrade hacia el grupo diagonal $SU(6)_V$. El campo Σ contiene los campos escalares (ϕ_i, η_i) donde $i = 1, 2, 3$, el campo escalar h_j donde $j = 1, 2$ y el campo escalar real σ cuya principal función es contrarrestar la generación de divergencias en el sector escalar del modelo. Después del Rompimiento Espontáneo de Simetría Electrodébil (RESE) en los diferentes sectores del modelo BLH, se obtienen las masas de las nuevas partículas, tanto fermiones como bosones. Los nuevos quarks pesados considerados en el BLH son: $T, T^5, T^6, T^{23}, T^{53}, B$. Los nuevos bosones en el BLH son: $W'^{\pm}, H^{\pm}, \phi^{\pm}, \eta^{\pm}, A^0, H^0, \sigma$. Este modelo no considera nuevos leptones, sólo se dejan los del ME. Las masas generadas por el mecanismo de Higgs para los quarks están dadas en términos de los acoplamientos de Yukawa y_1, y_2, y_3 , al igual que en el ME, y de la primera escala de rompimiento f . En el modelo BLH el campo Σ se rompe a la escala f que en este artículo es de magnitud 1 TeV, esto es equivalente a la escala del RESE del ME, $v = 246$ GeV. Además del campo sigma, nuestro modelo requiere otro campo no lineal delta Δ el cual se rompe

a la escala $F = 3 \text{ TeV}$, de tal forma que se mantiene la relación $f < F$. La escala F interviene en la generación de las masas de algunos de los nuevos bosones. También se establecen algunas constantes que dependen del espacio de parámetros elegido como β que representa el ángulo de mezcla entre los valores de expectación de los campos escalares h_1 y h_2 , y α que representa el ángulo de mezcla entre el bosón de Higgs del ME, h^0 y el Higgs del BLH, H^0 . Otra constante muy importante es Ψ , la cual mide el nivel de ajuste fino que se debe hacer para evitar desestabilizar la escala Electro débil.

Fenomenología de los decaimientos raros del quark top en el BLH

Debido a que originalmente el modelo BLH no contenía un sector de mezcla entre los quarks pesados y los quarks ligeros del ME (Schmaltz, 2010), debimos incluir este sector y, de esta manera, provocar la violación de sabor. Al hacer una extensión a nuestro modelo, lo hicimos de tal forma que no se alteraran las simetrías ni otras propiedades que se deben cumplir. En el ME la violación de sabor se mide y parametriza mediante la matriz CKM (Kobayashi, 1973)

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde los elementos de matriz V_{ij} son una medida de la transición entre el quark i hacia el quark j . En el

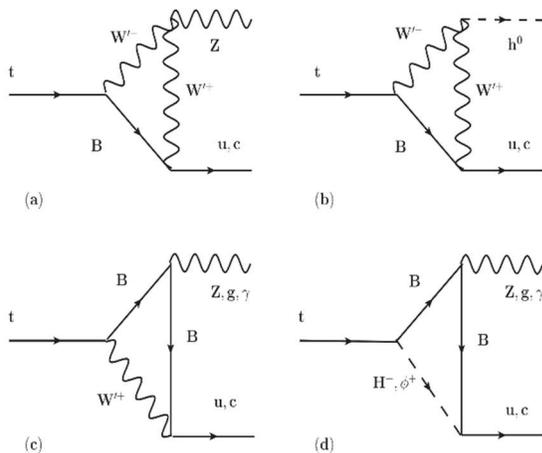


Figura 1. Diagramas de Feynman.

modelo BLH se puede construir una matriz semejante con la siguiente ecuación (Blanke *et al.*, 2007):

$$V_{CKM} = V_{Hu}^\dagger V_{Hd} \quad (2)$$

Donde la matriz V_{Hu} mide la transición de los quarks pesados hacia los quarks del tipo up y la matriz V_{Hd} mide la transición de los quarks pesados hacia los quarks del tipo down, ambas matrices son unitarias al igual que la matriz CKM. Teóricamente, debemos utilizar las reglas de Feynman para incluir los coeficientes V_{ij} y hacer los cálculos correspondientes. En el ME sólo se pueden tener cambios de sabor en el sector de los quarks mediante la interacción débil y dos de sus tres portadores, los bosones W^+ y W^- . En el modelo BLH existen cuatro bosones portadores de la interacción débil que pueden mediar el cambio de sabor: $W'^{\pm}, H^{\pm}, \phi^{\pm}, \eta^{\pm}$, el primero de carácter vectorial y los restantes tres de tipo escalar. En el caso de los decaimientos raros que calculamos en este artículo, solamente usamos como mediadores los primeros tres bosones: $W'^{\pm}, H^{\pm}, \phi^{\pm}$, debido a que el campo η^{\pm} presentaba contribuciones nulas a los cambios de sabor estudiados. En la extensión que hicimos al modelo BLH procuramos llevarlo a cabo evitando generar interacciones con los quarks pesados del tipo up, por lo que solamente construimos la interacción con el quark B que es el de tipo down dentro del BLH. Para calcular los decaimientos raros del quark top: $t \rightarrow q_i V$ y $t \rightarrow q_i h^0$, donde $q_i = u, c$ son quarks ligeros y $V_i = Z, \gamma, g, h^0$, necesitamos guiarnos por los diagramas de Feynman correspondientes mostrados en la Fig. 1 y la Fig. 2.

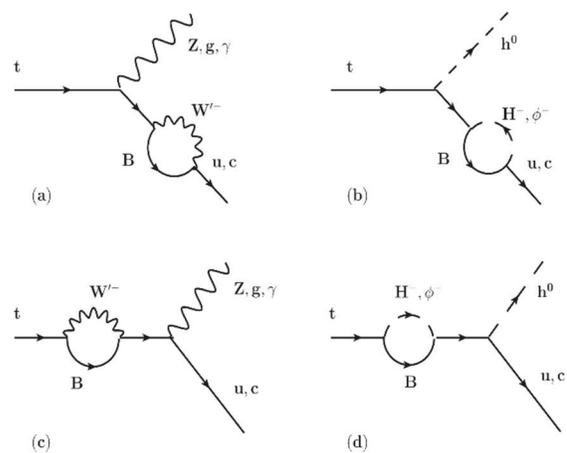


Figura 2. Diagramas de Feynman.

**Tabla 1**

Br's de los decaimientos raros del quark top en el Modelo Estándar.

Decaimiento	Br teórico ME
$t \rightarrow uZ$	8×10^{-17}
$t \rightarrow u\gamma$	3.7×10^{-16}
$t \rightarrow ug$	3.7×10^{-14}
$t \rightarrow uh^0$	2×10^{-17}
$t \rightarrow cZ$	1×10^{-14}
$t \rightarrow c\gamma$	4.6×10^{-14}
$t \rightarrow cg$	4.6×10^{-14}
$t \rightarrow ch^0$	3×10^{-15}

Tabla 2

Br's de los decaimientos raros del quark top en el Modelo Estándar.

Decaimiento	Br experimental
$t \rightarrow qZ$	8×10^{-4}
$t \rightarrow q\gamma$	3.7×10^{-4}
$t \rightarrow ug$	3.7×10^{-4}
$t \rightarrow uh^0$	2×10^{-4}
$t \rightarrow cg$	4.6×10^{-3}
$t \rightarrow ch^0$	3×10^{-3}

Tabla 3

Br's de los decaimientos raros del quark top en el Modelo Estándar.

Decaimiento	Br	
	f=1000 GeV	f=3000 GeV
$t \rightarrow uZ$	3.5×10^{-10}	3.0×10^{-11}
$t \rightarrow u\gamma$	2.5×10^{-11}	2.2×10^{-12}
$t \rightarrow ug$	4.0×10^{-17}	4.2×10^{-20}
$t \rightarrow uh^0$	8.2×10^{-13}	5.9×10^{-15}
$t \rightarrow cZ$	3.7×10^{-5}	3.1×10^{-6}
$t \rightarrow c\gamma$	2.6×10^{-6}	2.3×10^{-8}
$t \rightarrow cg$	4.2×10^{-13}	4.5×10^{-16}
$t \rightarrow ch^0$	8.5×10^{-8}	6.2×10^{-11}

A partir de estos diagramas, se obtienen 36 amplitudes que se deben evaluar con software especializado, ya que es muy complicado hacerlo manualmente. Después, se debe hacer un producto de cada amplitud con su conjugado complejo o "cuadrar las amplitudes" para finalmente obtener las anchuras de cada decaimiento y después los Br.

Resultados numéricos

Dentro del ME, se han calculado teóricamente los Br de los decaimientos raros que nosotros calculamos en el modelo BLH. En el ME se obtienen medidas muy suprimidas debido al mecanismo de GIM que elimina automáticamente las aportaciones de los elementos de la matriz V_{ij} cuando se da una suma de ciertas combinaciones especiales de esos elementos de la matriz CKM. En la Tabla 1 mostramos los Br calculados en el Modelo Estándar. Se puede ver que el orden de sensibilidad va de 10^{-17} a 10^{-14} . En la Tabla 2 mostramos

las mediciones experimentales más recientes. Experimentalmente, la sensibilidad en los detectores se encuentra muy lejos del orden que predice el ME, pero un modelo como el BLH nos proporciona órdenes muy cercanos a los que se pueden obtener experimentalmente, como se muestra en la Tabla 3.

Observamos que los mejores resultados que nos ofrece el modelo BLH son $Br(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-6}$ y $Br(t \rightarrow ch^0) \sim 10^{-9}$. Los peores resultados son en los que interviene el gluón, ya que las reglas de Feynman para este bosón son las mismas que en el ME, lo que limita las contribuciones del modelo BLH. Se han hecho estos mismos decaimientos raros del quark top en otros modelos del tipo Little Higgs (Hong-Sheng, 2007) donde se han obtenido branching ratios hasta del orden 10^{-2} sobrepasando los datos experimentales de la Tabla 2, sin embargo, en la práctica no se ha medido nada, ni siquiera a un orden de 10^{-4} .

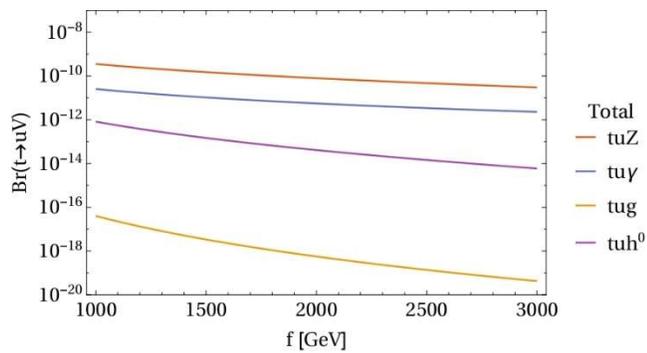


Figura 3. Branching ratios de los decaimientos del top hacia el up y un bosón.

En las figuras 3 y 4 presentamos los decaimientos del quark top (t) hacia un quark up (u) y un quark charm (c) en función de la escala de rompimiento f , entre 1000 GeV y 3000 GeV. Los campos virtuales fueron los bosones W'^{\pm} , H^{\pm} , ϕ^{\pm} y el quark pesado (B) del modelo BLH.

Conclusiones

El modelo BLH resulta innovador, tanto en su estructura matemática como en los resultados numéricos que nos puede ofrecer, en procesos tan relevantes y raros como el decaimiento del quark top a un quark con diferente sabor como el up o el charm. La violación de sabor se parametrizó mediante las matrices V_{Hw} , V_{Hd} y observamos su influencia en un decaimiento con el cálculo del branching ratio. El mejor Br que obtuvimos fue el del proceso $t \rightarrow cZ$ de orden 10^{-6} que nos habla sobre la posibilidad de que el modelo BLH, a mediano plazo, sea capaz de coincidir con los resultados que arrojen los futuros dispositivos experimentales. El modelo BLH con la extensión propuesta en este artículo, en el sector de violación de sabor, abre varias líneas de investigación en múltiples temas relacionados como la violación CP y la violación de sabor en los leptones. De esta manera, hemos mostrado un punto de partida para superar los primeros modelos del tipo Little Higgs cuyas predicciones casi han quedado obsoletas ante los avances experimentales más recientes.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por una beca Postdoctoral de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

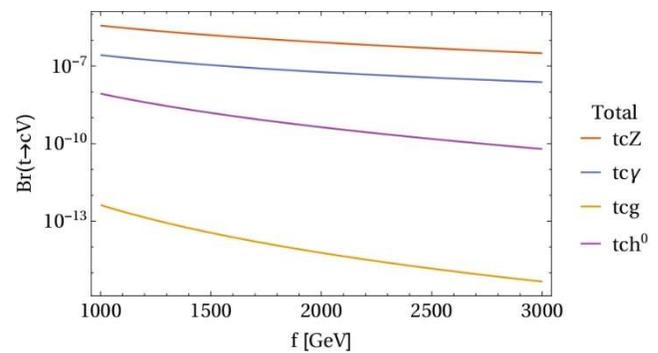


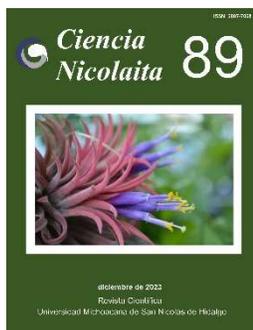
Figura 4. Branching ratios de los decaimientos del top hacia el charm y un bosón.

Bibliografía

- Aad, G., Abbott, B., Abbott, D. C. et al., 2022, Search for flavour-changing neutral-current interactions of a top quark and a gluon in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector. *Eur. Phys. J. C.*, 82: 334. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10182-7>.
- Aguilar-Saavedra, J., 2004, Top flavour-changing neutral interactions: theoretical expectations and experimental detection. *Acta Phys. Pol. B*, 2695.
- Aranda, J. I., Cisneros-Pérez, T., Cruz-Albaro, E., Montañó-Domínguez, J., Ramírez-Zavaleta, F., 2021, Chromomagnetic dipole moment of the top quark in the Bestest Little Higgs model. *arXiv preprint arXiv:2111.03180*.
- Blanke, M., Buras, A. J., Poschenrieder, A., Recksiegel, S., Tarantino, C., Uhlig, S., & Weiler, A., 2007, Another look at the flavour structure of the Littlest Higgs model with T-parity. *Physics Letters B*, 646(5-6): 253-257.
- Cruz-Albaro, E., Gutiérrez-Rodríguez, A., 2022, Sensitivity limits on the weak dipole moments of the top-quark at the Bestest Little Higgs Model. *arXiv preprint arXiv:2202.12738*.
- Cruz-Albaro, E., Gutiérrez-Rodríguez, A., Hernández-Ruiz, M. A., Cisneros-Pérez, T., 2023, Searching the anomalous electromagnetic and weak dipole moments of the top-quark at the Bestest Little Higgs Model. *arXiv preprint arXiv:2302.11143*.
- Glashow, S. L., Iliopoulos, J., Maiani L., 1970, Weak interactions with lepton-hadron symmetry. *Physical Review D*. 2(7): 1285-1292. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.2.1285>.
- Godfrey, S., Grégoire, T., Kalyniak, P. et al., 2012 Exploring the heavy quark sector of the Bestest Little Higgs model at the LHC. *Journal of High Energy Physics*, 32 (2012). [https://doi.org/10.1007/JHEP04\(2012\)032](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2012)032).



- Han, J., Yang B., Li J., 2016, Revisiting rare top quark decays in the littlest Higgs Model with T-parity. *International Journal of Modern Physics A*, 31(32): 1650165. doi:10.1142/S0217751X16501657.
- Hong-Sheng, 2007, Flavor-changing top quark rare decays in the littlest Higgs model with T-parity. *Physical Review D*, 75(9). doi:10.1103/physrevd.75.094010.
- Kalyniak, P., Moats, K., & Martin, T. A. W. (2015). Constraining the Little Higgs model of Schmaltz, Stolarski, and Thaler with recent results from the LHC. *Physical Review D*, 91(1). doi:10.1103/physrevd.91.013010.
- Kobayashi, M., Maskawa, T., 1973, CP-Violation in the renormalizable theory of weak interaction. *Progress of Theoretical Physics*, 49(2): 652–657. doi:10.1143/ptp.49.652.
- Martin, T. A. W., 2012, Examining extra neutral gauge bosons in non-universal models and exploring the phenomenology of the Bestest Little Higgs model at the LHC. PhD Thesis, Carleton University Ottawa, Ontario, Canada.
- Martin, T. A. W., de la Puente, A. (2013). Darkening the little Higgs. *Physics Letters B*, 727(4-5): 443–447. doi:10.1016/j.physletb.2013.10.060.
- Particle Data Group, 2022, Progress of theoretical and experimental physics. *Review of Particle Physics*. 20(8): 083C01. doi:10.1093/ptep/ptaa104.
- Schmaltz, M., Stolarski, D., Thaler, J. (2010). The bestest little Higgs. *Journal of High Energy Physics*, 2010(9). doi:10.1007/jhep09(2010)018.
- Schmaltz, M., Tucker-Smith, D., 2005, LITTLE HIGGS THEORIES. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 55(1): 229–270. doi:10.1146/annurev.nucl.55.090704.151502.



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

El uso de la inteligencia artificial en un entorno académico

The use of artificial intelligence in an academic environment

Luisa Fernanda González Ramírez, Edgar Lenymirko Moreno Goytia y Liliana Márquez Benavides*

Para citar este artículo: González Ramírez Luisa Fernanda, Moreno Goytia Edgar Lenymirko y Márquez Benavides Liliana, 2023. El uso de la inteligencia artificial en un entorno académico. Ciencia Nicolaita no. 89, 244-255. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.721>



Historial del artículo:

Recibido: 19 de mayo de 2023

Aceptado: 3 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: liliana.marquez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



El uso de la inteligencia artificial en un entorno académico

The use of artificial intelligence in an academic environment

Luisa Fernanda González Ramírez¹, Edgar Lenymirko Moreno Goytia² y Liliana Márquez Benavides*³

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

²Posgrado en Ingeniería Eléctrica, TecNM-Instituto Tecnológico de Morelia, México.

³Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Resumen

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la informática enfocada en la creación de máquinas inteligentes capaces de emular la inteligencia, el comportamiento y el aprendizaje humano. La comunidad académica no ha permanecido indiferente al encanto de la IA, por lo que el propósito de este trabajo es analizar las implicaciones de su uso en entornos académicos. La IA, como herramienta, tiene el potencial de acelerar los descubrimientos científicos, abrir puertas de conocimiento y facilitar los avances en varios campos de estudio. Las universidades públicas pueden aprovechar la IA para mejorar sus capacidades de investigación y personalizar la educación con un relativo bajo costo, aunque debe quedar claro que esta herramienta es una ayuda, mas no un sustituto de los recursos humanos especializados.

Palabras clave: Inteligencia artificial; educación, academia.

Abstract

Artificial intelligence (AI) is a branch of computer science focused on creating intelligent machines capable of emulating human intelligence, behavior, and learning. The academic community has not remained indifferent to the allure of AI, so the purpose of this paper is to analyze the implications of its use in academic settings. AI, as a tool, has the potential to accelerate scientific discoveries, open doors of knowledge, and facilitate advances in various fields of study. Public universities can harness the power of AI to enhance their research capabilities and personalize education at a relatively low cost, although it should be clear that this tool is an aid, not a substitute for specialized human resources.

Keywords: Artificial intelligence; education, academia.

Introducción

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la informática que se enfoca en la creación de máquinas capaces de simular la inteligencia y el comportamiento humanos (Moreno, 2019). Esta ha sido una parte activa de importantes avances en el aprendizaje automático, el procesamiento del lenguaje natural, la visión artificial y la robótica, y ha experimentado avances notables en los últimos años, revolucionando varios sectores e industrias (Fig. 1). Estos avances han despertado un inmenso interés y entusiasmo en torno a las posibles aplicaciones de la IA en múltiples dominios del conocimiento.

Las instituciones educativas, los investigadores y los educadores exploran cada día con mayor profundidad la integración de las tecnologías de IA en sus prácticas para mejorar y ampliar sus actividades, por su potencial para transformar los enfoques académicos tradicionales y abrir nuevas posibilidades para el descubrimiento y la educación personalizada (Ahmad *et al.*, 2022; UNESCO, 2021) El objetivo de este trabajo es analizar las implicaciones de la IA en entornos

académicos, incluyendo beneficios, desafíos y consideraciones éticas.

Beneficios de la IA en la academia

Capacidades de investigación mejoradas

Análisis de datos automatizado y reconocimiento de patrones

Uno de los beneficios más significativos de integrar la IA en la academia es la capacidad de automatizar el análisis de datos y el reconocimiento de patrones con un desempeño superior a las técnicas convencionales. Las metodologías de investigación tradicionales, a menudo implican el procesamiento manual de datos, lo que puede llevar mucho tiempo y estar propenso a errores humanos. En cambio, con la IA, se pueden aprovechar algoritmos avanzados para automatizar los procesos de análisis, obteniéndose resultados de forma más rápida y precisa (Ahmad *et al.*, 2022; Estrada Zarazua, 2023).

Los sistemas de análisis impulsados por IA pueden procesar de manera eficiente cantidades enormes de datos, extrayendo información relevante e identificando patrones que pueden no ser evidentes para el

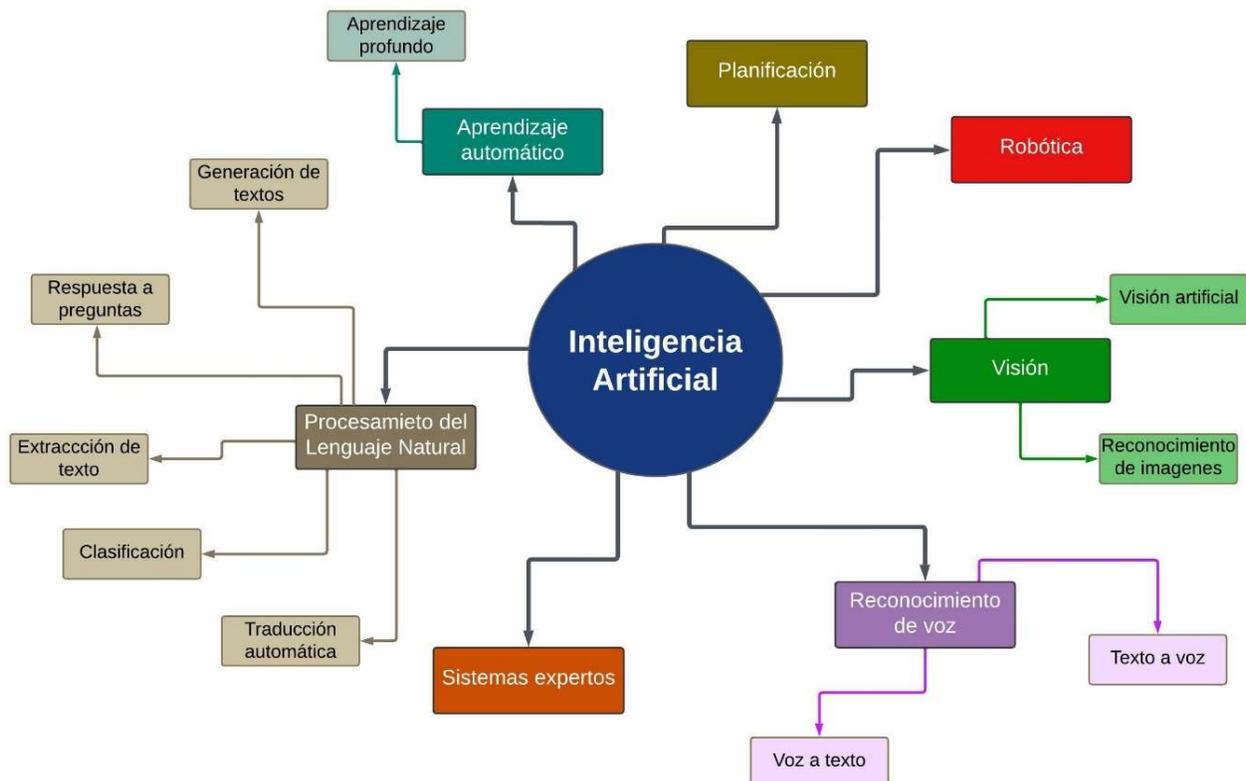


Figura 1. Esquema de los componentes que integran la Inteligencia Artificial. Fuente: Elaboración propia.



entrenamiento humano. Esta capacidad es particularmente valiosa en disciplinas como la genómica, la climatología y las ciencias sociales, permitiendo descubrir correlaciones y tendencias, lo que conlleva nuevos hallazgos, soportados por información más sólida y completa. Algunos ejemplos de estos sistemas son: Polymer Atlas.ti, MonkeyLearn, Microsoft Power BI, Sisense, Splunk, Tableau Public, Obviously AI, BigML, Deep Talkpor, solo por mencionar algunos (Williamson, 2017; Soria *et al.*, 2023).

Aceleramiento del avance científico

La IA tiene el potencial y la capacidad de acelerar los avances científicos y facilitar los avances en varios campos de estudio, ya que, al aprovechar los algoritmos de aprendizaje automático, es factible analizar grandes cantidades de literatura científica, patentes y

reportes, en una fracción del tiempo que tomaría sin el uso de dichas herramientas. Así, se pueden identificar publicaciones relevantes, extraer información clave y establecer conexiones entre diferentes estudios (Krenn *et al.*, 2022; Cioffi *et al.*, 2020). La IA también puede contribuir al planteamiento de nuevas hipótesis, considerando que los algoritmos identifican patrones, anomalías y asociaciones novedosas, contribuyendo a la innovación. El acceso a las plataformas puede ser gratuito o mediante pago por el usuario (**Tabla 1**).

Tabla 1
Ejemplos de plataformas de IA disponibles

Nombre	Propósito	Tipo de acceso	
		De paga	Libre
Análisis de datos			
Polymer Search https://www.polymersearch.com/	Análisis de datos mediante archivos de cálculo	✓	✓
Atlas.ti	Software de IA para análisis de datos	✓	✓
MonkeyLearn https://monkeylearn.com/	Análisis de datos para visualizar y organizar datos, brinda aprendizaje automático		✓
Microsoft Power BI https://powerbi.microsoft.com/es-mx/	Análisis de datos empresariales	✓	✓
Tableau https://www.tableau.com/solutions/ai-analytics	Análisis y visualización de datos		✓
Obviously AI https://www.obviously.ai/	Análisis de datos a partir de archivos CSV, incluye respuestas a preguntas directas		✓
BigML https://bigml.com/	Aprendizaje automático a través de la IA	✓	✓
Deep Talk https://www.deep-talk.ai/	Análisis, clasificación, categorización de datos a partir de su extracción en: Hubspot, zendesk, Gmail	✓	✓

Tabla 1. Cont.

Nombre	Propósito	Tipo de acceso	
		De paga	Libre
Generación de texto			
Chat GPT https://openai.com/blog/chatgpt	Generación de texto en respuesta a preguntas o conversaciones	✓	✓
Smodin Author https://smodin.io/es/escritor	Generador de textos largos: ensayos, libros, artículos, manuscritos, manuales, etc.	✓	✓
Meet Bard https://bard.google.com/?hl=en	Generador de texto en respuesta a preguntas/ conversaciones	✓	
Generación de imágenes o video			
Hotpot https://hotpot.ai/	Generación de imágenes a base de texto descriptivo		✓
BlueWillow https://www.bluewillow.ai/	Generación de imágenes a base de texto descriptivo	✓	
Stability AI https://stability.ai/	Generación de imágenes a base de texto descriptivo	No indica si es de acceso libre o de paga	
Fliki https://fliki.ai/	Generación de audio y video con voz de IA, a partir de la introducción de texto o PPT	✓	✓
InVideo https://invideo.io/	Generación de audio y video con voz de IA, a partir de la introducción de texto	✓	✓
Elai https://elai.io/	Generación de audio y video con voz de IA, a partir de la introducción de texto, creación de avatares digitalizados.	✓	✓
Synthesia https://www.synthesia.io/	Generación de audio y video con voz de IA, a partir de la introducción de texto, creación de avatares digitalizados.		✓

Simulaciones y modelos basados en IA para problemas complejos

Los problemas complejos regularmente requieren simulaciones y modelos para obtener una comprensión más profunda de sus mecanismos subyacentes. La capacidad de los algoritmos de IA para procesar grandes conjuntos de datos y simular sistemas, permite probar hipótesis, realizar experimentos virtuales y analizar comportamientos. Por ejemplo, en física, la

IA se puede utilizar para simular el comportamiento de las partículas en colisiones de alta energía, lo que proporciona información valiosa sobre las interacciones fundamentales de las partículas. En las ciencias sociales, las simulaciones impulsadas por IA pueden modelar la dinámica de las poblaciones, lo que facilita el estudio de situaciones difíciles de predecir, como la propagación de enfermedades o comportamientos colectivos (Lareyre *et al.*, 2023; Tanwar *et al.*, 2022).



Al aprovechar el poder de las simulaciones y el modelado impulsados por IA, es posible explorar escenarios que serían poco prácticos o imposibles de estudiar directamente, con una comprensión más profunda, por lo que la integración de la IA en un entorno académico mejora las capacidades de investigación de múltiples formas.

Aprendizaje personalizado y educación adaptativa

Sistemas de tutoría inteligente y retroalimentación personalizada

La inteligencia artificial puede revolucionar la forma en que se imparte la educación, al proporcionar experiencias de aprendizaje personalizadas, a través de sistemas de tutoría inteligentes. Estos sistemas, aprovechan los algoritmos de IA para evaluar las fortalezas, debilidades y preferencias de aprendizaje de cada estudiante. Al analizar su aprovechamiento, se identifican áreas en que se tienen dificultades y se adaptan los materiales y procesos de instrucción (Rodríguez Chávez, 2021; Sedlmeier, 2001; Ahmad *et al.*, 2022).

Los sistemas de tutoría inteligentes pueden proporcionar comentarios personalizados a los estudiantes, guiándolos a través de su aprendizaje, analizar sus respuestas, identificar conceptos erróneos y ofrecer explicaciones y soluciones específicas. Este enfoque personalizado mejora la comprensión y permite progresar a ritmo propio y concentrarse en las áreas en las que se necesita apoyo adicional (Sánchez, Cabrera y Martínez, 2016; UNESCO, 2021).

Plataformas de aprendizaje adaptativo para instrucción individualizada

Las plataformas de aprendizaje adaptativo utilizan análisis de datos para evaluar el desempeño de los estudiantes, rastrear patrones de aprendizaje e identificar áreas de fortaleza y debilidad. Según este análisis, los algoritmos pueden ajustar dinámicamente la dificultad, el ritmo y el contenido de los materiales de aprendizaje, por lo que los usuarios reciben contenido y actividades específicas que se alinean con sus niveles de competencia, lo que garantiza una experiencia de aprendizaje óptima (Alam, 2022; Jia y Yu, 2017; UNESCO, 2021).

Asimismo, las plataformas de aprendizaje adaptativo pueden ofrecer recomendaciones personalizadas para recursos complementarios, ejercicios de práctica

adicionales o materiales de enriquecimiento basados en el rendimiento y las preferencias individuales de los estudiantes. Este enfoque personalizado promueve el aprendizaje autodirigido y el empoderamiento en el trayecto educativo.

Impacto en las actividades humanas

Desplazamiento y cambio en la dinámica laboral

La integración de la IA plantea preocupaciones sobre el posible desplazamiento laboral y la evolución de la dinámica laboral. Las tecnologías de IA, como los sistemas de calificación automatizada, los sistemas de tutoría inteligente y los chatbots, tienen el potencial de independizar ciertas tareas, realizadas tradicionalmente por seres humanos. Como resultado, puede haber un cambio en el papel y responsabilidad que tienen los profesores o tutores. Además, la automatización de las tareas administrativas puede reducir la necesidad de personal de apoyo en áreas como la programación, el mantenimiento de registros y la gestión de datos. A medida que el ámbito académico se adapta a la IA, es esencial anticiparse a estos cambios, mediante una planificación cuidadosa y el desarrollo de nuevas habilidades para garantizar armonización en la eficacia, progreso e innovación en las tareas asignadas.

Actualización de competencias de los profesionales académicos

La integración de la IA en el ámbito académico requiere centrarse en aprender nuevas habilidades y actualizar las competencias de los profesionales académicos para adaptarse al panorama cambiante. A medida que la IA asume ciertas tareas rutinarias, hay una demanda creciente de experiencia humana en áreas que requieren toma de decisiones complejas, pensamiento crítico y creatividad (Garrell y Guilera, 2019; UNESCO, 2021).

Los profesionales académicos requieren adquirir nuevas habilidades y competencias para colaborar de manera efectiva con los sistemas de IA y aprovechar sus capacidades. Por ejemplo, los profesores deberían estar calificados para diseñar experiencias de aprendizaje respaldadas por IA, así como en el análisis de datos para incorporar nuevas actividades formativas. En el caso de los administradores, se requiere capacitación en gestión y análisis de datos impulsados por IA para tomar decisiones informadas (Ahmad *et al.*,

2022, Ng *et al.*, 2023). Para apoyar en lo anterior, las instituciones deben establecer programas de capacitación, talleres e iniciativas de desarrollo, que conduzcan a las habilidades necesarias de su personal, para que sigan siendo valiosos en el proceso enseñanza-aprendizaje.

Creatividad y pensamiento crítico impulsados por la IA

Si bien la IA sobresale en el análisis de datos, el reconocimiento de patrones y la automatización, aún resulta difícil replicar aspectos de la inteligencia humana, tales como la creatividad y el pensamiento crítico, por lo que su integración en el ámbito académico debe considerar la preservación de las habilidades y cualidades centradas en los seres humanos que son fundamentales para la innovación, la resolución de problemas y el avance del conocimiento, actividades fundamentales, por ejemplo, en una plantilla universitaria (Jiang *et al.*, 2022; Creely, 2022).

La creatividad desempeña un papel crucial en campos como las artes, las humanidades y las ciencias sociales, por lo tanto, la capacidad de pensar de manera crítica, formar perspectivas únicas y establecer conexiones entre diferentes áreas, es esencial para avanzar en estas disciplinas. Una combinación de elementos permitiría encontrar un equilibrio entre las tecnologías de IA para mejorar la eficiencia y preservar el pensamiento humano en el ámbito académico (Kim *et al.*, 2022; Kalpokiene y Kalpokas, 2023).

En un entorno impulsado por la IA, las instituciones académicas pueden fomentar la colaboración interdisciplinaria, la creatividad y el pensamiento crítico. Esto incluye brindar oportunidades para proyectos abiertos, discusiones y debates que estimulen la curiosidad y desafíen las normas establecidas. Al mantener un enfoque centrado en los seres humanos, el ámbito académico puede garantizar que la IA complemente y mejore dichas capacidades en lugar de reemplazarlas.

Obstáculos de integración y adopción

Desafíos técnicos y limitaciones de la implementación de IA

La integración de la inteligencia artificial (IA) en el ámbito académico enfrenta diversos desafíos técnicos y limitaciones que deben ser abordados. Los sistemas de IA a menudo requieren una potencia informática

considerable, capacidad de almacenamiento y una infraestructura avanzada para funcionar de manera óptima (Ng *et al.*, 2023; UNESCO, 2021).

Las instituciones educativas pueden enfrentar desafíos en cuanto a los requisitos de hardware, compatibilidad de software e infraestructura de red para respaldar la implementación de IA. Los algoritmos deben adaptarse y entrenarse para dominios específicos, lo cual requiere tiempo, experiencia y disponibilidad de información, que puede estar sujeta a restricciones de privacidad (Kooli, 2023).

Los algoritmos pueden tener limitaciones inherentes en ciertos contextos. Por ejemplo, en campos que dependen en gran medida de juicios subjetivos o comprensión matizada, como las humanidades y las ciencias sociales, se presentan dificultades para replicar con precisión las capacidades humanas. Es crucial reconocer las fortalezas y limitaciones de la IA porque no es la solución total, sino una prominente ayuda.

Resistencia al cambio y barreras culturales

La integración de la IA en el ámbito académico puede enfrentar resistencia al cambio y barreras culturales. Las instituciones académicas a menudo tienen prácticas establecidas, y tradiciones que pueden resistirse en la adopción de nuevas tecnologías. El profesorado, el personal y los estudiantes pueden mostrarse reacios a la IA debido a preocupaciones sobre la seguridad laboral, la devaluación de la experiencia humana o la percepción de una pérdida de interacción personal (Celik *et al.*, 2022; Pisica *et al.*, 2023). Para superar estas barreras, es importante involucrar a los actores y abordar sus inquietudes a través de una comunicación transparente y la colaboración. Crear una cultura de innovación y fomentar una comprensión compartida de los beneficios potenciales de la IA, puede ayudar a mitigar la resistencia. Proporcionar capacitación y apoyo al profesorado y al personal para que desarrollen familiaridad y confianza en el trabajo con tecnologías de IA también puede promover la aceptación y adopción de esta tecnología.

Limitaciones de recursos y problemas de asequibilidad

La implementación de tecnologías de IA a menudo requiere una inversión financiera considerable, que incluye la adquisición de hardware, licencias de soft-

ware y la contratación o capacitación de personal especializado. Las instituciones académicas pequeñas o con recursos limitados pueden enfrentar dificultades para asignar recursos a iniciativas de IA, lo que limita su capacidad para aprovechar plenamente el potencial que ofrece, al respecto, se pueden fomentar asociaciones con la industria, el gobierno u otras organizaciones para compartir recursos y conocimientos.

Las herramientas y plataformas de IA de código abierto pueden proporcionar alternativas rentables, permitiendo que las instituciones con presupuestos limitados aprovechen las tecnologías. La búsqueda de financiamiento externo a través de subvenciones o colaboraciones en proyectos de investigación, puede ayudar a aliviar las limitaciones financieras y respaldar la integración de la IA en el ámbito académico.

Consideraciones éticas en el uso de la inteligencia artificial

Este es un aspecto muy importante en el ámbito académico y de la investigación, que genera muchas preguntas y cuestionamientos. Por ejemplo, cuando se utiliza IA para redactar un artículo científico, surge la pregunta de quién debe recibir el reconocimiento y la autoría del trabajo. ¿Debería ser el investigador que supervisa el proceso, el desarrollador del algoritmo o ambos?. Es importante establecer pautas claras para atribuir la autoría adecuadamente.

La IA es a menudo considerada una "caja negra", lo que significa que los procesos internos y la lógica detrás de las decisiones tomadas por el algoritmo, pueden ser difíciles de comprender para el usuario convencional. Esto puede plantear preocupaciones éticas, especialmente en el contexto de la redacción de textos científicos, donde la transparencia y la profundidad de análisis son fundamentales para la revisión por pares y el entendimiento por los lectores.

Los algoritmos de IA pueden reflejar sesgos presentes en los conjuntos de datos utilizados para su entrenamiento. Si estos sesgos se propagan en los textos generados por IA, podrían influir en la toma de decisiones en investigación y algunos aspectos como la práctica médica (Ciaccio, 2023; Pratim, 2023; Murphy y Taylor, 2023; Corsello y Santangelo, 2023; Rahimi y Bezzin, 2023 y Lavista Ferres *et al.*, 2023). ¿Quién debería estar velando por estos sesgos dentro de la investigación en el entorno académico?. La **Figura 2** muestra algunas consideraciones del uso de la IA para la creación de obra intelectual, principalmente artículos científicos, que pueden aplicarse igualmente para la escritura de tesis, reportes e incluso tareas.

Aunque la IA puede ser útil para generar contenido rápidamente, existe la preocupación de que la obra generada carezca de la calidad y la confiabilidad esperadas. La revisión por pares y la validación científica

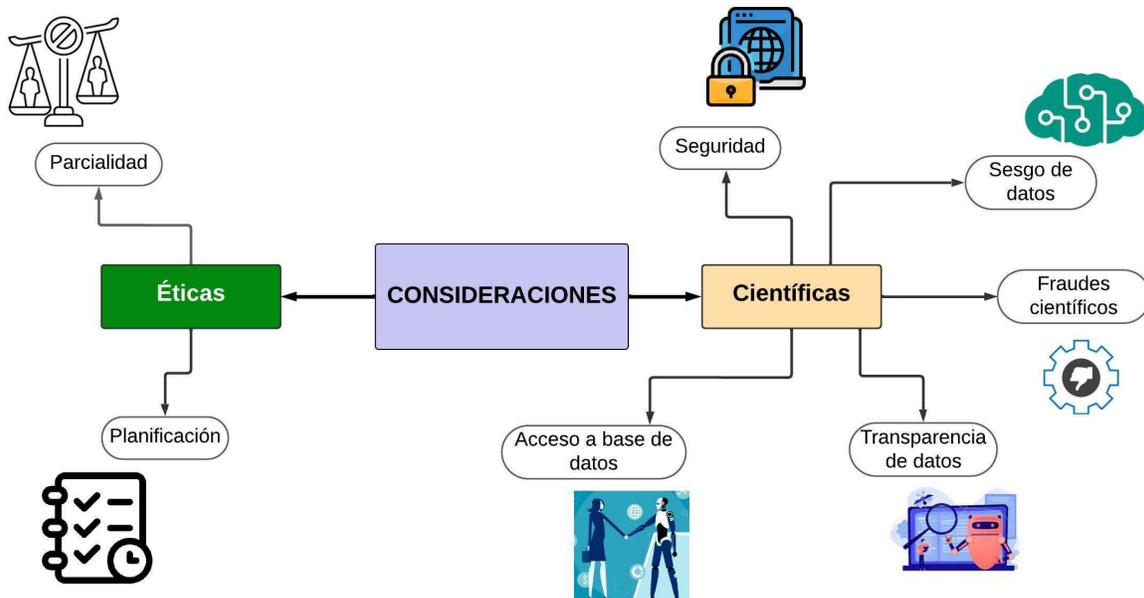


Figura 2. Consideraciones éticas y científicas para el uso de la IA en la escritura científica. Fuente: elaboración propia.

son fundamentales para garantizar la precisión, novedad y la integridad de la investigación, aunque, tal y como en el caso de los fraudes experimentales, la revisión por pares no es necesariamente una depuración hermética.

La autoría de la inteligencia artificial en los artículos científicos

De acuerdo a las editoriales como Elsevier, Springer, y Nature, los grandes modelos de lenguaje (Large Language Models or LLM), tales como ChatGPT, no cumplen con los criterios de autoría que estas solicitan (Elsevier, 2023; Springer, 2023; Nature, 2023). Queda implícito el hecho de que ser autor conlleva una responsabilidad por el trabajo intelectual y manual, que no puede ser asumida por un modelo de lenguaje. Proponen que el uso de un LLM se documente en la sección de Métodos (o en una parte alternativa adecuada) del manuscrito. Otras, como la revista Science, son determinantes en prohibir el uso de texto generado a partir de IA (Science, 2023). Explican en las instrucciones para autores que el aprendizaje automático o las herramientas algorítmicas similares no se pueden utilizar en artículos publicados en revistas científicas, ni las figuras, imágenes o gráficos adjuntos pueden ser productos de dichas herramientas, sin el permiso explícito de los editores. Además, establece que un programa de IA no puede ser autor de un artículo de revista científica, concluyendo que se considera una mala conducta científica la violación de esta política. Este es uno de los pocos antecedentes sobre regulaciones para el uso de la IA en publicaciones, faltando mucho por legislar o por lo menos regular en el ámbito académico, que es importante, como ya se ha mencionado, no solo para la escritura de artículos científicos, sino también tesis, reportes o tareas de estudiantes generadas a través de estas herramientas.

Casos de estudio que destacan la exitosa integración de la IA en universidades públicas en México

Las universidades públicas en México han emprendido diversas iniciativas para integrar IA en sus entornos académicos, obteniendo resultados prometedores en las condiciones culturales, económicas y académicas únicas del país.

Un caso de estudio destacado es la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que ha aprove-

chado la IA para mejorar las capacidades de investigación. Mediante el análisis automatizado de datos y el reconocimiento de patrones, los investigadores de la UNAM han podido procesar grandes conjuntos de datos de manera eficiente, identificar tendencias y extraer conocimientos valiosos. Esto ha llevado a avances significativos en campos como la medicina, la ciencia ambiental y las ciencias sociales (DGCS-UNAM, 2023; DGTIC-UNAM 2023 y GACETA UNAM, 2023).

Otro caso de estudio es el Instituto Politécnico Nacional (IPN), que ha implementado sistemas de tutoría inteligente y retroalimentación personalizada para mejorar la experiencia de aprendizaje. Se han utilizado plataformas impulsadas por IA para proporcionar a los estudiantes materiales educativos adaptados, rutas de aprendizaje adaptativas y retroalimentación en tiempo real. Este enfoque personalizado ha dado como resultado una mayor participación de los estudiantes, un mejor rendimiento académico y tasas de retención optimizadas (IPN-Dharma IA Lab, 2023).

Validación de la eficacia de las tecnologías de IA en universidades públicas

Las universidades públicas en México también han llevado a cabo experimentos y proyectos piloto para evaluar la eficacia de las tecnologías de IA en diversos ámbitos académicos. Estas iniciativas brindan conocimientos valiosos sobre los beneficios y desafíos de la adopción de la IA en el contexto mexicano. Por ejemplo, el Tecnológico de Monterrey llevó a cabo un proyecto piloto para evaluar el uso de la creación y curación de contenido asistidas por IA. Los profesores colaboraron con sistemas de IA para desarrollar materiales educativos interactivos y atractivos. El proyecto demostró una mayor calidad del contenido, un aumento en la participación de los estudiantes y mejores resultados de aprendizaje (Conecta, 2023).

Por otra parte, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) realizó un experimento utilizando simulaciones y modelado impulsados por IA para resolver problemas complejos. Los investigadores utilizaron algoritmos de IA para simular escenarios del mundo real y optimizar procesos de toma de decisiones. El experimento mostró el potencial de la IA para abordar desafíos complejos, como la planificación urbana y la sostenibilidad ambiental (Boletines UAM, 2023).



Lecciones aprendidas y mejores prácticas para la adopción de IA en universidades públicas en México

Con base a estos estudios de caso, se han obtenido lecciones útiles, en la creación de mejoras prácticas para la adopción de IA en universidades públicas. En primer lugar, la colaboración y los enfoques interdisciplinarios son clave para una integración exitosa de la IA, se deben fomentar asociaciones entre profesores, investigadores y expertos en IA para aprovechar perspectivas y conocimientos diversos. En segundo lugar, abordar consideraciones éticas y de privacidad es fundamental, y establecer pautas para proteger la privacidad de los datos y mitigar posibles sesgos. En tercer lugar, la asignación de recursos y la capacitación son aspectos críticos, se tiene que invertir en infraestructura, recursos computacionales y programas de desarrollo del profesorado. Aunque, en el contexto de México, esta inversión claramente depende de las subvenciones estatales o federales, permitiría brindar capacitación y oportunidades de actualización de habilidades para los académicos. En cuarto lugar, es necesario fomentar una cultura de innovación y adoptar una mentalidad de crecimiento, mediante la creación de espacios para compartir conocimientos, colaboración y diálogo abierto.

Casos de estudio que destacan la exitosa integración de la IA en universidades públicas en Colombia

En Colombia algunas universidades públicas han estado adoptando la IA y aplicándola en diferentes contextos para mejorar la calidad educativa y la investigación. Algunos aspectos destacados en relación con su integración exitosa son:

1. La Universidad Nacional de Colombia ha desarrollado proyectos de investigación en IA en áreas como el procesamiento del lenguaje natural, la robótica y el aprendizaje automático.
2. En la Universidad de Antioquia y en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se está fomentando la colaboración con instituciones académicas y centros de investigación internacionales en el campo de la IA. Estas asociaciones permiten el intercambio de conocimientos, el acceso a recursos compartidos y la participación en proyectos conjuntos de investigación.

Conclusiones

Los casos de estudio y avances realizados en universidades públicas, como en los aquí referidos para México y Colombia, demuestran la exitosa integración de tecnologías de IA en las condiciones culturales, económicas y académicas de ambos países. Al aprender de estas experiencias e implementar mejores prácticas, las universidades públicas pueden aprovechar el poder de la IA para mejorar las capacidades de investigación, personalizar la educación y agilizar los procesos administrativos, lo que en última instancia contribuirá a mejorar la calidad de la educación e investigación.

A pesar de todas las ventajas demostradas, donde las experiencias de uso de la IA han mostrado su flexibilidad y potencialidades para ayudar al progreso de la ciencia y tecnología, el avance del entendimiento de la IA debe dejar claro que esta herramienta es una ayuda no un sustituto de los recursos humanos especializados. Los avances en la tecnología se han reflejado por décadas en la mejoría de los procesos académicos y también han existido temores. Algunos ejemplos son las calculadoras electrónicas, las plataformas de simulación digital o los procesadores de palabras. Estas herramientas de ayuda no deben sustituir el estudio de aritmética, y matemática en general, o el modelado matemático de sistemas o la creatividad literaria. La *expertise* humana, la formación especializada formal, la creatividad, y la educación con formación basada en ciencia y tecnología no están en riesgo si la sociedad utiliza la IA como una herramienta, un apoyo para el progreso y no como el progreso mismo.

Referencias

- Ahmad, S. F., Alam, M. M., Rahmat, Mohd. K., Mubarik, M. S., Hyder, S. I., 2022, Academic and Administrative Role of Artificial Intelligence in Education, *Sustainability*, 14(3), 1101, <https://doi.org/10.3390/su14031101>.
- Alam, A. 2022, Employing adaptive learning and intelligent tutoring robots for virtual classrooms and smart campuses: Reforming education in the age of artificial intelligence, In: Shaw, R.N., Das, S., Piuri, V., Bianchini, M. (eds), *Advanced Computing and Intelligent Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 914, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2980-9_32.

- Boletines UAM, Alphago Zero, software base para crear algoritmos y resolver problemas complejos, <https://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/410-18.html>, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- Conecta (Tecnológico de Monterrey), “Tec y Microsoft se unen para usar la IA en investigación para la salud”, <https://conecta.tec.mx/es/noticias/nacional/institucion/tec-y-microsoft-se-unen-para-usar-la-ia-en-investigacion-para-salud>, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- DGCS-UNAM (Dirección General de Comunicación Social), Desarrolla investigador de la UNAM *software* para identificar tendencias del cambio climático, https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdbole-tin/2016_585.html, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- DGTIC-UNAM (Dirección General de Cómputo y Tecnologías de información y comunicación), Avances de la Inteligencia Artificial en el diagnóstico de enfermedades, <https://www.tic.unam.mx/avances-de-la-inteligencia-artificial-en-el-diagnostico-de-enfermedades/>, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- Celik, I., Dindar, M., Muukkonen, H. et al., 2022, The promises and challenges of artificial intelligence for teachers: a systematic review of research. *TechTrends* 66:616–630, <https://doi.org/10.1007/s11528-022-00715-y>.
- Ciaccio, E. J, 2023, Use of artificial intelligence in scientific paper writing, *Informatics in Medicine Unlocked*, pp. 101253, ISSN 2352-9148, <https://doi.org/10.1016/j.imu.2023.101253>.
- Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., De Felice, F., 2020, Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: progress, trends, and directions, *Sustainability*, 12(2), 492, <https://doi.org/10.3390/su12020492>.
- Creely, E. 2022, Conceiving creativity and learning in a world of artificial intelligence: A thinking model. In: Henriksen, D., Mishra, P. (eds) Creative provocations: speculations on the future of creativity, technology & learning. *Creativity Theory and Action in Education*, vol. 7. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14549-0_3.
- Corsello, A., Santangelo, A., 2023, May artificial intelligence influence future pediatric research?. The case of ChatGPT, *Children*, 10(4), 757, ISSN: 2227-9067, <https://doi.org/10.3390/children10040757>.
- Elsevier, “Publishing Ethics, The use of generative AI and AI-assisted technologies in the journal editorial process”, <https://www.elsevier.com/about/policies/publishing-ethics>, [consultado el 20 de junio de 2023].
- Estrada Zarazua, A, 2023, Análisis de los procesos de digitalización y automatización en el diseño gráfico. Perspectivas para la educación a partir del escenario que plantea el desarrollo de IA que diseña. Delgado Coellar, A. E., Ángeles Cañedo, J. C., Velázquez Ruíz, D. *Transformaciones y Retos de la Educación en las Artes y los Diseños* (TOMO 2). Panamá: Universidad Euroamericana, Coordinación de Investigación y Posgrado, 2023. ISBN 978-9962-8555-5-2. Pp. 193-213.
- GACETA UNAM, Con algoritmo, identifican a pacientes vulnerables, <https://www.gaceta.unam.mx/con-algoritmo-identifican-a-pacientes-vulnerables/>, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- Garrell Guiu, A., Guilera Agüera, L., 2019, La industria 4.0 en la sociedad digital. Barcelona. Marge Books. ISBN 978-84-17313-85-2, ISBN digital: 978-84-17313-86-9.
- IPN-Dharma IA Lab (Laboratorio de Microtecnología y Sistemas Embebidos, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional), <https://www.ia-dharma.cic.ipn.mx/index.php>, [consultado el 17 de mayo de 2023].
- Jia, J., Yu, Y., 2017. Online learning activity index (OLAI) and its application for adaptive learning”. In: Cheung, S., Kwok, Lf., Ma, W., Lee, LK., Yang, H. (eds) Blended Learning. New Challenges and Innovative Practices. ICBL 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10309. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59360-9_19.
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H. et al., 2022, Quo vadis artificial intelligence?. *Discov Artif Intell* 2, 4, <https://doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>.
- Kalpokiene, J., Kalpokas, I, 2023, Creative encounters of a posthuman kind – anthropocentric law, artificial intelligence, and art, *Technology in Society*, Volume 72, 102197, ISSN 0160-791X, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102197>
- Kim, J., Lee, H., Cho, Y.H., 2022, Learning design to support student-AI collaboration: perspectives of leading teachers for AI in education, *Educ Inf Technol* 27, 6069–6104, <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10831-6>.



- Krenn, M., Pollice, R., Guo, S.Y. et al. 2022, On scientific understanding with artificial intelligence, *Nature Reviews Physics* 4, pp. 761–769, <https://doi.org/10.1038/s42254-022-00518-3>.
- Kooli, C., 2023, Chatbots in Education and Research: A Critical Examination of Ethical Implications and Solutions, *Sustainability*, 15(7), 5614, <https://doi.org/10.3390/su15075614>.
- Lareyre, F., Chaudhuri, A., Behrendt, C.A., Pouhin, A., Teraa, M., Boyle, J.R., Tulamo, R., Raffort, J., 2023, Artificial intelligence–based predictive models in vascular diseases, *Seminars in Vascular Surgery*, ISSN 0895-7967, <https://doi.org/10.1053/j.semvasc-surg.2023.05.002>.
- Lavista Ferres, J.M., Weeks, W.B., Chu, L.C., Rowe, S.P., Fishman, E.K., 2023, Beyond chatting: The opportunities and challenges of ChatGPT in medicine and radiology, *Diagnostic and Interventional Imaging*, 6:104, pp. 263-264, ISSN 2211-5684, <https://doi.org/10.1016/j.diii.2023.02.006>.
- Moreno Padilla R, 2019, La llegada de la inteligencia artificial a la educación, *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 7, pp. 260-270, ISSN-e 2387-0893, <https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.022>.
- Murphy, J.W., Taylor, R.R, 2023, To democratize or not to democratize AI? That is the question, *AI Ethics*, ISSN 2730-5961, published online: June 15, <https://doi.org/10.1007/s43681-023-00313-5>.
- Nature, Artificial Intelligence, <https://www.nature.com/nature-portfolio/editorial-policies/ai>, [consultado el 20 de junio de 2023].
- Ng, D.T.K., Leung, J.K.L., Su, J. et al., 2023, Teachers' AI digital competencies and twenty-first century skills in the post-pandemic world, *Education Tech Research Dev* 71, 137–161, <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10203-6>.
- Palgrave Macmillan, Artificial Intelligence, <https://www.palgrave.com/gp/editorial-policies/artificial-intelligence--ai-/25429434>, [consultado el 20 de junio de 2023].
- Pisca, A. I., Edu, T., Zaharia, R. M., Zaharia, R., 2023, Implementing artificial intelligence in higher education: pros and cons from the perspectives of academics. *Societies*, 13(5), 118, <https://doi.org/10.3390/soc13050118>.
- Pratim R., 2023, ChatGPT: A comprehensive review on background, applications, key challenges, bias, ethics, limitations and future scope, *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* 3, pp. 121-154. ISSN 2667-3452, <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.003>.
- Rahimi, R, Bezmin Abadi, A.T., 2023, ChatGPT and publication ethics, *Archives of Medical Research*, 3: 54, pp. 272-274, ISSN 0188-4409, <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2023.03.004>.
- Rodríguez Chávez, M. H., 2021, Sistemas de tutoría inteligente y su aplicación en la educación superior, *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 11(22), e015, <https://doi.org/10.23913/ride.v11i22.848>.
- Sánchez Medina, I.I., Cabrera Medina, J.M. y Martínez Gaitan, J. E, 2016, Ayudas virtuales como apoyo al aprendizaje inclusivo en la ingeniería, *Revista Horizontes Pedagógicos* 17(2), pp. 104-116, ISSN: 0123-8264, Recuperado a partir de <https://horizontespedagogicos.iberro.edu.co/article/view/18108>
- Science, “Science Journals: Editorial Policies”, <https://www.science.org/content/page/science-journals-editorial-policies>, [consultado el 20 de junio de 2023].
- Sedlmeier, P., 2001, Intelligent tutoring systems, Editor(s): Neil J. Smelser, Paul B. Baltes, *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Pergamon, Pp 7674-7678, ISBN 9780080430768, <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/01618-1>.
- Soria Olivas, E., Sánchez-Montañés Isla, M.A., Gamero Cruz, R., Castillo Caballero, B., Cano Michelena, P., 2023, Sistemas de Aprendizaje Automático, Madrid, RA-MA Editorial, ISBN impreso: 978-84-1944-497-4, ISBN ePub: 978-84-19444-98-1.
- Springer, Artificial Intelligence, <https://www.springer.com/gp/editorial-policies/artificial-intelligence--ai-/25428500>, [consultado el 20 de junio de 2023].
- Tanwar, S., Kumari, A., Vekaria, D., Kumar, N., Sharma, R., 2022, An AI-based disease detection and prevention scheme for COVID-19, *Computers and Electrical Engineering*, Volume 103, 108352, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108352>.
- UNESCO-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2021, AI and education, Guidance for policy-makers, (UNESCO) p. 53, ISBN 978-92-3-300165-7, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379376>.
- Williamson, B., 2018, Big data in education. The digital future of learning, policy and practice, Madrid. Ediciones Morata S.L. ISBN eBook: 978-84-7112-890-4.

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, Año 31 no. 89, diciembre de 2023, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36 y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, **21 de septiembre de 2022**.

Ciencia Nicolaita no. 89 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada: *Tillandsia* sp., Bomeliaceae. Planta epífita.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educativos, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP