



SUSTENTABILIDAD Y ENERGÍA

UN ENFOQUE INTEGRAL

DR. OMAR SARRACINO MARTÍNEZ

COORDINADOR

TÍTULO ORIGINAL SUSTENTABILIDAD Y ENERGÍA UN ENFOQUE INTEGRAL

COORDINADOR

Dr. Omar Sarracino Martínez

COMITÉ DE REVISIÓN POR PARES

Dra. Damianys Almenares López
Dra. Claudina Villarreal Ibarra
Dr. Omar Sarracino Martínez
Dr. Quetzalcóatl Cruz Hernández
Escobedo
Erika Viviana Miranda Mandujano

COLABORADORES

Representación literaria:
Fundación Tecnológica Autónoma del Pacífico
Coordinación editorial:
Rafael Ricardo Rentería
Empresa de diseño:
HANTIK GROUP
Diseño y diagramación:
Ludwing Andrey Ramos Medina

Reservados todos los derechos.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, distribuida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, incluidas fotocopias, grabaciones u otros métodos electrónicos o mecánicos, sin el permiso previo por escrito del editorial, excepto en el caso de citas breves incorporadas en reseñas críticas y ciertos otros usos no comerciales permitidos por la ley de derechos de autor.

Los trabajos del presente libro fueron evaluados bajo la modalidad de doble par ciego.

gestioneditorial.1@gmail.com

www.sitioweb.com

ISBN: 978-628-95642-4-2

1ª edición

2024-17-10

Cali, Colombia

Copyright 2024 ©

ÍNDICE

PRÓLOGO		01
INTRODUCCIÓN		03
PARTE I	ENERGÍAS RENOVABLES Y SU IMPACTO EN LA SOCIEDAD	
CAPÍTULO 01	Criterios de sustentabilidad energética para la energía eólica offshore en México, revisión y análisis	07
CAPÍTULO 02	Evaluación del potencial eólico offshore en el límite marino administrativo de Tamaulipas	2 1
CAPÍTULO 03	Metodología de diseño de rotores eólicos para aerogeneradores de baja potencia para la estimación del coeficiente de potencia	3 3
CAPÍTULO 04	Convertidor de potencia para sistema eólico de bombeo de agua con acoplamiento eléctrico	48
CAPÍTULO 05	Estudio de películas delgadas y dispositivos basados en el compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)	63
CAPÍTULO 06	Comparativo del secado solar de hoja de naranja en un secador solar tipo gabinete y secado solar a cielo abierto	74
CAPÍTULO 07	Revalorización del aceite usado de las cafeterías de la UPCH: una propuesta de economía circular para el desarrollo sostenible	85
CAPÍTULO 08	El hidrógeno y las tecnologías renovables: retos y perspectivas	93
CAPÍTULO 09	Diseño de mezclas aplicado al sistema ZnO-CEO_2 y UREA para la fotodegradación de ácido acetil salicílico	107
CAPÍTULO 10	El ambiente y sus riesgos ecológicos. Enfoque social del compromiso para la sostenibilidad	121

ÍNDICE

PARTE II CONSUMO Y ACCIONES RESPONSABLES

CAPÍTULO 11	Actividad antifúngica del silicato de sodio (SS) sobre la pudrición de la corona del banano CV. 'Enano gigante' en experimentos in vitro	135
CAPÍTULO 12	Desarrollo de alimento balanceado a base de productos orgánicos para ganado vacuno de la región sureste de México	146
CAPÍTULO 13	La nutrición, fertilidad de suelos y agricultura de precisión en caña de azúcar en el sureste de México	164
CAPÍTULO 14	Análisis de la información bibliográfica sobre germinación de semilla de chile amashito (<i>Capsicum annuum</i> var. <i>Glabriusculum</i>)	179
CAPÍTULO 15	Alimento balanceado para pez tilapia, a base de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz	192
CAPÍTULO 16	Aplicaciones de <i>apium graveolens</i> L. (Apio): panorama general en décadas	211
CAPÍTULO 17	Caracterización de fibra de plátano pera (musa paradisiaca) de residuos agroindustriales para la obtención de nanoncrisales	228
CAPÍTULO 18	Análisis de corrosión para tuberías en ambiente marino	239
CAPÍTULO 19	Disposición final de los medicamentos de uso domiciliario. Caso de estudio: SINGREM	254
CAPÍTULO 20	Evaluación de la actividad antimicrobiana de extracto metanólico de <i>tagete lucida</i> (yerbaníz) sobre cepas multifarmacoresistentes	269

PRÓLOGO

Sustentabilidad y Energía. Un enfoque integral, es un libro que ha sido el resultado del esfuerzo de profesores e investigadores de diferentes universidades. Surgió en el marco del Primer Congreso Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades, realizado en la Universidad Popular de la Chontalpa, en Cárdenas, Tabasco, durante los días 5 al 7 de octubre del 2023. Su eje central es el desarrollo sustentable, con énfasis en los procesos y tecnologías basadas en las energías renovables; como alternativas para lograr el tránsito hacia un modelo energético descarbonizado. Es un libro que nos provee informaciones valiosas y actuales, alineadas a los esfuerzos internacionales y nacionales que buscan un desarrollo más justo, con un mejor aprovechamiento de los recursos naturales y sin comprometer la existencia de las generaciones futuras.

Se brindan, en particular, diferentes resultados de investigaciones realizadas en el estado de Tabasco, en áreas que abonan de manera directa a varios objetivos del desarrollo sustentable (ODS). En primer lugar, al ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”, objetivo que busca garantizar el acceso global a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos; aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas; implementar procesos de mejora de la eficiencia energética; así como ampliar la infraestructura y mejorar las tecnologías para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles.

Con relación a dicho tema, se describen diferentes estudios en los campos de la energía eólica, la fotovoltaica, la bioenergía y la eficiencia energética. El desarrollo de parques eólicos marinos, de materiales fotovoltaicos y de procesos de producción de biodiesel son algunos de ellos. Todos los temas son planteados desde el punto de vista del desarrollo sustentable; lo cual exige la participación de diferentes disciplinas en las investigaciones y una colaboración eficaz entre las instituciones científicas, de educación y de todos los sectores. La implementación de este tipo de estudios, con enfoque holístico, es precisamente uno de los grandes retos a los que nos enfrentamos. Y es propósito de este libro llamar la atención de la comunidad científica al respecto; brindando, además, aportes importantes logrados en Tabasco.

Otro de los objetivos de desarrollo sustentable que es abordado en este libro, es el objetivo 2 “Hambre Cero”. En dicho sentido, la producción de alimentos de consumo humano, con aditivos naturales, así como de alimentos balanceados para el ganado, son áreas de investigación y desarrollo que se plantean en dos de los capítulos. También se incluyen capítulos que responden a los objetivos 3 “Salud y bienestar” y 13 “Acción por el clima”; y al ODS 12 “Producción y consumo responsables”. Este último, busca entre sus metas lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Así, por ejemplo, la gestión adecuada de medicamentos caducos y de aceite vegetal residual, son dos grandes temas que se abordan, como los anteriores, desde una perspectiva de desarrollo sustentable.

Esperamos que este libro, no sea el último en entregar a la sociedad los resultados del esfuerzo de nuestros profesores e investigadores tabasqueños, en pro del desarrollo sustentable. Un nuevo modelo energético mundial y de desarrollo sustentable en general, continuará esperando por nuestra entrega y creatividad. El deseo de todos los autores y colaboradores, es que cada uno de los capítulos que aquí se incluyen contribuyan al logro de un mundo más justo. Un mundo mejor es posible.

¡Que así sea!

Dr. Geovanni Hernández Galvez

INTRODUCCIÓN

Es un honor presentar el libro denominado Sustentabilidad y Energía. Un enfoque integral donde podrán encontrar investigaciones relacionados con las fuentes renovables de energía, la salud y consumo responsable. Las investigaciones que cada uno de los cuerpos académicos y grupos de investigación perteneciente a instituciones científicas y de educación cuentan con el rigor metodológico mostrando sus hallazgos a través de sus mejores observaciones, mediciones, experimentos y otros resultados importantes con la finalidad de compartir el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico. Cabe resaltar que la intención de los autores no solo es mostrar sus hallazgos científicos, sino también invitan a reflexionar a los lectores que sin alterar nuestro estilo de vida podemos incorporar alternativas energéticas y procesos tecnológicos que permiten la generación de productos que causan un menor impacto en el medio ambiente durante su vida útil. Es por ello que este libro se divide en 20 capítulos clasificados en dos secciones temáticas que abarca diferentes escenarios de la investigación: I.- Energías renovables y su impacto en la sociedad y II.-Consumo y acciones responsables. Cada capítulo, elaborado por autores provenientes de diversos campos del saber, confieren un carácter multidisciplinar a los temas planteados desde el punto de vista del desarrollo sustentable.

En la primera sección se hablarán temas relacionados con las fuentes renovables de energía, su evaluación e implementación que puede contribuir a alcanzar las metas en materia de generación de energías limpias con la finalidad transitar hacia un nuevo modelo energético que busca contribuir a la mitigación de emisiones para limitar el calentamiento global y preservar la vida en nuestro planeta. El tránsito no será tarea fácil debido a la cantidad de factores que intervienen en los procesos de transformación y aprovechamiento de cualquier recurso energético. Los cuales normalmente tienden a ser agrupados en sociales, ambientales, económicos e institucionales, siendo tomados en cuenta en los proyectos energéticos como criterios de sustentabilidad.

En relación a la innovación en tecnologías de energía renovable de conjunto con la energía del hidrógeno que se caracteriza por ser un portador energético ideal para almacenar energía renovable, estas pueden ayudar a establecer y promover patrones de producción y consumo de energía más limpios, garantizar un proceso de transición energética. Lo anterior hace resaltar la necesidad de diseñar, construir y evaluar elementos como turbinas eólicas, convertidores de potencia DC-AC, dispositivos fotovoltaicos, deshidratadores solares, así como la generación de biocombustibles con el objetivo de evaluar el rendimiento y predecir si los dispositivos son apto para ciertas aplicaciones como la producción de energía eléctrica o para su uso en la conservación de alimentos. Por lo anterior y como se menciona en algunos trabajos para lograr el uso adecuado de las tecnologías y garantizar el desarrollo sustentable como un compromiso para las futuras generaciones es indispensable la difusión de los beneficios del aprovechamiento de las fuentes renovables de energía a través de los diferentes medios de comunicación y promoviendo la educación ambiental desde edad temprana.

En la segunda sección se hablarán temas relacionados con la problemática agronómica que existe actualmente sobre enfermedades por hongo, germinación de semilla y el rendimiento de las cosechas. La infección por hongos en las plantas es la causa más frecuente de pérdidas extensas en la agricultura y ante esto se están aplicando métodos culturales, físicos, químicos de baja toxicidad y biológicos como una alternativa a los fungicidas sintéticos convencionales para controlar las enfermedades postcosecha. En relación a la germinación de semillas, se están realizando numerosos estudios sobre escarificación química, física y biológica, como tecnología para incrementar la germinación de la semilla. En particular existe evidencia que muestra que la germinación de la semilla de chile amashito puede incrementarse con el uso de hormonas vegetales, tratamientos térmicos e inclusive utilizando microorganismos. Estudios de nutrición y fertilidad, que asociada a la agricultura de precisión puede contribuir en mejorar el manejo integrado de los cultivos de caña de azúcar. Un gran impulsor en la agricultura de precisión es la introducción de drones para aplicación de insumos agrícolas y cosechadoras de precisión que miden el rendimiento en el momento de corte para generar mapas de rendimiento.

En este sentido, se presentan trabajos que aprovechan la cáscara de naranja, maíz, melaza, soya y sal premezcladas para generar un alimento que enriquezca la alimentación del ganado vacuno.

Así mismo, se da un valor agregado a los remanentes de la cáscara de huevo, la cáscara de camarón y el pericarpio de maíz para la elaboración de un alimento balanceado para el pez tilapia, que suple las necesidades nutricionales para su desarrollo, logrando así la sustitución del alimento comercial.

Hablando de salud humana, la distribución y disposición final de fármacos, así como los métodos y técnicas de disposición final es de primordial importancia ya que los medicamentos caducos o no utilizados en el hogar deberían ser eliminados de una manera que garantice la seguridad de la población, y que tenga un impacto negativo mínimo en el medio ambiente. Además, en esta sección se habla del uso de plantas medicinales como alternativas a la medicina tradicional. Utilizando las diferentes partes de la planta, según sea la afectación o la receta en cuestión y consumiéndose directamente o preparada como infusiones o en presentación homeopática. Por lo tanto, se propone el uso de plantas medicinales como una alternativa con fines de terapia para sustituir a los fármacos antimicrobianos.

Agradezco enormemente el esfuerzo y dedicación de todos los autores, así como al Comité revisor por su colaboración. Espero que en la próxima edición los lectores puedan observar nuevos hallazgos científicos sobre los temas presentados, así como la inclusión de nuevos temas de actualidad.

Dr. Omar Sarracino Martínez

1



ENERGÍAS RENOVABLES Y SU IMPACTO EN LA SOCIEDAD



CAPÍTULO 1

CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA PARA LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE EN MÉXICO: REVISIÓN Y ANÁLISIS

Hernández Galvez José Antonio¹, Hernández Galvez Geovanni²
López de Paz Pascual³, Lastres Danguillecourt Orlando³

Resumen

En este capítulo se presentan los resultados fundamentales sobre los criterios de sustentabilidad utilizados a nivel global en el ámbito de la energía eólica offshore, así como los aplicables a México. Se encontró que, comúnmente los autores agrupan los criterios en cuatro categorías: sociales, técnicos, económicos y ambientales. Los criterios técnicos son los más utilizados; aunque estos tienen una estrecha relación con los criterios económicos. De estos últimos, los más frecuentes son “costo total de inversión” y “costo nivelado de la electricidad”. Mientras que los criterios técnicos más utilizados son “profundidad del agua”, “distancia a la costa” y “velocidad media del viento”. Las “áreas naturales protegidas” y la “distancia a las áreas ambientales” son los criterios ambientales más frecuentes; y “población atendida”, “áreas de aviación civil o militar” y “perturbaciones acústicas” son los sociales más utilizados. Para el caso de México, se seleccionaron cuatro zonas de interés: Z1 (Golfo de México), Z2 (Golfo de Tehuantepec), Z3 (Golfo de California), y Z4 (Costa Oeste de Baja California); debido a que previamente fueron identificadas como zonas con un potencial eólico apreciable. En total se seleccionaron 20 criterios para las zonas Z1, Z3 y Z4, y 21 para la zona Z2.

Palabras claves. *Criterios de sustentabilidad, energía eólica offshore, parques eólicos, criterios múltiples.*

¹ Estudiante del Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Tuxtla Gutiérrez. Chiapas. hernandezgalvezjoseantonio@gmail.com

² Profesor de Tiempo Completo Titulares A. Universidad Popular de la Chontalpa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Cárdenas. Tabasco. (autor correspondiente) geovanni.hdez@upch.mx

³ Profesores Investigadores. Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables. UNICACH. Tuxtla Gutiérrez. Chiapas. pascual.lopez@unicach.mx; olastres@hotmail.com.

Introducción

Uno de los grandes retos que tiene la humanidad es el tránsito hacia un nuevo modelo energético, basado en el aprovechamiento sustentable de los recursos renovables y en el uso eficiente de la energía. Con ello se busca descarbonizar a dicho sector, contribuyendo a la mitigación de emisiones para limitar el calentamiento global y preservar la vida en nuestro planeta. Por dicha razón, muchos países se han propuesto metas importantes como parte del Acuerdo de París, que en el caso de México consisten en reducir el 22 % de sus emisiones de gases de efecto invernadero al 2030; con las siguientes contribuciones por sector: transporte 18 %; generación eléctrica 31 %; residencial y comercial 18 %; petróleo y gas 14 %; industria 5 %; agricultura y ganadería 8 % y residuos 28 %.

Pero el tránsito hacia un modelo energético sustentable no es una tarea fácil, debido a la cantidad de factores que intervienen en los procesos de transformación y aprovechamiento de cualquier recurso energético. Dichos factores provienen de diferentes ámbitos, los cuales normalmente tienden a ser agrupados en sociales, ambientales, económicos e institucionales. Además, el hecho de que los mismos se encuentran estrechamente interrelacionados hace el proceso de tránsito aún más complejo.

Dicha complejidad hace que el diseño, desarrollo, implementación o planeación de cualquier proceso, producto o servicio energético sustentable deba llevarse a cabo con un enfoque sistémico. Es decir, teniendo en cuenta criterios que tengan en cuenta la necesaria relación naturaleza-tecnología-sociedad. Los criterios que provienen de esos tres grandes ámbitos, a los que se suman los aspectos institucionales, se les conoce como criterios de sustentabilidad. Al respecto, no hay una definición única; incluso, a veces no se distingue entre criterios e indicadores de sustentabilidad. Pavlovskaja (2014) los define como requerimientos para la cualidad sostenible de un producto y su producción; mientras que Zink (2005), citado por Pavlovskaja (2014) dice que son criterios que permiten evaluar oportunidades y riesgos derivados de las dimensiones ambiental, social y económica del desarrollo sustentable.

En el campo de la energía, una definición clara de la sustentabilidad puede darse a través del esquema conceptual del trilema energético; que fue definido por el World Energy Council como el equilibrio entre tres dimensiones fundamentales: seguridad energética, equidad energética y conservación ambiental (WEC, 2022; Marti and Puertas, 2022). Su importancia radica en que, de cada una de esas dimensiones, provienen criterios que pueden utilizarse para apoyar la toma de decisiones, dentro del proceso de transición energética sustentable en los diferentes países.

Como parte de dicha transición, la energía eólica juega un papel fundamental a nivel global; debido fundamentalmente a que sus tecnologías de aprovechamiento han alcanzado un adecuado nivel de madurez y ya resultan económicamente competitivas con otras tecnologías tanto renovables como convencionales. Sin embargo, por sí mismas no garantizan un desarrollo energético sustentable; ya que una mala planeación de instalaciones eólicas podría tener impactos negativos, sobre todo desde el punto de vista social y ambiental. Es por ello que se requiere de una planeación que tenga en cuenta no solo aspectos técnicos y económicos; sino que también incluya criterios provenientes de las dimensiones ambientales y sociales de la sustentabilidad. El objetivo de esta investigación es hacer una revisión y análisis de los criterios de sustentabilidad utilizados en estudios previos, en el área de la energía marina; y a partir de ella construir una matriz de criterios múltiples que puedan ser aplicados en estudios similares para el caso de México.

Metodología

La revisión de trabajos previos se basó en artículos científicos publicados en revistas con reconocimiento internacional. Los artículos incluidos en el análisis fueron los que cumplieron con los criterios de: ser estudios sobre planeación de parques eólicos offshore, no terrestres; y sobre evaluación del recurso eólico marino, pero bajo un enfoque de sustentabilidad.

Los criterios de sustentabilidad encontrados en la revisión, se agruparon en categorías; y se determinó la frecuencia relativa de cada categoría. Así como la frecuencia de cada criterio dentro de la categoría a la que pertenece. Luego, teniendo en cuenta los criterios usados en otros países, se construyó una matriz de criterios aplicables a la energía eólica marina.

Las áreas de estudio seleccionadas para el caso de México (Figura 1), corresponden a las zonas marinas del Golfo de México (Z1), el Golfo de Tehuantepec (Z2), el Golfo de California (Z3) y la costa oeste de la Península de Baja California (Z4).



Figura 1. Ubicación de las áreas de interés.

Dichas zonas coinciden con las que previamente fueron identificadas por un estudio realizado a partir de una iniciativa del Grupo del Banco Mundial (WBG, 2021), que permitió identificar áreas con potencial eólico offshore en todo el mundo. Los criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo eólico offshore de cada una de las zonas, fueron seleccionados teniendo en cuenta las particularidades de cada una de ellas.

Análisis y discusión de los resultados

Criterios de sustentabilidad utilizados en estudios previos.

La aplicación de criterios de sustentabilidad en el ámbito energético, y en particular en la energía eólica, ha sido abordada ampliamente en la literatura. Una de sus áreas de aplicación ha sido la selección de los sitios más adecuados para la instalación de parques eólicos marinos (Ziemba et al., 2017, Vagiona and Kamilakis, 2018; Spyridonidou and Vagiona, 2020; Maandal, Tamayao-Kieke and Danao, 2021; Ziemba, 2022).

También, aunque en menor medida, se han utilizado criterios múltiples para evaluar el potencial eólico offshore que se podría aprovechar de forma sustentable en algunos países o regiones. Por ejemplo, Vinhoza and Schaeffer (2021) utilizaron criterios múltiples y análisis espacial, para determinar el potencial eólico offshore disponible en Brazil, en tres niveles: potencial bruto (gross), potencial técnico y potencial disponible excluyendo zonas con restricciones ambientales y sociales. Similarmente, Taoufik y Fekri (2021) usaron de manera combinada un sistema de información geográfica y el método Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP), para evaluar el potencial eólico offshore en Marruecos y seleccionar los sitios más adecuados.

En la Tabla 1 aparece un resumen de los criterios utilizados por diferentes autores en estudios previos; agrupándolos en cuatro categorías: sociales, ambientales, técnicos y económicos. El número de criterios por categorías fue 9, 5, 18 y 7 respectivamente. Para un total de 39 criterios. Y en las figuras 1 a 5 se muestra la frecuencia de ocurrencia de cada criterio según su categoría.

Tabla 1. Criterios de sustentabilidad energética utilizados en estudios previos (energía eólica offshore).

Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
S1. Áreas de aviación civil/militar. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Ziembra, P.	A1. Áreas naturales protegidas Spyridonidou, S. Dimitra, G., Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Vinhoza, A. Schaeffer, R., Hernández G., Magar et al.,	T1. Profundidad del agua. Spyridonidou; S. Dimitra, G. Dimitra, G. Kamilakis, M. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Vinhoza, A. Schaeffer, R. Ziembra, P. Hernández; G. Magar et al., Peña et al.	E1. Costo total de inversión Spyridonidou, S. Dimitra, G. Ziembra, P.
S2. Población Atendida. Dimitra, G. Kamilakis, M. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Ziembra, P	A2. Distancia a las áreas ambientales Dimitra, G. Kamilakis, M. Taoufik, M. Fekri, A.	T2. Distancia a la costa. Ziembra, P. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Vinhoza, A. Schaeffer, R., Hernández G., Peña et al.	E2. Costo nivelado de electricidad. Ziembra, P., Hernández G., Gerard D.M.,

Continuación de Tabla 1...

Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
S3. Perturbaciones acústicas. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Lorenz; G. Ann; M. Kieke; T. Ángelo; L.	A3. Hábitats de las aves y rutas migratorias. Spyridonidou; S. Dimitra; G. Ziembra, P.	T3. Promedio anual de la velocidad del viento. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Dimitra, G. Y Kamilakis, M. Ziembra. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Vinhoza, A. Schaeffer, R.	E3. Período de recuperación de la inversión. Ziembra; P., Ziembra P. et al.
S4. Densidad de navegación Dimitra, G. Kamilakis, M. Ziembra. P. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A.	A4. Efectos de reducción de contaminación Ziembra, P.	T4. Distancia desde la Red Residencial. Spyridonidou, S. Dimitra G. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Hernández; G.	E4. Impacto esperado en el PIB. Ziembra, P.
S4. Densidad de navegación Dimitra, G. Kamilakis, M. Ziembra. P. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A.	A4. Efectos de reducción de contaminación Ziembra, P.	T4. Distancia desde la Red Residencial. Spyridonidou, S. Dimitra G. Taoufik, M. Fekri, A. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A. Hernández; G.	E4. Impacto esperado en el PIB. Ziembra, P.
S5. Zonas de pesca. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A. Ziembra, P., Magar et al., Peña et al.	A5. Impacto medioambiental. Ziembra, P.	T5. Proximidad a puertos locales. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A. Hernández; G.	E5. Costo de inversión inicial. Ziembra; P.
S6. Distancia a playas con bandera azul. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A.		T6. Proximidad a la red eléctrica de alta tensión. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Dimitra, G. Kamilakis, M. Taoufik, M. Fekri, A., Magar et al.	E6. Costos de operación y mantenimiento. Ziembra, P.

Continuación de Tabla 1...

Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
S7. Generación de empleos. Spyridonidou, S. Dimitra, G. Ziemba, P.		T7. Potencial eólico. Dimitra, G. Kamilakis, M. Peña, E. David, S. Huesola, H. Stolen; D.	
S8. Aceptación Social. Loukogeorgaki, E. Dimitra, G. Lioliou, A		T8. Tuberías y cables submarinos. Spyridonidou; S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A., Peña et al.	
		T9. Tipos de cimentación de los aerogeneradores Marinos. Obane,H. Nagai, Yu. Asano, k.	E7. Energía producida. Ziemba, P
		T10. Geología del fondo marino. Spyridonidou, S, Dimitra, G. Ziemba. P.	
S9. Zonas turísticas Spyridonidou, S. Dimitra, G. Taoufik, M. Fekri, A.		T11. Peligro sísmico. Spyridonidou, S. Dimitra, G.	
		T12. Proximidad a reservas de hidrocarburos. Ziemba. P.; Hernández G	
		T13. Proximidad de corredores aéreos. Taoufik, M. Fekri, A.	

Continuación de Tabla 1...

Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
		T14. Distancia a las Islas. Taoufik, M. Fekri, A.	
		T15. Corredores de navegación marítima. Taoufik, M. Fekri, A.	
		T16. Distancia a las centrales eléctricas. Ziembra, P.	
		T17. Distancia a las carreteras principales. Ziembra, P.	
		T18. Distancia a zonas urbanas. Ziembra; P.	

Un aspecto que es necesario destacar, es la interdependencia que existe entre algunos criterios. Como plantea Ziembra (2021), hay criterios que pueden considerarse innecesarios, ya que su valor de información coincide con otros criterios. Por ejemplo, “velocidad del viento” y “densidad de potencia eólica” conllevan a un conocimiento similar sobre la “disponibilidad del recurso eólico”; “impacto ambiental” es una generalización de “contaminantes”, de “reducción de emisiones” y de criterios espaciales relacionados con áreas naturales protegidas. Igualmente, no es necesario utilizar todos los criterios económicos, ya que, por ejemplo, el “costo nivelado de la electricidad” depende de los “costos” e “ingresos” y contiene información similar al “período de recuperación de la inversión”.

Dicha interdependencia es un factor que se debe tener en cuenta a la hora de elegir los criterios aplicables a un estudio determinado. Con ello se podrá evitar el uso desmedido de criterios que podrían complicar el proceso de toma de decisiones.

Criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo eólico marino en México.

Los criterios de sustentabilidad que fueron seleccionados para cada una de las zonas marinas de México se muestran en la Tabla 2, siguiendo la clasificación por categorías ya vista anteriormente.

Tabla 2. Criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo eólico marino en México.

Zonas	Criterios según cuatro categorías			
	Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
Z1. Golfo de México	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad de navegación 2. Zonas de pesca. 3. Distancia a zonas de playa. 4. Generación de empleos 5. Zonas turísticas. 6. Distancia a la costa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas naturales protegidas. 2. Rutas de aves migratorias. 3. Emisiones evitadas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promedio anual de la velocidad del viento. 2. Tuberías y cables submarinos. 3. Distancia a zonas e infraestructuras de hidrocarburos 4. Intensidad de los ciclones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad del agua. 2. Distancia a puertos locales. 3. Distancia a puntos de interconexión con la red eléctrica de alta tensión. 4. Costo nivelado de la electricidad. 5. Costo evitado de la electricidad. 6. Período de recuperación de la inversión.
Z2. Golfo de Tehuantepec	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad de navegación. 2. Zonas de pesca. 3. Distancia a zonas de playa. 4. Generación de empleos. 5. Zonas turísticas. 6. Distancia a la costa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas naturales protegidas. 2. Rutas de aves migratorias. 3. Emisiones evitadas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promedio anual de la velocidad del viento. 2. Tuberías y cables submarinos. 3. Distancia a zonas e infraestructuras de hidrocarburos. 4. Peligro sísmico. 5. Intensidad de los ciclones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad del agua. 2. Distancia a puertos locales. 3. Distancia a puntos de interconexión con la red eléctrica de alta tensión. 4. Costo nivelado de la electricidad. 5. Costo evitado de la electricidad 6. Período de recuperación de la inversión. 7. Distancia a la costa.

Continuación de Tabla 2...

Zonas	Criterios según cuatro categorías			
	Sociales	Ambientales	Técnicos	Económicos
Z3. Golfo de California	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad de navegación. 2. Zonas de pesca. 3. Distancia a zonas de playa. 4. 4. Generación de empleos. 5. 5. Zonas turísticas. 6. Distancia a la costa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas naturales protegidas. 2. Rutas de aves migratorias. 3. Emisiones evitadas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promedio anual de la velocidad del viento. 2. Tuberías y cables submarinos. 3. Peligro sísmico. 4. 4. Intensidad de los ciclones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad del agua. 2. Distancia a puertos locales. 3. Distancia a puntos de interconexión con la red eléctrica de alta tensión. 4. Costo nivelado de la electricidad. 5. Costo evitado de la electricidad. 6. Período de recuperación de la inversión. 7. Distancia a la costa
Z4. Costa oeste de Baja California	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad de navegación. 2. Zonas de pesca. 3. Distancia a zonas de playa. 4. Generación de empleos. 5. Zonas turísticas. 6. Distancia a la costa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas naturales protegidas. 2. Rutas de aves migratorias. 3. Emisiones evitadas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promedio anual de la velocidad del viento. 2. Tuberías y cables submarinos. 3. Peligro sísmico. 4. Intensidad de los ciclones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad del agua. 2. Distancia a puertos locales. 3. Distancia a puntos de interconexión con la red eléctrica de alta tensión. 4. Costo nivelado de la electricidad. 5. Costo evitado de la electricidad. 6. Período de recuperación de la inversión. 7. Distancia a la costa.

Los criterios sociales, ambientales y económicos son los mismos para las tres zonas. Mientras que el criterio técnico “Distancia a zonas e infraestructuras de hidrocarburos” solo es aplicable a las zonas Z1 y Z2; en tanto que el criterio técnico “Peligro sísmico” no es aplicable a la zona Z1.

Con relación al criterio “Distancia a la costa”, es importante señalar que el mismo se ha considerado tanto del tipo social como económico. En lo sociales importante considerarlo, para garantizar que no se planeen parques eólicos muy próximos a la costa; lo cual podría afectar a las comunidades costeras o a los turistas debido a factores como impacto visual o afectación por ruido. Entretanto, desde el punto de vista económico la distancia a la costa es un factor que afecta directamente los costos de inversión, operación y mantenimiento. Mismos que se verán reflejados en el costo nivelado de la energía y en el período de recuperación de la inversión.

Conclusiones

La mayor parte de los estudios publicados se han realizado en el continente europeo, con una alta presencia en el mar del norte; mientras que solo dos se han llevado a cabo en México.

La mayoría de los autores agrupa los criterios de sustentabilidad en cuatro categorías: sociales, ambientales, técnicos y económicos.

Los criterios técnicos son los que más se han utilizado en estudios previos, con un 46 %; seguidos de la categoría “Social” con un 23 %, luego los “Económicos” con un 18 % y los “Ambientales” con un 13 %.

Los criterios económicos más utilizados fueron “costo total de inversión” y “costo nivelado de electricidad”. Mientras que los técnicos fueron “profundidad del agua”, “distancia a la costa” y “velocidad media del viento”. Entretanto, las “áreas naturales protegidas” y la “distancia a las áreas ambientales” son los criterios ambientales más frecuentes. En cuanto a los sociales, “población atendida”, “áreas de aviación civil o militar” y “perturbaciones acústicas” fueron los más frecuentes.

Con relación a los criterios aplicables a México, la cantidad total es la misma para las zonas Z1, Z3 y Z4 (20 criterios), siendo 21 para la zona Z2. Los criterios sociales, ambientales y económicos son los mismos para las tres zonas. Mientras que el criterio técnico “Distancia a zonas e infraestructuras de hidrocarburos” es aplicable a las zonas Z1 y Z2; en tanto que el criterio técnico “Peligro sísmico” no es aplicable a la zona Z1.

Referencias bibliográficas

- Hernández, G., Chuck, D., Sarracino, O., Lastres, O., Dorrego, J.R., Trujillo, A., Saldaña, R., Pampillón, L., Perea, A.J. y Hernandez, Q. (2022). Harnessing Offshore Wind Energy along the Mexican Coastline in the Gulf of Mexico—An Exploratory Study including Sustainability Criteria. *Sustainability*, 14, 5877. <https://doi.org/10.3390/su14105877>
- Obane, H., Nagai, Y. y Asano K. (2021). Assessing the potential areas for developing offshore wind energy in Japanese territorial waters considering national zoning and possible social conflicts. *Marine Policy*, 129, 104514. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104514>
- International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2023. <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- Lorenz G., Mili-Ann M. Tamayao K. y Danao L. A. (2021). Techno-Economic Assessment of Offshore Wind Energy in the Philippines. *Journal of marine Science and Engineering*, 9, 758. <https://doi.org/10.3390/jmse9070758>
- Loukogeorgaki E., Vagiona D. G. y Lioliou A. (2022). Incorporating Public Participation in Offshore Wind Farm Siting in Greece. *Wind* 2, 1–16. <https://doi.org/10.3390/wind2010001>
- Magar V., Gross M.S. y González L. (2018). Offshore wind energy resource assessment under techno-economic and social-ecological constraints. *Ocean & Coastal Management* 152 (2018) 77e87. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.10.007>
- Magar V., Peña A., Hahmann A. N., Pacheco D. A., García L. S. y Gross M. S. (2023). Wind Energy and the Energy Transition: Challenges and Opportunities for Mexico. *Sustainability* 15, 5496. <https://doi.org/10.3390/su15065496>
- Marti L. y Puertas R. (2022). Sustainable energy development analysis: Energy Trilemma. *Sustainable Technology and Entrepreneurship* 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100007>

- Meryem, T. y Ahmed, F. (2021). GIS-based Multi-Criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco. *Energy Conversion and Management*: X, 11, 100103. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100103>
- Pavlovskaja E. (2014). Sustainability criteria: their indicators, control, and monitoring (with examples from the biofuel sector). *Environmental Sciences Europe* 2014, 26:17. <http://www.enveurope.com/content/26/1/17>
- Pawel Z. (2022). Uncertain Multi-Criteria analysis of offshore wind farms projects investments – Case study of the Polish Economic Zone of the Baltic Sea. *Applied Energy* 309, 118232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118232>
- Pawuel Z. (2021). Multi-Criteria Fuzzy Evaluation of the Planned Offshore Wind Farm Investments in Poland. *Energies*14 (4), 978. <https://doi.org/10.3390/en14040978>
- Peña E. U., Ryberg S., Heinrichs H., Stolten D. y Robinius M. (2021). The Potential of Variable Renewable Energy Sources in Mexico: A Temporally Evaluated and Geospatially Constrained Techno-Economical Assessment. *Energies* 2021, 14, 5779. <https://doi.org/10.3390/en14185779>
- Spyridonidou S. y Vagiona D. G. (2020). Systematic Review of Site-Selection Processes in Onshore and Offshore Wind Energy Research. *Energies* 13, 5906. <https://doi:10.3390/en13225906>
- Taoufik M. and Fekri A. (2021). GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco. *Energy Conversion and Management* X, 11, 100103. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100103>
- Vagiona D. G. and Kamilakis M. (2018). Sustainable Site Selection for Offshore Wind Farms in the South Aegean—Greece. *Sustainability* 10, 749. <https://doi:10.3390/su10030749>
- Vinhoza A. and Schaeffer R. (2021). Brazil offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146, 111185 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>
- Vinhoza A. and Schaeffer R. (2021). Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146, 111185. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>
- World Energy Council (WEC). 2022. World energy trilemma index. <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>
- World Bank Group (2020). Technical Potential for Offshore Wind in Mexico. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/540571586840981675/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Mexico-Map.pdf>

- Zhiyu, J. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, 110576. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576>
- Ziembra P. (2021). Multi-Criteria Fuzzy Evaluation of the Planned Offshore Wind Farm Investments in Poland. *Energies* 14, 978. <https://doi.org/10.3390/en14040978>
- Ziembra P. (2022). Uncertain Multi-Criteria analysis of offshore wind farms projects investments – Case study of the Polish Economic Zone of the Baltic Sea. *Applied Energy* 309, 118232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118232>
- Ziembra Paweł, Watróbski Jarostaw, Zioto Magdalena & Karczmarczyk Artur. (2017). Using the PROSA Method in Offshore Wind Farm Location Problems. *Energies* 10, 1755. <https://doi:10.3390/en10111755>
- Zink K. (2005). From industrial safety to corporate health management. *Ergonomics* 48(5), 534–546. <https://doi:10.1080/00140130400029266>

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE EN EL LÍMITEMARINO ADMINISTRATIVO DE TAMAULIPAS

Hernández Galvez Giovanni¹, Huerta Izquierdo Asbeth²,
Reyes García Roberto², Sarracino Martínez Omar¹, Córdova
Aquino Jacobo¹, Trujillo Narcía Antonio¹

Resumen

En este trabajo se realiza la evaluación del potencial eólico offshore disponible en el límite marino administrativo del estado de Tamaulipas. Para ello, se utilizaron series temporales de viento tipo reanálisis; provenientes de dos fuentes de información comúnmente utilizadas a nivel global: ERA 5 y MERRA-2. Apoyados en el software especializado Windographer 4.0, se obtuvieron los potenciales disponibles y se estimaron las energías producidas por diferentes turbinas eólicas. Los resultados indican, que en los seis sitios estudiados la densidad de potencia media disponible en el viento es superior a 250 W/m^2 , alcanzándose valores medios superiores a los 340 W/m^2 en dos de ellos. La velocidad media del viento a 150 m de altura es superior a 8 m/s en la región norte; que es la de mayor potencial eólico y por lo tanto la zona más viable para instalar parques eólicos offshore.

Palabras claves. *Energía eólica; parques eólicos offshore; datos de reanálisis; potencial eólico offshore.*

Introducción

El crecimiento en el consumo de electricidad a nivel global y la necesidad de abastecerlo mediante fuentes de energías limpias, les imponen grandes retos a los mercados eléctricos en los diferentes países. En particular, México se ha comprometido en el acuerdo de París a disminuir sus emisiones mediante la diversificación de la matriz energética nacional.

¹ Universidad Popular de la Chontalpa. Profesores de Tiempo Completo. Cuerpo Académico "Energía y Medioambiente". autor correspondiente (geovanni.hdez@upch.mx); omar.sarracino@upch.mx; jacobocordova@upch.mx; trujillo.narcia@upch.mx.

² Universidad Popular de la Chontalpa. Estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Energías Renovables. 004ya19@upch.mx.

Específicamente, se comprometió a que el 35 % de la energía generada para 2024 y el 43 % para 2030 provenga de fuentes limpias.

Lo anterior no es una tarea fácil, ya que de conjunto con la descarbonización del sector se debe garantizar un suministro energético seguro. La seguridad energética mide la capacidad de una nación para suministrar de forma confiable la demanda actual y futura de energía y de recuperarse rápidamente de las afectaciones producidas por su entorno (por ejemplo, de fenómenos atmosféricos severos). También mide qué tan efectivo es un país en la gestión de los recursos energéticos, tanto nacionales como foráneos, así como la confiabilidad y resiliencia de su infraestructura energética. En el caso de México, en algunas zonas la seguridad energética se ha visto afectada por diferentes causas, entre las cuales podemos mencionar el desbalance entre oferta y demanda de electricidad causado por la pandemia del COVID-19, la insuficiencia de la producción local de electricidad y la frecuente congestión en varios nodos de la red nacional de transmisión.

En el país, actualmente no existen proyectos offshore en ninguna fase de planeación o desarrollo. Sin embargo, el Atlas Eólico Global (GWA 3.1, 2021) sugiere que en México existe un potencial eólico marino apreciable. Por ejemplo, en amplias zonas del Golfo de México se pudieran alcanzar factores de capacidad superiores al 40 %, utilizando turbinas eólicas clase III; que podrían ser superiores al 50 % en zonas próximas al estado de Tamaulipas (Figura 1).

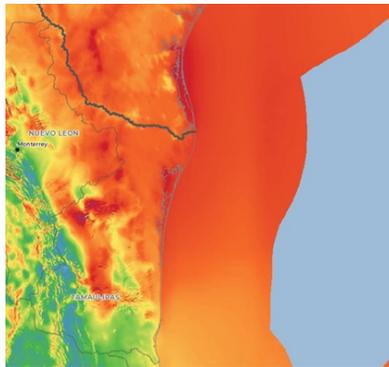


Figura 1. Mapa de velocidad media a 100 m de altura en el Golfo de México, frente a las costas de Tamaulipas (GWA 3.1, 2021).

Es decir, existe un recurso eólico offshore cuyo aprovechamiento sustentable podría contribuir a alcanzar las metas en materia de generación de energías limpias; pero debe ser evaluado de manera adecuada. Como veremos a continuación, son pocos los estudios que abordan este tema en México; razón por la cual se hace necesario realizar investigaciones que permitan cuantificar el potencial eólico offshore en el país. En este estudio, el mismo fue evaluado específicamente en el Golfo de México, en la zona marina administrativa del estado de Tamaulipas.

La energía eólica offshore podría contribuir a la descarbonización del sector energético a nivel mundial. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2021), a finales del 2020 existían cerca de 34 GW de instalaciones eólicas offshore en todo el mundo; y se espera que para el 2030 se alcancen los 380 GW y para el 2050 más de 2000 GW. Las regiones líderes en dicha tecnología son Asia, Europa y América del Norte; que coinciden con aquellas donde se han realizado la mayor parte de los trabajos de investigación publicados en revistas reconocidas internacionalmente.

Uno de los problemas que surgen cuando se quiere realizar la evaluación del potencial eólico offshore, es la falta de datos medidos directamente en el sitio de interés. Una alternativa es el empleo de datos de reanálisis, obtenidos de diversos estudios del potencial eólico marino.

Tal es el caso del estudio realizado por Soukissian et al. (2021), quienes evaluaron la viabilidad de instalar parques eólicos y plantas fotovoltaicas flotantes en diversos puntos del mar Mediterráneo. Estudios similares fueron desarrollados en el Caribe colombiano (Gil, Cañón y Martínez, 2021); en el Mar del Norte y el Mar Báltico (Gottschall and Dörenkämper, 2021); en Oman (Al-Hinai et al., 2021) y en Qatar (Aboobacker et al., 2021).

De especial interés es el estudio realizado por Gruber et al. (2022), que utilizaron datos de reanálisis ERA 5 y MERRA 2, así como datos de Clima Generalizado de Viento (GWC) generados por diferentes versiones del Atlas Eólico Global (GWA), para simular la producción de energía de parques eólicos en diferentes países y evaluar las desviaciones observadas con relación a datos reales medidos en dichos parques.

Ellos concluyeron que ERA 5 funcionó mejor que MERRA 2 en casi todas las regiones, mostrando correlaciones más altas y menores errores relativos; mientras que en Nueva Zelanda el comportamiento del MERRA 2 fue mejor. Además, no observaron mejoras significativas al utilizar las diferentes versiones del GWA.

En el caso de México, existe una gran brecha de conocimiento en cuanto al potencial eólico offshore disponible. Solo se reporta un estudio que hace un análisis integral del aprovechamiento del recurso eólico offshore en México; específicamente en la mitad norte del Golfo de California (Magar et al., 2018). Sus autores se basaron en 27 años de datos generados con el modelo N512 UPSCALE e incluyeron restricciones tecno-económicas y socio-ecológicas.

Otros estudios de menor alcance fueron realizados por Soler et al. (2011) y Perea et al. (2020). El primero de ellos utilizó datos de una torre meteorológica, ubicada al final del muelle de Puerto Progreso, a 6.65 km de la costa en el estado de Yucatán, para estudiar los perfiles de viento y temperatura; mientras que en el segundo se emplearon datos MERRA-2 de 141 localidades, incluyendo algunas en el mar, para evaluar el recurso eólico. Pero en ninguno de ellos se evaluó el potencial de instalación de parques eólicos offshore. La mayor parte de los estudios realizados en México se han enfocado en la evaluación del recurso eólico onshore, utilizando diversas fuentes de datos, en particular datos de reanálisis (Carrasco et al., 2015; Hernández et al., 2019; Quetzalcoatl et al., 2019).

Es por ello que resulta necesario realizar estudios más detallados que permitan determinar cuál es el potencial del recurso eólico offshore disponible en el país. Por dicha razón, este trabajo está dirigido a realizar un análisis de la viabilidad de aprovechar el potencial eólico marino disponible en zonas del Golfo de México; específicamente en la zona marina administrativa de Tamaulipas.

Metodología.

Sitios de estudio

Los sitios de estudio se encuentran ubicados dentro de la zona marina administrativa del estado de Tamaulipas, en el Golfo de México (Figura 2).

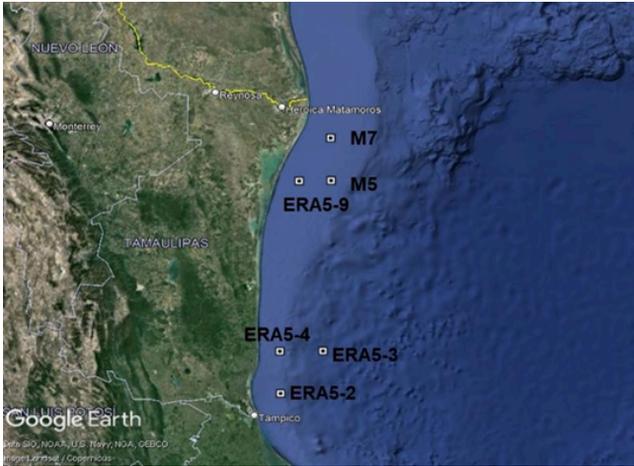


Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio

Las coordenadas de cada uno de ellos, así como sus distancias a la costa se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los sitio de estudio y distancia a la costa.

Sitios de estudio	Latitud	Longitud	Distancia a la costa (km)
M7	25.5	-96.875	40
M5	25.0	-96.875	66
ERA5 9	22.05	-97.250	26
ERA5 2	22.5	-97.500	36
ERA5 3	23.0	-97.000	77
ERA5 4	23.0	-97.500	26

Evaluación del recurso eólico

El estudio fue realizado utilizando datos de reanálisis MERRA-2 y ERA 5. MERRA 2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) es un modelo producido por la Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la NASA, que ofrece datos de reanálisis. Entretanto, el modelo de re-análisis ERA 5, es desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), y fue liberado en julio del 2017 e incluye datos desde 1950.

La evaluación del recurso eólico se realizó mediante el software profesional Windographer 4.0, ampliamente utilizado a nivel internacional para la evaluación de proyectos eólicos. Windographer es el software líder en la industria eólica para analizar datos del recurso eólico, medidos tanto por anemómetros ubicados en torres de superficie, generados por modelos atmosféricos, o medidos mediante equipos Sodar o Lidar. Dicho programa es capaz de importar varios formatos de datos, en particular con extensiones txt o xlsx. En nuestro caso se utilizaron bases de datos en formato txt.

El valor medio de la densidad de potencia disponible en el viento \bar{P}_v (W/m^2) se determinó mediante la ecuación 1.

$$\bar{P}_v = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del aire al nivel medio del mar (1.225 kg/m^3) y v es la velocidad del viento en m/s.

Entretanto, el Factor de Capacidad (FC), que da una medida de cuánto se aprovecha la potencia nominal instalada de un aerogenerador, y que depende tanto de las características del viento en el sitio de instalación, como de las características propias del aerogenerador (curva de potencia), se determinó mediante la ecuación 2.

$$FC = \frac{P_m}{P_n} * 100 \quad (2)$$

Donde P_m es la potencia media del aerogenerador y P_n su potencia nominal.

La potencia media del aerogenerador se determinó mediante la ecuación 3, cuyo proceso de cálculo ya está implementado en el software Windographer.

$$P_m = \int_{V_i}^{V_s} P(v)p(v)dv \quad (3)$$

Donde V_i y V_s son las velocidades del viento a las cuales el aerogenerador comienza y deja de entregar energía respectivamente, $P(v)$ es la función que determina la potencia entregada por el aerogenerador para cada velocidad del viento (curva de potencia) y $p(v)$ es la función de densidad de probabilidad de Weibull (ecuación 4), que da la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad del viento en el sitio de estudio.

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Donde k es el factor de forma (adimensional) y c es el factor de escala (m/s).

Los aerogeneradores más adecuados para el régimen del viento de los sitios de estudio fueron seleccionados siguiendo la norma 61400-1, la cual establece que si la velocidad media es menor o igual a 7.5 m/s se requieren aerogeneradores clase III, si alcanza los 8.5 m/s serían la clase II y si es igual o mayor a 10 m/s se recomienda instalar turbinas eólicas clase I.

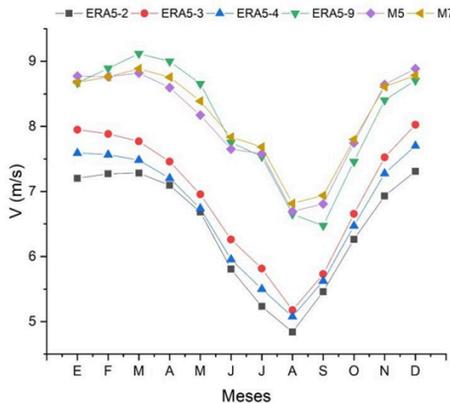
Análisis y discusión de los resultados

En la Tabla 2 se muestran los parámetros característicos del viento en los sitios estudiados. Se puede notar que, en los tres sitios ubicados en la zona norte, el potencial eólico disponible es mayor que en los que se ubican en la zona sur. Por ejemplo, la densidad media de potencia a 50 m de altura, se encuentra entre 300 W/m² y 400 W/m² en la zona norte, clasificando como Clase 3; que es un potencial eólico razonable para instalación de aerogeneradores. Así mismo, la velocidad media del viento a 150 m supera los 8 m/s en dicha zona; valores comparables con los existentes en sitios de proyectos eólicos offshore europeos.

Tabla 2. Parámetros característicos del viento en los sitios de estudios

PARÁMETROS									
Sitios	$\bar{V}_{50 m}$ (m/s)	$\bar{V}_{100 m}$ (m/s)	$\bar{V}_{150 m}$ (m/s)	$\bar{P}_{50 m}$ (W/m ²)	$\bar{P}_{100 m}$ (W/m ²)	$\bar{P}_{150 m}$ (W/m ²)	Clase de potencial eólico	$k_{150 m}$ de Weibull (-)	$C_{150 m}$ de Weibull (m/s)
ZONA NORTE									
M7	7.23	7.82	8.16	338	427	486	3 (Razonable)	2.69	9.16
M5	7.18	7.75	8.09	340	429	489	3 (Razonable)	2.56	9.10
ERA5-9	7.19	7.76	8.11	343	434	494	3 (Razonable)	2.55	9.12
ZONA SUR									
ERA5-2	5.85	6.23	6.45	246	296	329	2 (Marginal)	1.95	7.28
ERA5-3	6.29	6.70	6.93	281	338	375	2 (Marginal)	2.09	7.83
ERA5-4	6.07	6.45	6.68	258	311	345	2 (Marginal)	2.06	7.55

En cuanto al comportamiento promedio del viento a lo largo del año (Figura 3), podemos ver que es similar en los seis sitios estudiados. Los meses más ventosos son los comprendidos de noviembre a marzo, mientras que durante los meses junio, julio, agosto y septiembre se obtienen los menores valores promedios mensuales; con un mínimo en el mes de agosto.

**Figura 3.** Perfil mensual de la velocidad media del viento a 150 m en los sitios de estudio

Con relación al comportamiento diario (Figura 4), podemos notar que las horas del día durante las cuales el viento es más intenso, son las comprendidas entre las once de la noche y las cinco de la mañana. Con relación al comportamiento diario (Figura 4), podemos notar que las horas del día durante las cuales el viento es más intenso, son las comprendidas entre las once de la noche y las cinco de la mañana. Los menores valores tienen lugar al caer la tarde, entre las tres y las seis horas.

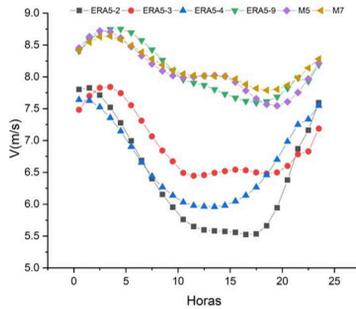


Figura 4. Perfil diario de la velocidad media del viento a 150 m en los sitios de estudio.

Otro aspecto de gran interés tiene que ver con el comportamiento direccional del viento (Figura 5). En los tres sitios de la zona norte, los vientos con mayor contenido energético soplan desde la dirección sur-sureste (SSE, 157.50); representando algo más del 30 % en el caso del sitio ERA5-9. Mientras que, en los tres sitios de la región sur, los vientos más energéticos provienen del nortenoeste (NNW, 337.50) en los sitios ERA5-3 y ERA5-4; y del norte en el sitio ERA5-2. Esta información es importante, porque permite seleccionar la mejor ubicación de los aerogeneradores dentro de un parque eólico, para minimizar las pérdidas por efecto de estela.

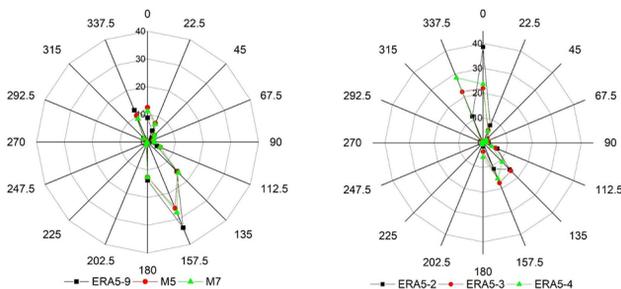


Figura 5. Energía total por direcciones disponibles en el viento a 150 m en los sitios de estudio

Respecto a la producción estimada de energía mediante aerogeneradores, se realizaron cálculos para cinco modelos de ellos; todos de 1500 kW de potencia nominal, pero de diferentes clases: uno Clase I, dos Clase II, uno Clase III y uno Clase IIIb (Tabla 3).

En la Tabla 3 se muestran los valores de la energía anual que podría ser producida con cada uno de ellos, así como las emisiones evitadas y el factor de capacidad.

Como era de esperar en los tres sitios de la zona norte, por tener más potencial eólico, los valores de dichos parámetros son mayores que en la zona sur. En particular, se puede ver que los factores de capacidad superan el 30 %, lo cual es adecuado para instalaciones eólicas; siendo de un 41.6 % para la turbina eólica Acciona AW82/1500 por ser Clase IIIb, idónea para sitios con un potencial eólico no muy elevado.

Tabla 1. Coordenadas de los sitio de estudio y distancia a la costa.

Turbinas eólicas	H _{hub} (m)	Sitio ERA5-3 Zona Sur			Sitio ERA5-9 Zona Norte		
		Energía producida (MWh/año)	Factor de capacidad (%)	Emisiones evitadas (tCO ₂ e/año)	Energía producida (MWh/año)	Factor de capacidad (%)	Emisiones evitadas (tCO ₂ e/año)
Acciona AW 70/1500 Class I	150	3108,3	23.7	1535.5	4405,7	33.5	2176.4
Acciona AW 70/1500 Class II	150	3241,2	24.7	1601.2	4620,8	35.2	2282.7
Acciona AW 77/1500 Class II	150	3559,8	27.1	1758.5	4994,2	38.0	2467.1
Acciona AW 77/1500 Class III	150	3499,7	26.6	1728.9	5019,6	38.2	2479.7
Acciona AW 82/1500 Class IIIb	150	3912,3	29.8	1932.7	5469,4	41.6	2701.9

Conclusiones

De los seis sitios estudiados, los que cuentan con un mayor potencial eólico son los que se ubican hacia la parte norte de la Zona Marina Administrativa de Tamaulipas; donde se pueden encontrar valores medios superiores a los 300 W/m^2 a 50 m de altura.

A 150 m, altura típica de aerogeneradores para parques eólicos marinos, el potencial disponible supera los 480 W/m^2 ; lo cual es atractivo para este tipo de instalaciones.

Las estimaciones realizadas en cuanto a la producción de electricidad mediante turbinas eólicas, indican que se podrían alcanzar factores de capacidad de hasta un 41 %. Valor que es comparable con los obtenidos en otras regiones del mundo, donde ya funcionan parques eólicos marinos.

Los resultados obtenidos, demuestran que existe un potencial eólico en la Zona Marina Administrativa de Tamaulipas que podría ser aprovechado para producir electricidad. Por ello, se debe continuar con un estudio que permita evaluar la viabilidad de dichas instalaciones; pero con un enfoque de desarrollo sustentable.

Referencias bibliográficas

- Aboobacker, V.M.; Shanas, P.R.; Veerasingam, S.; Al-Ansari, E.M.; Sadooni, F.N.; Vethamony, P. Long-Term Assessment of Onshore and Offshore Wind Energy Potentials of Qatar. *Energies* 2021, 14, 1178.
- Al-Hinai, A.; Charabi, Y.; Aghay Kaboli, S.H. Offshore Wind Energy Resource Assessment across the Territory of Oman: A Spatial-Temporal Data Analysis. *Sustainability* 2021, 13, 2862.
- Carrasco-Díaz, M.; Rivas, D.; Orozco-Contreras, M.; Sánchez-Montante, O. An Assessment of Wind Power Potential along the Coast of Tamaulipas, Northeastern Mexico. *Renewable Energy* 2015, 78, 295–305, doi:10.1016/j.renene.2015.01.007.
- Gil Ruiz, S.A.; Barriga, J.E.C.; Martínez, J.A. Wind Power Assessment in the Caribbean Region of Colombia, Using Ten-Minute Wind Observations and ERA5 Data. *Renewable Energy* 2021, 172, 158–176, doi:10.1016/j.renene.2021.03.033.
- Global Wind Atlas. <https://globalwindatlas.info/es>

- Gottschall, J.; Dörenkämper, M. Understanding and Mitigating the Impact of Data Gaps on Offshore Wind Resource Estimates. *Wind Energy Science* 2021, 6, 505–520.
- Gruber, K.; Klöckl, C.; Regner, P.; Baumgartner, J.; Schmidt, J. Assessing the Global Wind Atlas and Local Measurements for Bias Correction of Wind Power Generation Simulated from MERRA-2 in Brazil. *Energy* 2019, 189, 116212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116212>.
- Hernández, G., Saldaña, R., Miranda, U., Sarracino, O., Castillo, M., Almenares, D., & Tapia, A. (2019). Wind resource assessment and sensitivity analysis of the levelised cost of energy. A case study in Tabasco, Mexico. *Renewable Energy Focus*, 29(00), 94-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.03.001>
- Hernández-Escobedo, Q., Garrido, J., Rueda-Martínez, F., Alcalá, G., & Perea-Moreno, A. (2019). Wind Power Cogeneration to Reduce Peak Electricity Demand in Mexican States Along the Gulf of Mexico. *Energies*, 12(2330). doi:10.3390/en12122330
- International Renewable Energy Agency (IRENA). Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment (2021). <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/Offshore-Renewables-An-Action-Agenda-for-Deployment>
- Magar, V.; Gross, M.S.; González-García, L. Offshore Wind Energy Resource Assessment under Techno-Economic and Social-Ecological Constraints. *Ocean & Coastal Management* 2018, 152, 77–87, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.10.007>.
- Perea-Moreno, A.-J.; Alcalá, G.; Hernandez-Escobedo, Q. Seasonal Wind Energy Characterization in the Gulf of Mexico. *Energies* 2019, 13, 93.
- Soler-Bientz, R. Preliminary Results from a Network of Stations for Wind Resource Assessment at North of Yucatán Peninsula. *Energy* 2011, 36, 538–548.
- Soukissian, T.H.; Karathanasi, F.E.; Zaragkas, D.K. Exploiting Offshore Wind and Solar Resources in the Mediterranean Using ERA5 Reanalysis Data. *Energy Conversion and Management* 2021, 237, 114092.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ROTORES EÓLICOS PARA AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA

Monserrat Velásquez Irineo¹, Cristófer Aguilar Jiménez², Orlando Lastres Danguillecourt³, Antonio Verde Añorve⁴, José Rafael Dorrego Portela⁵, Giovanni Hernández Galvez⁶

Resumen

Una turbina eólica capta la energía cinética del viento convirtiéndola en energía mecánica y finalmente, a partir de un generador eléctrico la convierte a energía eléctrica; sin embargo, para conocer el rendimiento de la turbina es necesario analizar el comportamiento de las fuerzas que actúan sobre el álabe. Las fuerzas axiales, tangenciales, las pérdidas en la punta del álabe, el empuje, entre otras, influyen en el rendimiento aerodinámico de la turbina, para esto es necesario seleccionar las características más adecuadas durante el proceso de diseño del rotor. En este trabajo se desarrolló una metodología de diseño de rotores eólicos, que requiere parámetros nominales del aerogenerador y el perfil aerodinámico que se utilizará en toda la extensión del álabe, y determina la fuerza axial, tangencial, torque, potencia y coeficiente de potencia. Se validó comparando los resultados con el software Qbl de mediante el diseño de un rotor eólico para un aerogenerador de 10 kW.

Palabras claves. *Turbina eólica, fuerzas aerodinámicas, perfil aerodinámico, rendimiento aerodinámico.*

¹ Monserrat Velasquez Irineo es alumna de la licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. monserrat.velasquez@e.unicach.mx

² El Mtro. Cristófer Aguilar Jiménez es alumno de doctorado del IIER-UNICACH, cristofer.aguilar@e.unicach.mx (autor correspondiente)

³ El Dr. Orlando Lastres Danguillecourt es profesor investigador del IIER-UNICACH, orlando.lastres@unicach.mx (autor correspondiente)

⁴ El Dr. Antonio Verde Añorve es posdoctorante en el IIER, aero.rto@gmail.com

⁵ El Dr. José Rafael Dorrego Portela es profesor investigador en la Universidad del Istmo, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, rdorrego6361@gmail.com

⁶ El Dr. Giovanni Hernández Gálvez es profesor investigador de la Universidad Popular de la Chontalpa geovanni.hdez@upch.mx

Introducción

La energía eólica tiene un papel importante en la generación de energía a partir de recursos naturales a lo largo de los años se ha demostrado que es una fuente aprovechable para satisfacer la demanda de energía, además, que se considera una fuente virtualmente inagotable. La generación de energía por una turbina eólica depende de la interacción del viento con el rotor de esta principal interacción se puede predecir el rendimiento aerodinámico de una turbina eólica y predecir si el dispositivo es apto o no para cierta aplicación. El diseño de rotores para turbinas eólicas es una de las partes fundamentales para la obtención de energía debido a esto en este trabajo se realiza el diseño de un rotor para condiciones específicas el cual se somete a un análisis aerodinámico mediante un software basado en la teoría de BEM para calcular fuerzas, momentos y la potencia obtenida por el rotor.

1. Teoría del disco actuador

La forma en que la energía extraída se convierte en energía utilizable depende del diseño particular de la turbina (Burton, 2001), el dispositivo que se encarga de la extracción de energía se denomina disco actuador; el disco se considera ideal, en otras palabras, no tiene fricción, no hay componente de velocidad de rotación en la estela (MANWELL, 2009) y no hay pérdidas en las puntas. El disco tiene la característica de que reduce la velocidad del flujo y extrae toda la energía resultante de la reducción de la velocidad del flujo (Brondsted, 2011).



Figura 1. Flujo a través del disco actuador (Brondsted, 2011).

A partir de la ecuación de Bernoulli, es posible establecer una conexión entre la presión y la velocidad tanto aguas arriba como aguas abajo del rotor, sin embargo, este análisis no es válida a través del plano del rotor, pero se puede analizar para el flujo aguas arriba y aguas abajo del plano del rotor.

La caída de presión a través del plano del rotor se puede expresar como el cambio del impulso del aire que pasa a través de una unidad de área del rotor por segundo.

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1) \quad (1)$$

La ec. 1 indica que la velocidad del aire en el plano del rotor se ha desacelerado exactamente a la mitad del déficit de velocidad total que experimentara desde aguas arriba hasta aguas abajo en la estela del rotor y la otra mitad de la desaceleración del viento se produce en la estela, aguas abajo del rotor. En este contexto, es conveniente definir una entidad que es el factor de inducción axial:

$$u = (1 - a)V_0 \quad (2)$$

$$u = (1 - a)V_0 \quad (3)$$

La tasa de energía cinética y la presión de estancamiento en el disco del rotor se puede representar como coeficientes adimensionales:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (5)$$

La Ec. 4 determina que la máxima potencia que se puede obtener del viento es $C_p = 16/27$ y que este valor máximo se obtiene para un factor de inducción axial de $a = 1/3$, este límite máximo se denomina límite de Betz. La explicación de por qué no se puede extraer toda la potencia del rotor es que se necesita transportar el aire lejos del rotor después de que se haya extraído la potencia. Si se detuviera el aire por completo y se extrajera toda la energía existente, habría que acumular el aire en alguna parte (Brondsted, 2011).

2. Teoría del elemento del álabe

Para este análisis se determina que el álabe está dividido en N secciones y luego se determinan las fuerzas en cada una de estas secciones; estas fuerzas se integran a lo largo de todo el álabe para obtener las fuerzas y los momentos producidos por el álabe.

Cuando se divide el álabe en N secciones, cada uno de los elementos del álabe experimentará un flujo ligeramente diferente, ya que tienen una velocidad de rotación diferente, una longitud de cuerda diferente y un ángulo de torsión diferente.

Al analizar las fuerzas sobre la sección del álabe, debe tenerse en cuenta que las fuerzas de elevación y arrastre son perpendiculares y paralelas, respectivamente al viento relativo. Para cada sección de álabe se hace el siguiente análisis de fuerza:

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c dr \quad (6)$$

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c dr \quad (7)$$

$$P_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (8)$$

$$P_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (9)$$

Las características generales de rendimiento están determinadas por la integración numérica a lo largo del álabe. Si el rotor tiene un número finito de álabes, la fuerza normal total sobre la sección a una distancia r , se tiene:

$$dP_N = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr \quad (10)$$

Donde el empuje, dT , es la misma fuerza que la fuerza normal, dPN (MANWELL, 2009).

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr \quad (11)$$

3. Perfil aerodinámico

Los perfiles aerodinámicos son estructuras con formas geométricas específicas que se utilizan para generar fuerzas mecánicas debido al movimiento relativo del perfil aerodinámico y el fluido circundante y son usadas para desarrollar potencia mecánica. El ancho y la longitud del álabe son funciones del rendimiento aerodinámico deseado; la máxima potencia deseada del rotor, las propiedades asumidas del perfil aerodinámico y las consideraciones de resistencia.

La resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción generalmente se resuelve en dos fuerzas y un momento que actúa a lo largo de la cuerda.

- **Fuerza de sustentación:** es una consecuencia de la presión desigual sobre las superficies aerodinámicas superior en inferior.
- **Fuerza de arrastre:** se debe tanto a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie del perfil aerodinámico como la presión desigual en las superficies del perfil aerodinámico que miran hacia y desde el flujo que se aproxima.
- **Momento:** es una tendencia al giro en el eje perpendicular a la sección transversal de la superficie aerodinámica ubicado a un cuarto de la cuerda del perfil.

4. Geometría del álabe

Los parámetros geométricos que tienen un efecto sobre el rendimiento aerodinámico de un perfil aerodinámico son: el radio del borde de ataque, la línea de inclinación media, el espesor máximo, la distribución del espesor del perfil y el ángulo del borde de salida. Los álabes de los aerogeneradores deben diseñarse para convertir la energía cinética del viento en torque, al mismo tiempo que tienen propiedades estructurales que garantizan la resistencia estática y a la fatiga necesarias para una larga vida. El punto de partida para el diseño de álabes de turbinas eólicas supone un flujo axial uniforme aguas arriba de la turbina eólica con un flujo bidimensional sobre los álabes y condiciones de operación en estado estable, aunque en los casos reales el flujo axial no es uniforme. Un rotor de eje horizontal consta de uno o más álabes, cada uno con una serie de formas aerodinámicas a lo largo del álabe. La elección del perfil aerodinámico, la longitud de la cuerda y la torsión a lo largo de del álabe determinan el rendimiento del rotor en una variedad de condiciones de flujo.

En conclusión, el diseño de álabes se rige a partir de condiciones aerodinámicas de diseño que se define por la relación entre la velocidad del rotor y la velocidad del viento.

5. Teoría del elemento del momento del álabe (BEM)

El diseño del rotor se basa en el método del momento del elemento de álabe seguido de descripciones del rendimiento de las secciones del perfil aerodinámico a lo largo del álabe, decisión de la velocidad de rotación, determinación del tamaño del rotor, control del rotor, restricciones de diseño, determinación del número de álabes y como evaluar el rotor (Bronsted, 2011).

Con este modelo es posible calcular las cargas estacionarias y, por tanto, también el empuje y la potencia para diferentes ajustes de velocidad del viento, velocidad de rotación y ángulo de inclinación. El método BEM combina la teoría del momento con los eventos locales que tienen lugar en los álabes reales.

El modelo BEM se asumen lo siguiente para los elementos anulares:

1. Lo que sucede en un elemento no puede ser sentido por los demás
2. La fuerza de las palas sobre el flujo es constante en cada elemento anular; esto corresponde a un rotor con un número infinito de álabes.

Posteriormente, se introduce una corrección conocida como factor de pérdida de punta de Prandtl para corregir este último supuesto y calcular un rotor con un número finito de álabes (Hansen, 2008).

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (12)$$

El ángulo de ataque local viene dado por:

$$\tan \varphi = \frac{(1 - a)V_o}{(1 - a')\omega r} \quad (13)$$

La fuerza normal y tangencial al plano del rotor, se ven a continuación:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (14)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (16)$$

La fuerza normal y el par se describen en la Ec. 17:

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr \quad (17)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o^2 (1-a) \omega r (1-a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_t r dr \quad (18)$$

El factor de inducción axial se expresa en le Ec. 19 y Ec. 20:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (19)$$

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (20)$$

6. Pérdidas en la punta de Prandtl

La pérdida de punta de Prandtl corrige la suposición de un número infinito de álabes. Para un rotor con un número finito de álabes el sistema de vórtices en la estela es diferente al de un rotor con un número infinito de álabes. Prandtl derivó un factor de corrección, F (Hansen, 2008).

$$dT = 4\pi\rho V_0^2 a(1-a)Fdr \quad (21)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega(1-a)a'Fdr \quad (22)$$

F se calcula con la Ec 23:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (23)$$

Donde

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (24)$$

Las nuevas ecuaciones para a y a' se obtienen de la Ec. 25 y Ec. 26:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (25)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (26)$$

Metodología

La metodología general propuesta se describe en el diagrama 1.

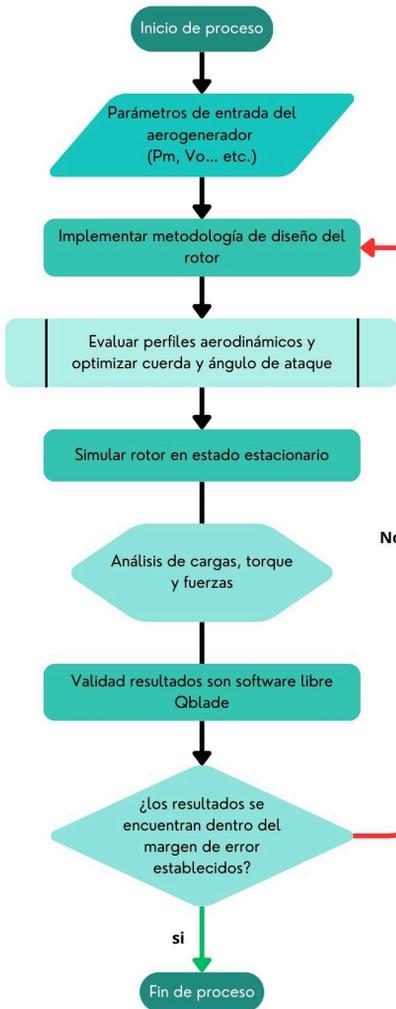


Diagrama 1. Metodología general del análisis



Diagrama 2. Evaluación de perfiles aerodinámicos

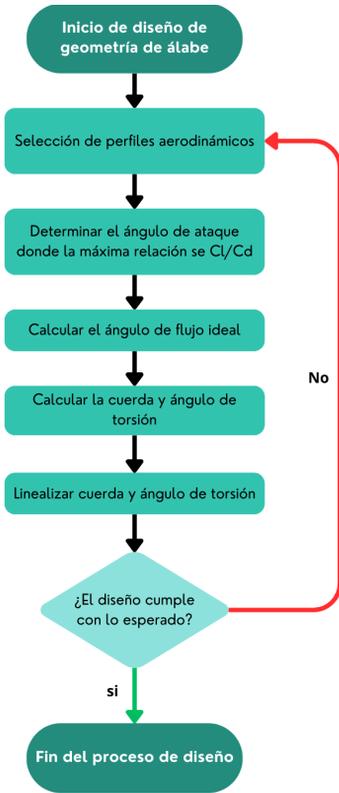


Diagrama 3. Diseño de geometría del álabe

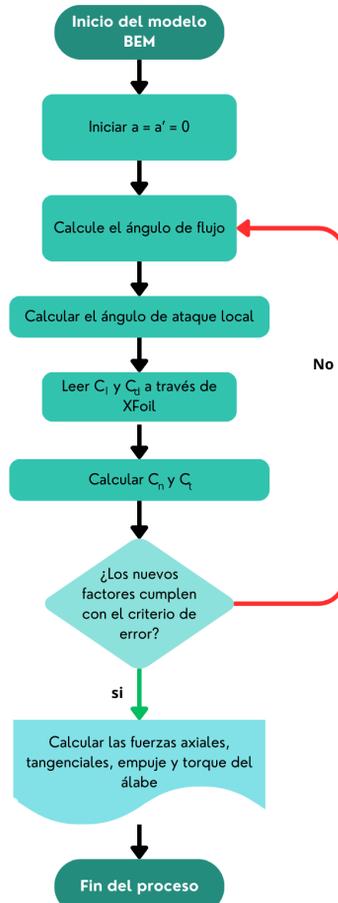


Diagrama 4. Metodología BEM

Análisis y discusión de resultados

Se seleccionó el perfil aerodinámico que se usará en toda la extensión del álabe; los criterios tomados para la selección del perfil, son los siguientes:

- Mayor relación elevación-arrastre Cl/Cd .
- Pequeño coeficiente de empuje, C_m .
- Manufactura accesible.

Estos parámetros deben ser tomados en cuenta para mejorar el rendimiento aerodinámico del rotor.

Se realiza la simulación para obtener los resultados para la geometría ideal del ábabe con 3 perfiles a partir de los datos presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del rotor para el diseño del ábabe

Características	Valor
V_o	10.5 m/s
P_m	13,219.3 W
RPM	245 rpm
Radio	3.4 m
η_{mec}	1
η_{elec}	1
C_p	0.35
Re	1 000 000

En la Tabla 2. se muestran los parámetros de entrada del rotor para la obtención de la geometría del ábabe.

Tabla 2. Evaluación de perfiles aerodinámicos

Perfil	C_l	C_d	C_l/C_d	$C_m (\alpha = 0^\circ)$
Naca 4418	1.5308	0.12066	92.9663	-0.0326
SG6043	1.71	0.1768	143.0876	-0.0306
WORTMANN 63-137	1.8214	0.17088	120.0185	-0.0878

Los resultados del análisis de los 3 perfiles aerodinámicos presentados en la Tabla 2 se muestran en la Figura 2, donde se observa gráficamente la evaluación de los tres perfiles seleccionados para este estudio.

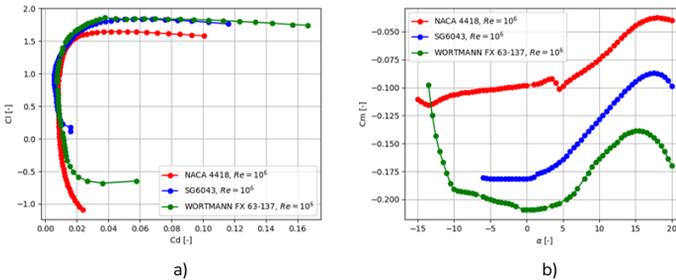


Figura 2. Parámetros para la selección del perfil aerodinámico a) mayor relación C_l/C_d b) Coeficiente de momento pequeño

Se determino implementar el perfil Wortmann 63-137, ya que, es el perfil que más se destaca en los tres criterios de selección del álabe establecidos anteriormente.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la geometría obtenida para el álabe de diseño, se observa como decrece tanto la cuerda como el ángulo de torsión representando una transición desde la raíz del álabe hasta la punta de la misma.

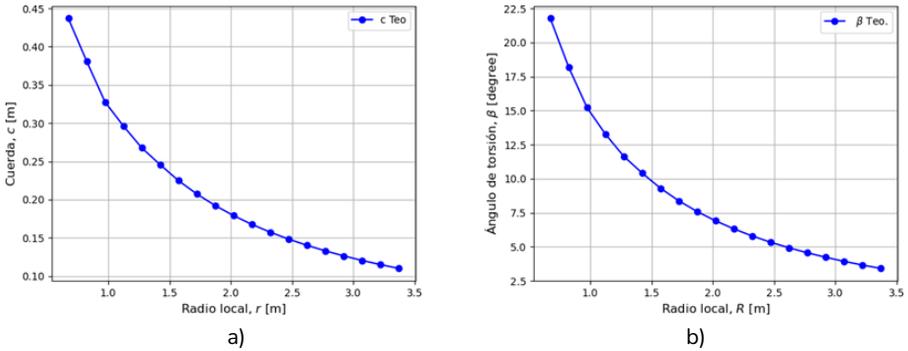


Figura 3. a) Cuerda del álabe b) Ángulo de torsión del álabe

La Figura 4a. muestra que el coeficiente de potencia máximo para el álabe sin considerar perdidas obteniendo un C_p de 0.46 y una potencia mecánica es de 15,614.17 kW.

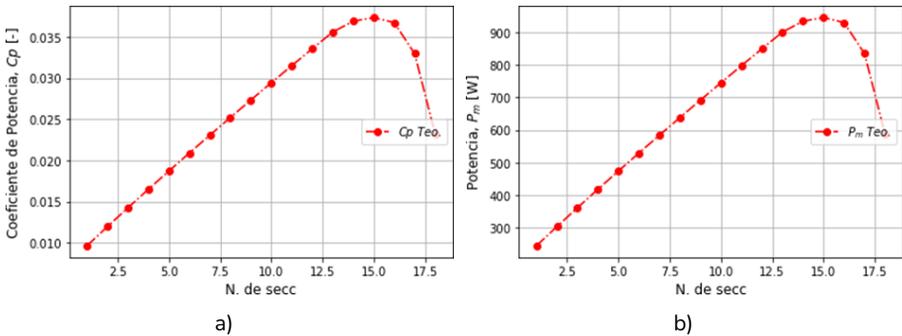


Figura 4. a) Coeficiente de potencia del álabe ideal b) Potenciaproducida por el álabe

En la Figura 5 se observa que los valores de torque axial son altos desde la raíz del álabe hasta la sección 15 y a partir de aquí decae, el torque axial que actúa en todo el álabe arroja un valor de 6295.87 Nm; mientras, que el torque tangencial muestra valores más pequeños que de la misma forma, incrementan hasta la sección número 15 y decrece, teniendo en total un valor de 825.23 Nm.

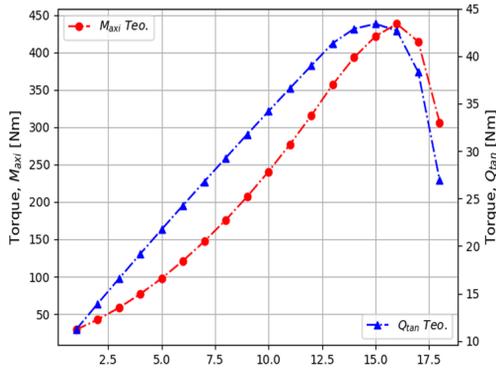


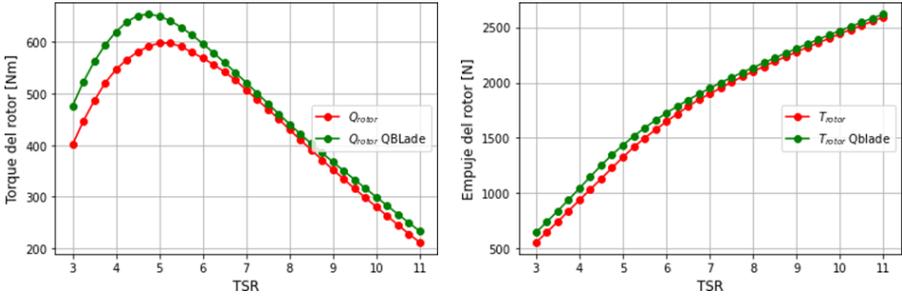
Figura 5. Torque axial y tangencial del álabe ideal

Las correcciones son importantes para una estimación precisa en el rendimiento del rotor, por ello durante el análisis aerodinámico es necesario introducir las pérdidas más comunes, como lo es, la pérdida en la punta de Prandtl, el cual presenta un panorama más cercano de la realidad del comportamiento del álabe con un número definido de álabes.

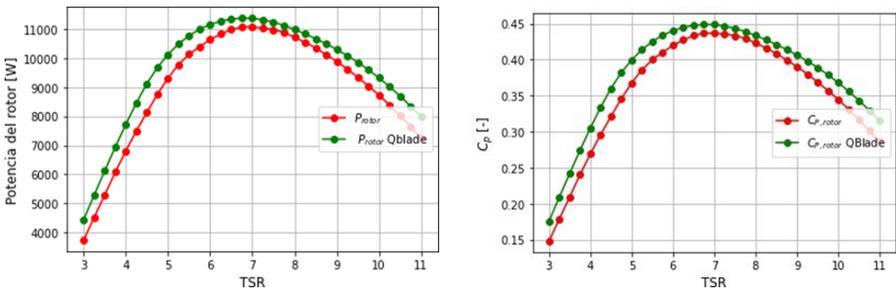
La Figura 6 muestra los resultados obtenidos de la geometría ideal sometida al método BEM donde en análisis toma en cuenta las pérdidas, y se presentan los resultados del software “QBlade”; para el análisis de estos resultados se toma un criterio de error entre el valor calculado por BEM y el valor obtenido por QBlade de un 5 %. Los resultados obtenidos a partir de la simulación en QBlade se muestran en la Tabla 4 donde muestra que el error cumple con el criterio mencionado.

Tabla 1. Resultados obtenidos de BEM y QBLade

	Torque del rotor (Nm)	Empuje del rotor (N)	Potencia del rotor (kW)	Cp (-)
BEM	507.46	1897	11,062.42	0.44
QBlade	525.17	1950	11,450	0.45
Error	3.36%	2.71%	3.38%	2.22%

**Figura 6.** a) torque del rotor para cada TSR evaluado b) empuje del rotor para cada TSR evaluado

La Figura 7a presenta la comparación entre la potencia del rotor BEM y la obtenida por QBlade. Mientras que en la figura 7b se muestra el rendimiento aerodinámico de dicho rotor, es decir, la eficiencia que es capaz de entregar tomando en cuenta las pérdidas.

**Figura 7.** a) Potencia del rotor para cada TSR b) Cp para cada TSR

Conclusiones

El diseño de rotores puede llevarse a cabo con distintas herramientas, en este trabajo se realizó a través de la aplicación del método matemático BEM. Se diseñó el rotor definiendo las características de la turbina eólica de 10 kW, utilizando el perfil WORTMANN63-137, el cual obtuvo los mejores resultados según los criterios de selección. Se obtuvieron resultados favorecidos en el análisis del álabe, ya que, al comparar las fuerzas, la potencia y el rendimiento, los resultados se encuentra dentro del margen establecido.

Referencias bibliográficas

- Brondsted, P. N. (2011). *Advances in wind turbine blade design and materials*. Philadelphia: Woodhead publishing.
- Burton, T. S. (2001). *Wind energy handbook*. England: WILEY.
- Hansen, M. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: EARTHSCAN.
- MANWELL, J. M. (2009). *Wind energy explained*. United Kingdom: WILEY

CAPÍTULO 4

CONVERTIDOR DE POTENCIA PARA SISTEMA EÓLICO DE BOMBEO DE AGUA CON ACOPLAMIENTO ELÉCTRICO

Javier Alonso Ramírez Torres¹, Antonio Verde Añorve², Orlando Lastres Danguillecourt³, Roberto Adrián González Domínguez⁴, Andrés López López⁵, Jesús Antonio Enríquez Santiago⁶, Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte⁷, Giovanni Hernández Galvez⁸

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, construcción y evaluación de un convertidor de potencia DC-AC para su aplicación en sistemas eólicos de bombeo de agua con acoplamiento eléctrico, sin bancos de baterías, con una capacidad nominal de 600 W. El convertidor de potencia acopla la fuente de generación a la carga, y permite el funcionamiento continuo del sistema desde la velocidad de viento de inicio hasta la de corte. Se implementó una topología en puente completo y la técnica de control SPWM. El trabajo se desarrolló en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Las pruebas se realizaron en condiciones controladas simulando el aerogenerador con una fuente programable de voltaje. Se hicieron dos pruebas, en la primera se simuló la región de operación del aerogenerador desde la velocidad de inicio hasta la nominal y en la

¹ El Mtro. Javier Alonso Ramírez Torres es alumno de doctorado en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Javier.ramirez@e.unicach.mx.

² El Dr. Antonio Verde Añorve es posdoctorante en el IIIER, aero.rto@gmail.com (autor correspondiente)

³ El Dr. Orlando Lastres Danguillecourt es profesor investigador del IIIER-UNICACH, orlando.lastres@unicach.mx (autor correspondiente)

⁴ El Mtro. Roberto Adrián González Domínguez es alumno de doctorado en el IIIER-UNICACH, roberto.gonzalezd@e.unicach.mx

⁵ El Dr. Andrés López López es Coordinador de investigación en la Universidad del Valle de México, campus Tuxtla, Chiapas. andres.lopez@uvmnet.edu

⁶ El Dr. Jesús Antonio Enríquez Santiago es profesor investigador en la Universidad del Istmo, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, jenriquez1055@sandunga.unistmo.edu.mx

⁷ El Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte es profesor investigador del IIIER-UNICACH guibdu@gmail.com

⁸ El Dr. Giovanni Hernández Galvez es profesor investigador de la Universidad Popular de la Chontalpa geovanni.hdez@upch.mx

segunda prueba se simuló desde la velocidad nominal hasta la de corte. Ambas pruebas se realizaron con 4 cargas hidráulicas diferentes, simulando de 7 m hasta 40 m de elevación equivalente a la carga máxima de la bomba. La eficiencia máxima fue de 96.5 %, además se obtuvo con la carga máxima y 180 V de voltaje a la entrada, un voltaje y potencia de salida de 120 V y 571 W respectivamente. Estos resultados corroboran la viabilidad del convertidor para su aplicación en bombeo de agua en zonas aisladas, constituyendo una alternativa energética sostenible.

Palabras claves. *Bombeo eólico, convertidor de potencia, energía eólica, acoplamiento eléctrico, puente completo*

Introducción

El bombeo de agua desempeña un papel crucial para el desarrollo de las actividades agrícolas y ganaderas. En sistemas de bombeo donde el acceso a la red eléctrica es limitado, la energía eólica representa una alternativa para satisfacer sus demandas energéticas (Zhang et al., 2017). Para el aprovechamiento de la energía eólica es necesario un sistema que permita convertir la energía cinética del viento en una forma útil de energía, como la eléctrica, para ello se implementan sistemas eólicos que operan interconectados a la red eléctrica o de forma aislada para cubrir las necesidades de energía eléctrica.

En los sistemas eólicos de bombeo aislados, se distinguen dos enfoques fundamentales: los que incorporan una etapa de almacenamiento energético, a través de bancos de baterías, y los que operan sin esta etapa de almacenamiento.

En la literatura, se estudian diferentes configuraciones de bombeo de agua con sistemas eólicos sin bancos de baterías, diferenciándose principalmente en el tipo de generador, motor de la bomba, convertidor y la metodología de control utilizada (Lara et al., 2011). Dentro de estos sistemas, destacan los que implementan generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG) y bombas accionadas por motores de inducción, debido a su sencillez y robustez. No obstante, la ausencia de una etapa de almacenamiento energético, significa que la energía fluye directamente del generador a la bomba, resultando en un flujo de potencia variable (Blaabjerg et al., 2004). Normalmente para regular el flujo de potencia en estos sistemas, se implementan convertidores de potencia. Estos dispositivos electrónicos regulan la energía generada por el aerogenerador y la consumida por la carga, asegurando la estabilidad del siste-

ma frente a las fluctuaciones inherentes al recurso eólico.

En este trabajo se diseñó, construyó y evaluó un convertidor de potencia DC-AC para operaren un sistema eólico de bombeo de baja potencia, constituido por un aerogenerador de potencia nominal de 600 W con un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes y una bomba eléctrica monofásica de ½ hp (carga), el cual se evaluó en el laboratorio de energía eólica del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas IIIER-UNICACH.

Características del sistema eólico de bombeo con acoplamiento eléctrico *Aerogeneradores de baja potencia*

Los aerogeneradores de baja potencia son equipos que convierten la energía cinética del viento a energía eléctrica con una capacidad menor a 100 kW (Commission, 2006). La Figura 1 ilustra la curva de potencia típica de un aerogenerador, delineando el comportamiento de la máquina a diferentes velocidades de viento. Estos equipos están diseñados para operar en un rango específico de velocidades de viento, acotado por dos velocidades de corte, identificadas como V_{corte1} y V_{corte2} . Por debajo de V_{corte1} el sistema no genera energía y para proteger el aerogenerador de una sobrecarga estructural, este debe de frenarse cuando la velocidad del viento sea superior a V_{corte2} . En la curva de potencia se identifican tres regiones operativas que reflejan un modo específico de funcionamiento del aerogenerador.

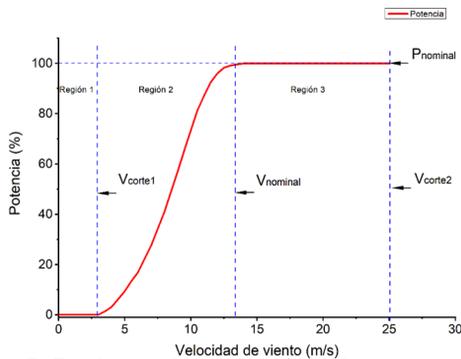


Figura 8. Regiones de operación del aerogenerador.

En este trabajo se considera un aerogenerador RTO600W marca RTO Energy con una potencia nominal de 600 W a 180 V en corriente continua.

Bombas eléctricas

Las bombas eléctricas son dispositivos compuestos por dos elementos: un impulsor y el motor eléctrico. El impulsor o bomba es un dispositivo mecánico que transforma energía mecánica (torque y velocidad del motor) en hidráulica (caudal y presión). Las bombas siguen un conjunto general de leyes de afinidad de velocidad, estas leyes definen la relación entre la velocidad de giro del impulsor (N) y un conjunto de variables: flujo (Q), presión (H) y potencia (P), que se representan en las siguientes ecuaciones (Nesbitt, 2006):

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^3 \quad (1)$$

En un motor de inducción la frecuencia del voltaje aplicado determina la velocidad del giro del rotor, según la siguiente ecuación (Chapman, 2012):

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{p} \quad (2)$$

Donde, f_e es la frecuencia del sistema en Hz, p es el número de polos de la máquina y n_{sinc} es la velocidad de sincronismo.

La técnica de control escalar fundamentado en cambios de frecuencia mientras se mantiene constante la relación V/f es un método empleado para el control de motores de inducción. La Tabla 1 muestra los parámetros de la bomba eléctrica implementada en este trabajo.

Tabla 1. Resultados obtenidos de BEM y QBLade

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia mecánica	P_{bom}	373	W
Corriente nominal	I_o	5	A
Voltaje eficaz	V_{bom}	120	V
Frecuencia nominal	f	60	Hz
Corriente pico	I_{pk}	19	A

Convertidor de potencia eléctrica

El convertidor de potencia es el dispositivo encargado de procesar y controlar el flujo de energía eléctrica suministrando voltajes y corrientes de forma óptima para las cargas (Bordry, 2004). En la Figura 2 se muestra el diagrama eléctrico de la etapa de potencia del convertidor DC-AC con topología en puente completo propuesto para el sistema. El dispositivo transforma un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada.

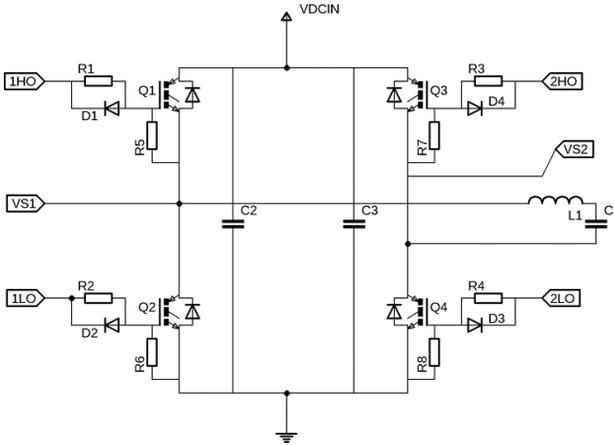


Figura 9. Esquema eléctrico del convertidor en puente completo implementado.

El convertidor implementa una modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM) unipolar para controlar el voltaje y frecuencia de salida del convertidor; esta proporciona las señales y secuencia de control de los transistores del puente para generar una señal senoidal a la salida. Estas señales se obtienen mediante la comparación de dos señales: la portadora y la moduladora, esta última proporciona los parámetros de la forma de onda deseada. La amplitud de la frecuencia fundamental del voltaje de salida es controlada por el índice de modulación en amplitud (m_a), que se define como la razón de la amplitud de las señales portadora y moduladora. Por consiguiente, el voltaje de salida del convertidor está dada por la ecuación 2.

$$V_o = m_a V_{dc} \quad (2)$$

Donde, V_o es la amplitud de la onda de salida, V_{dc} el voltaje en corriente directa en la entrada y m_a el índice de modulación en amplitud, cuyo valor va de 0 a 1.

Debido a las características generales del aerogenerador y de la bomba eléctrica seleccionada, el convertidor debe operar el sistema eólico en la región dos y tres de la curva de potencia del aerogenerador. El algoritmo de control desarrollado cuenta con 3 etapas, las cuales se describen a continuación.

Etapas 1: el control garantiza el arranque de la bomba, para ello el convertidor requiere un voltaje mínimo proporcionado por el aerogenerador. Durante el arranque se implementa una secuencia de arranque suave, que incrementa gradualmente el voltaje y la frecuencia de alimentación de la carga. Esta secuencia disminuye tanto el consumo de potencia como el par de arranque, previniendo vibraciones, lo que a su vez extiende la durabilidad tanto del motor como del sistema al que está acoplado.

Etapas 2: el control regula la potencia suministrada a la bomba de dos maneras:

La primera corresponde al modo de operación del aerogenerador en la región 2 (Figura 1); en este punto el convertidor regula voltaje y frecuencia para suministrar al motor la máxima potencia disponible en el viento. Para esto, el índice m_a se mantiene constante y garantiza el máximo voltaje de salida disponible, y la frecuencia es regulada en función del voltaje manteniendo una relación proporcional entre voltaje y frecuencia.

La segunda forma de regulación de potencia corresponde al modo de operación del aerogenerador en la región 3 (Figura 1), en este punto el convertidor regula la frecuencia y el voltaje de salida.

Etapas 3: el control cuenta con un sistema de paro, que opera cuando el voltaje excede el límite establecido (V_{corte2}) o cuando se determine de manera manual. Al igual que en el arranque, el paro de la bomba se implementa una secuencia de apagado suave, para eliminar vibraciones y limitar la corriente. El diagrama de flujo del algoritmo de control se muestra en la Figura 3.

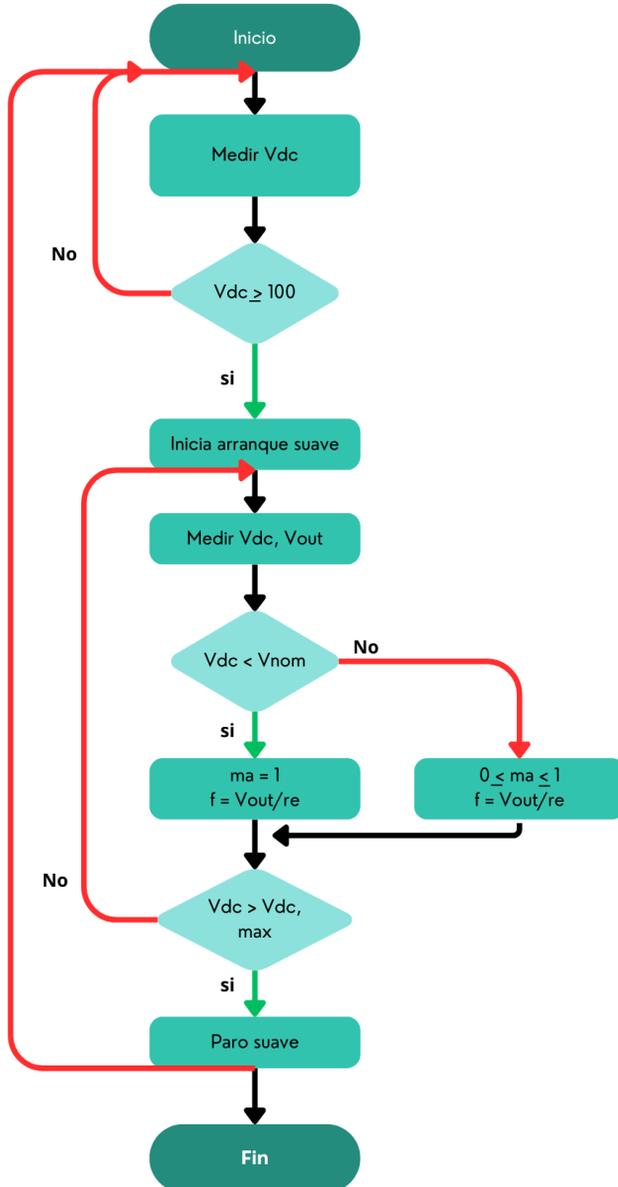


Figura 3. Diagrama de flujo de control del convertidor de potencia.

Construcción del convertidor

La Figura 4 muestra el prototipo de convertidor construido, en la sección 1 se encuentra la etapa de potencia, en la sección 2 la tarjeta de control, en la sección 3 el bloque con las protecciones y filtro de salida, y en la sección 4 la interfaz de configuración y visualización de los parámetros del convertidor.

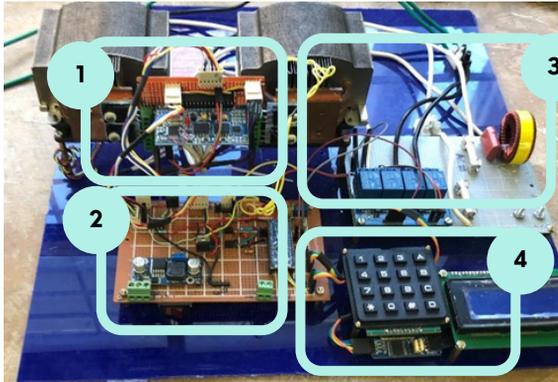


Figura 4. Prototipo de convertidor de potencia construido en el IIIER-UNICACH

La Tabla 2 presenta los requisitos de control y potencia del convertidor de potencia.

Tabla 2. Parámetros de potencia y control del convertidor.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia de salida nominal	P_{bom}	600	W
Corriente de salida nominal	I_o	5	A
Voltaje de salida eficaz	V_{bom}	0 - 120	V
Frecuencia	f	10 - 60	Hz
Voltaje entrada	I_{pk}	50 - 300	V

Metodología

La caracterización del convertidor en los dos modos de regulación de potencia se realizó bajo condiciones controladas en el laboratorio, simulando con una fuente programable de voltaje variable el voltaje de entrada al convertidor que proporciona el aerogenerador, las condiciones de las pruebas se describen a continuación:

Evaluación del convertidor en región de operación 2

En esta prueba se considera el voltaje de entrada del convertidor directamente proporcional a la velocidad del rotor eólico, por lo tanto, el índice de modulación en amplitud se mantiene constante e igual a 1. La frecuencia de salida se ajusta en función al voltaje de corriente alterna de salida, con una relación de 2 V/Hz para el control escalar de la bomba.

Evaluación del convertidor en región de operación 3

En esta prueba se considera el voltaje de entrada en corriente directa es igual al voltaje nominal del aerogenerador. El sistema de control de lazo cerrado regula el voltaje de salida automáticamente, variando m_a para mantener la relación V/f constante de 2 V/Hz.

La Figura 5 muestra el sistema de bombeo construido para la evaluación del convertidor de potencia. El sistema está compuesto por la bomba periférica BOAP-1/2 de 373 W (1/2 hp), un caudalímetro FS400A G1 con un rango de operación de 1-60 L/min y una presión de trabajo máxima de 1.2 MPa. Para simular la altura de bombeo se agregó una válvula de esfera con un rango de trabajo de 0° - 90°. Los ángulos de apertura fueron 0°, 45°, 58° y 67°, que corresponde a una altura de 5.5 m, 9 m, 18 m y 40 m respectivamente de acuerdo a la hoja de especificaciones del fabricante. El sistema recircula el agua en un contenedor de 200 L. La tubería, codos y uniones implementados son de PVC de 1 pulgada de diámetro.

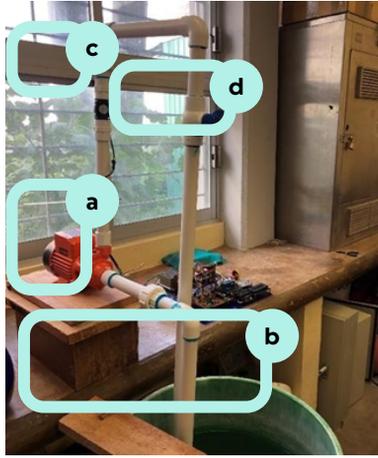


Figura 5. Sistema de bombeo constituido por los siguientes elementos: a) bomba periférica de $\frac{1}{2}$ hp, b) contenedor de agua, c) caudalímetro, d) válvula para simular carga de la bomba

La Figura 6 muestra el sistema de bombeo conectado al convertidor y la fuente de voltaje APS-1102 que simula al aerogenerador.

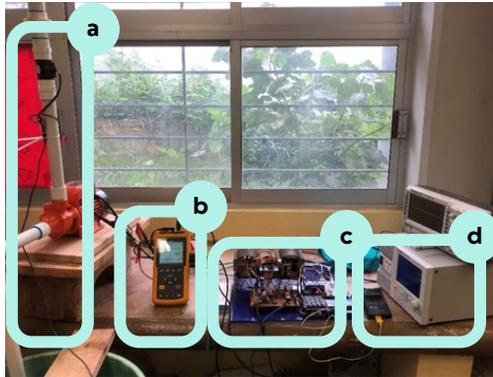


Figura 6. Sistema de bombeo conectado a convertidor, a) sistema de bombeo, b) Fluke 43b, c) Convertidor, d) Fuente Gwinstek APS-1102.

Análisis y discusión de los resultados

Resultados de la evaluación del convertidor de potencia en la región 2

La Figura 7 presenta los resultados del caudal obtenido a la salida. Se observa un comportamiento lineal del caudal, la potencia máxima de salida del convertidor fue de 571 W con un caudal de 2 L/min con carga nominal (simulando una elevación de 40 m) y un voltaje de entrada en corriente directa de 180 V.

Con esta prueba se determinó que el voltaje mínimo requerido para la operación de la bomba es de 50 Vdc, por debajo de este voltaje la bomba se detiene. El caudal máximo fue de 33.8 L/min a una potencia de 291 W con la carga mínima.

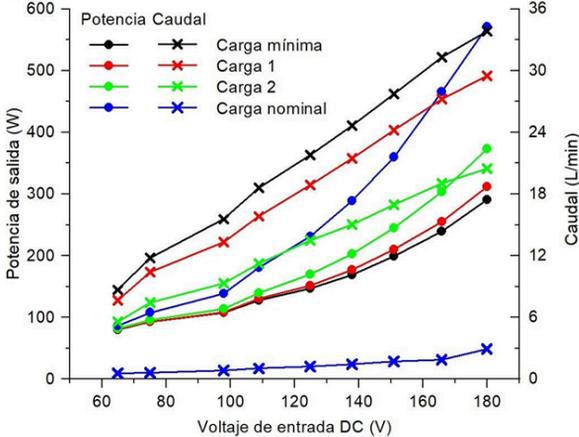


Figura 7. Comportamiento de la potencia de salida y caudal variando el voltaje de entrada en DC.

La Figura 8 presenta la eficiencia del convertidor bajo las condiciones de la prueba establecida. El convertidor trabajó con una eficiencia entre 87.4 % y 95.3 % con un voltaje de entrada de entre 50 Vdc y 180 Vdc, por lo tanto, se comprueba su factibilidad para aplicaciones en sistemas de bombeo eólico de acoplamiento eléctrico.

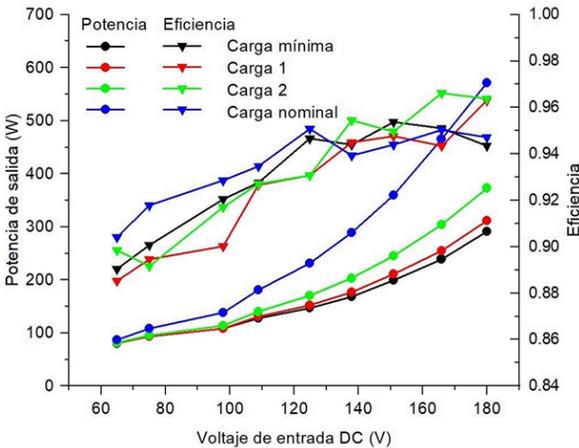


Figura 8. Comportamiento de la potencia de salida y eficiencia variando el voltaje de entrada en DC.

La Figura 9 presenta la distorsión armónica total (THD) de la señal de salida, esto con el fin de analizar la calidad de la señal, se obtuvo un máximo de THD de 3.6 % a 180 V y un mínimo de 2.1 % a 137 V para la carga mínima, con la carga nominal se obtuvo una THD entre 2.2 % y 3.1 %.

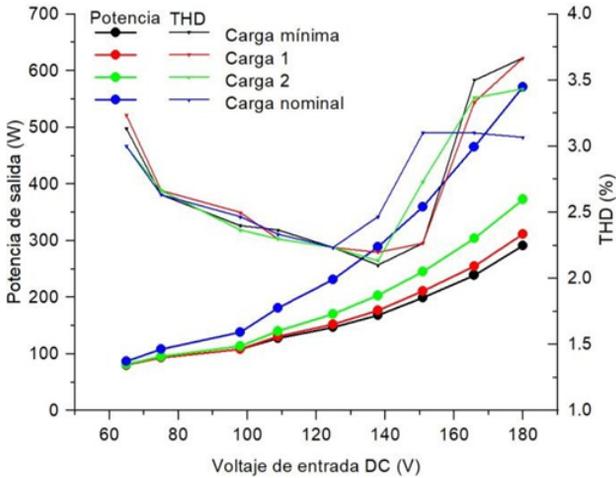


Figura 9. Comportamiento de la distorsión armónica total y potencia de salida variando el voltaje de entrada en DC.

Resultados de la evaluación del convertidor de potencia en la región 3

La Figura 10 presenta los resultados de la potencia de salida y el caudal de la bomba variando m_a con un voltaje de entrada en corriente directa constante de 180 V. Se obtuvo una potencia máxima a la salida del convertidor de 568 W a carga máxima con un flujo de 2.92 L/min a una elevación de 40 m, lo que equivaldría a extraer aproximadamente 4.2 m³/d en zonas de con vientos buenos o excelentes, y un flujo máximo de 34.79 L/min a 7 m de altura con una potencia de 291 W, lo que equivale a extraer aproximadamente 50 m³/d. El comportamiento del caudal es proporcional al m_a y la potencia de salida del convertidor tiene un comportamiento exponencial. Con esto se valida que es posible regular la potencia de salida del convertidor en función de m_a y operar al aerogenerador en la región 3.

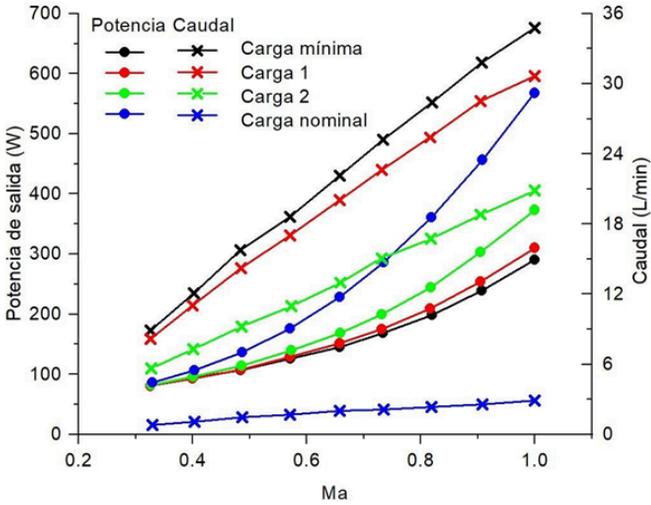


Figura 10. Comportamiento de la potencia de salida y caudal con Ma variable.

La Figura 11 presenta los resultados de eficiencia del convertidor, el convertidor operó con una eficiencia mínima de 82.9 % y una máxima de 96.5 %. Presentando una eficiencia superior al 90 % con ma mayor a 0.45 bajo cualquier condición de operación.

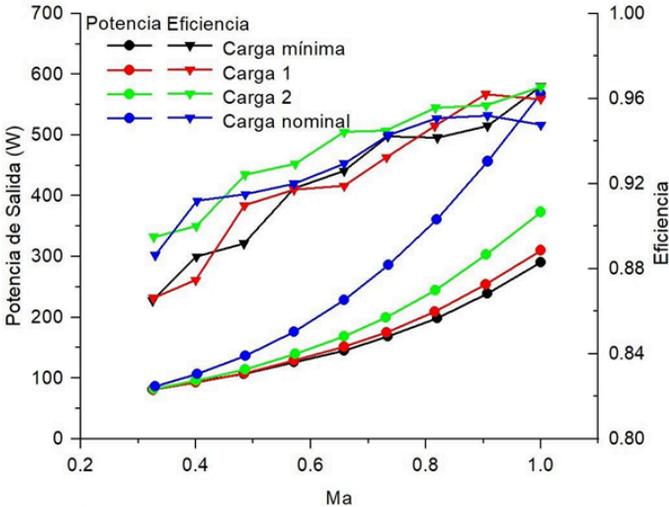


Figura 11. Comportamiento de la potencia de salida y eficiencia con Ma variable.

La Figura 12 muestra los resultados de la distorsión armónica total del convertidor. Se observa un comportamiento similar con las diferentes cargas. El convertidor alcanza un THD máximo de 3.8 % con m_a de 0.32. El THD mínimo es de 2 % y se obtiene con m_a de 0.7. Se valida el diseño del filtro de salida del convertidor al obtener una distorsión por debajo del 5 % en todo el rango de trabajo.

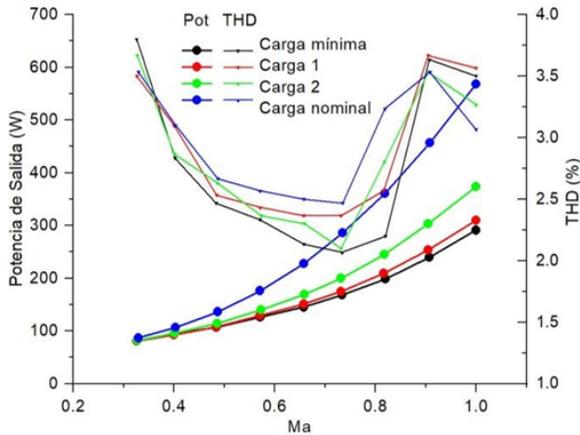


Figura 12. Comportamiento de la distorsión armónica total y potencia de salida con m_a variable.

Conclusiones

Se diseñó, construyó y evaluó un convertidor de potencia para su implementación en un sistema eólico de bombeo de agua con acoplamiento eléctrico en el IIER-UNICACH, Este convertidor se diseñó para satisfacer la demanda del recurso hídrico exclusivamente a través de la energía eólica, aumentando la eficiencia del sistema y reduciendo costos al eliminar la etapa de almacenamiento de energía. El convertidor permite operar un sistema conformado de una bomba de $\frac{1}{2}$ hp y un aerogenerador de 600 Wp.

La metodología de diseño permitió la implementación de un circuito de potencia constituido por una sola etapa activa para la conversión de energía; dicha etapa de potencia se basó en la topología de puente completo. Este diseño permitió la reducción de componentes implementados en la construcción del convertidor.

El dispositivo diseñado fue capaz de regular la potencia consumida por la bomba al regular la velocidad del motor de inducción que lo compone; para lograr este control de velocidad se implementó un control escalar V/f. Este control de potencia permitió operar el sistema eólico tanto en su región de potencia variable (región 2) y su región de potencia regulada (región 3). Además, el algoritmo de control implementado permitió operar la bomba a una velocidad mínima del 25 % de su nominal.

Se caracterizó al convertidor de potencia a nivel laboratorio a través de dos evaluaciones establecidas con diversos niveles de carga. La potencia máxima entregada por el convertidor fue de 571 W. La distorsión armónica total obtenida en todo el rango de operación del sistema fue menor al 5 %, con lo cual cumple con la norma IEEE 519. La eficiencia del convertidor osciló entre de 82.9 % a 96.5 %.

Referencias bibliográficas

- Blaabjerg, F., Chen, Z., & Kjaer, S. B. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1184–1194. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833453>
- Bordry, F. (2004). Power converters: definitions, classification and converter topologies. CAS - CERN Accelerator School and CLRC Daresbury Laboratory: Specialised CAS Course on Power Converters, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, Toulouse, France, 13–42.
- Breeze, P. (2016). Chapter 1 - An Introduction to Wind Power (P. B. T.-W. P. G. Breeze, Ed.; pp. 1–8). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804038-6.00001-3>
- Chapman, J. S. (2012). MÁQUINAS ELÉCTRICAS (Quinta). McGraw Hill.
- Commission, T. I. E. (2006). EC 61400-2:2013. Wind turbines – Part 2: Small wind turbines. In 61010-1 © lec:2001 (Vol. 2006).
- Lara, D. D., Merino, G. G., Pavez, B. J., & Tapia, J. A. (2011). Efficiency assessment of a wind pumping system. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.004>
- Nesbitt, B. (2006). *Handbook of Pumps and Pumping* (1st ed.). Elsevier Ltd.
- Truper. (2020). BOMBA ELÉCTRICA PERIFÉRICA BOAP-1/2A. https://www.truper.com/ficha_merca/ficha-print.php?code=15759
- Zhang, J., Qi, Z., & Wen, J. (2017). Control of water pumping driven by wind turbine based on Quasi Z source inverter. *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress*, CAC 2017, 2017-Janua, 7074–7077. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8244053>

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DE PELÍCULAS DELGADAS Y DISPOSITIVOS BASADOS EN EL COMPUESTO $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)

Rubí Gisel Sotelo Marquina¹, Tenoch González Sánchez², Erika Miranda Mandujano², Noé de la Cruz Santiago³, Geovanni Hernández Galvez³, Omar Sarracino Martínez³

Resumen

El grupo de investigación de la Universidad Popular de la Chontalpa en colaboración con instituciones de la región sureste propone realizar esfuerzos para estudiar y optimizar los procesos involucrados para desarrollar películas y dispositivos de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ con estructura tetragonal tipo kesterita bajo la técnica de evaporación térmica y empleando como precursores elementos abundantes y no tóxicos (CuS, ZnS y SnS). La optimización de procesos involucrados será estudiada bajo la influencia de la secuencia del depósito de las capas binarias, la temperatura del sustrato y la duración de la razón de depósito, así como los procesos de cristalización de películas bajo atmósferas reactivas, duración de los tratamiento térmico y optimización de los procesos involucrados en el desarrollo de una celda solar. Las películas y dispositivos serán caracterizados mediante las técnicas: XRD, SEM, RAMAN, mediciones ópticas y eléctricas. Lo anterior permitirá atender con mayor eficacia los retos planteados, lográndose aportes significativos en la generación de nuevo conocimiento científico y tecnológico.

Palabras claves. *Película delgada, CZTS, tratamiento térmico, evaporación térmica, celda solar.*

¹ Estudiante del Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. rubi@gmail.com.

² Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad S/N, Col. Magisterial, Villahermosa, México, tenoch@ier.unam.mx; erika.miranda@ujat.mx

³ Universidad Popular de la Chontalpa, Cárdenas, Tabasco México, noe_air@hotmail.com, geovanni.hdez@upch.com, omar.sarracino@upch.mx (autor correspondiente)

Introducción

Los combustibles fósiles empleados para la generación de energía eléctrica ha sido la mayor fuente de energía, con un 81 % aproximadamente del consumo total de energía mundial (Asakereh et al., 2022). En las últimas décadas la demanda de energía ha aumentado principalmente a la rápida globalización, a la mejora del nivel de vida y el aumento de la población mundial (Asakereh et al., 2022; Mitra et al., 2023). Las exigencias en la demanda de energía inevitablemente están asociada a la emisión de gases de efecto invernadero que provocan impactos dañinos al medioambiente (Yu et al., 2022). La innovación en tecnologías de energía renovable puede ayudar a establecer y promover patrones de producción y consumo de energía más limpios, garantizar un proceso de transición energética (Amrillah, 2023; Lin & Xie, 2023). Existen dispositivos que pueden convertir y almacenar energía para generar electricidad, como dispositivos fotovoltaicos, reactores de hidrógeno, baterías, supercondensadores y nanogeneradores (Amrillah, 2023). Entre las tecnologías de energía renovable y limpias, las celdas solares presentan gran atención no sólo por la generación de energía a gran escala, sino también por sus aplicaciones en pequeña escala, como celdas solares integradas en tela, bolsa, escritorio entre otras aplicaciones (Amrillah, 2023).

Actualmente se están desarrollando materiales y optimizando procesos para formar celdas solares con elementos más baratos, menos tóxicos y más abundantes en la corteza terrestre. Entre los materiales destaca el semiconductor tipo kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS); siendo este compuesto cuaternario el objetivo de varios trabajos derivado a que i) sus constituyentes tienen abundancia natural, son económicos y no tóxicos (Paranthaman et al., 2016), ii) presenta valores óptimos de brecha de energía de 1.4-1.6 eV (Liu et al., 2021) y un gran coeficiente de absorción $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ (Kaza et al., 2020). Por lo anterior, la estructura CZTS es considerada un excelente absorbedor con propiedades fotovoltaicas prometedoras que lo convierten en un candidato ideal para su uso en celdas solares y sustituir las capas CdTe, CIGS, CdSe, InP y GaAs que muestran alto costo, baja abundancia y componentes tóxicos (HefaUain et al., 2021). Actualmente la eficiencia de conversión de los dispositivos basados en $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ es del 13,5 % (X. Xu et al., 2021), baja para lo que se espera obtener teóricamente de 33.16 % de acuerdo con el límite de Shockley-Queisser (Olgar et al., 2021) (Shockley, 1961).

Se requiere de un mayor entendimiento en el desarrollo de los materiales y optimización en los procesos que involucra la formación de las celdas solares que permitan alcanzar la eficiencia teórica. Entre los temas destaca, la búsqueda del método ideal de depósito que es objeto de investigación por varios grupos y que utilizan procesos físicos (Ferdaous et al., 2018; Khemiri et al., 2020; Oulad Elhmaidi et al., 2022) o químicos (Ahmoum et al., 2021; Azmi et al., 2020; Deokate et al., 2022). Además de otros factores críticos que impiden los avances en el desarrollo y la optimización de CZTS que incluyen i) orden ideal de apilamiento de los precursores metálicos o binarios a depositar (Olgar et al., 2021), ii) eliminación de la formación de fases secundarias debido al inadecuado control en la estequiometría, y la falta de optimización de los parámetros de crecimiento (temperatura de sustrato, espesor de las capas absorbedores y presión de depósito) (Sánchez et al., 2016; J. Xu et al., 2021), iii) en lo referentes a tratamientos post depósito falta optimizar la temperatura y tiempo de sulfurización (Olgar, 2019), iv) rampas de calentamiento en los tratamientos térmicos (Agrawal et al., 2022), v) así como la presión de los tratamientos térmicos y vi) optimización de los procesos involucrados en el desarrollo de una estructura de celda solar. Por lo anterior, la obtención del CZTS en su fase pura, sigue siendo un desafío que requiere de mayor entendimiento y optimización de varios de los procesamientos involucrados para generar celdas solares de alta eficiencia. Además, de que muchos de estos factores no solo son importantes para el mejoramiento de la eficiencia de conversión solar, también son para determinar el precio y procesos amigables con el medio ambiente en el dispositivo final de la celda solar de CZTS.

Metodología

Las películas cuaternarias de CZTS serán formadas mediante la evaporación térmica en alto vacío con múltiples fuentes, debido a la flexibilidad que presenta esta técnica para depositar distintos materiales con fácil control sobre el espesor y composición de las películas. La obtención de la fase pura del CZTS depende de varios factores que deben ser investigados como son las condiciones de evaporación y orden de apilamiento de los precursores, así como los tratamientos post-depósito. En este trabajo las películas serán preparadas usando sulfuros binarios (CuS (99 %), SnS (99 %) y ZnS (99 %) depositas sobre sustratos de vidrio Corning por evaporación secuencial bajo diferentes ordenes de apilamiento. Durante el depósito el vacío será mantenido

a 1×10^{-5} Torr y el sustrato se mantendrá rotando de manera continua para obtener depósitos uniformes y, a su vez, se calentará empleando diferentes temperaturas, desde el ambiente hasta 250°C.

Los diferentes valores en la estequiometría de las películas podrán ser controlados mediante el ajuste de la razón de evaporación de cada uno de los compuestos dando lugar a un amplio espectro de posibles rutas en la obtención de las películas con diferentes fases y estructuras siendo todo un reto poder cristalizar en la fase pura. Es por ello que las películas al finalizar el depósito serán sometidas a tratamientos térmicos o comúnmente llamados tratamientos post-depósitos con el propósito de eliminar las posibles fases secundarias o ternarias. Los procesos a estudiar en esta etapa consisten en la cristalización bajo atmósferas reactivas variando parámetros tales como: rampa de calentamiento, temperaturas y duración de los tratamientos térmicos. Optimizado el proceso de depósito, así como el desarrollo de las películas delgadas de CZTS, se realiza la formación de una estructura p-n. La estructura CdS/Cu₂ZnSnS₄ será formada por el depósito de Cu₂ZnSnS₄ sobre una película de CdS de aproximadamente 100 nm. La película de Cu₂ZnSnS₄ actúa como el material absorbedor tipo p, y la película de CdS actúa como material ventana tipo n. Un punto muy importante a considerar en esta parte es la temperatura de sustrato, ya que la influencia de la temperatura puede afectar la calidad de la película de CdS. Un estudio es necesario en este punto para poder seleccionar la técnica adecuada en la formación de CdS así como las condiciones adecuadas para depositar Cu₂ZnSnS₄ sobre CdS. Por lo anterior, las técnicas de caracterización empleadas en las películas y dispositivos serán mediante las técnicas: difracción de X-ray (XRD), microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopía RAMAN, mediciones ópticas y eléctricas. Lo anterior permitirá entender con mayor eficacia los retos planteados, lográndose aportes significativos 1) en la generación de nuevo conocimiento científico y tecnológico que contribuya a la consolidación de procesos para el desarrollo de películas en su fase Cu₂ZnSnS₄ y 2) el desarrollo de una estructura de celda solar basada en película delgada de CdS/Cu₂ZnSnS₄.

Análisis y discusión de los resultados

Se depositaron precursores de CuS, SnS y ZnS de manera simultánea y de forma escalonada. En el proceso escalonado o por capas se formaron películas

de CZTS con mayor reproducibilidad a diferencia de la forma simultánea donde fue difícil obtener películas con características ópticas reproducibles.

Por lo anterior, películas depositadas capa por capa fueron sometidas a un tratamiento post-depósito bajo una atmósfera de Ar + S a temperaturas de 400°C – 550°C por tiempos de 10 min – 20 min.

Las películas con mejores características estructurales, morfológicas y optoelectrónicas fueron observadas bajo una temperatura de tratamiento de 550°C y un tiempo de 10 min. La Figura 1 muestra los patrones de XRD de películas formadas a través del apilamiento de CuS - SnS - ZnS (a) sin tratamiento térmico, y tratadas térmicamente a 550°C por 10 min. La Figura 1a muestra una película sin tratamiento con picos de difracción que pueden ser indexados de acuerdo a las fases binarias de CuS (PDF 06- 0404) y SnS (PDF39-0354) correspondientes a los planos (100) y (004), así como como un pico en el plano (314) característico de Cu_2SnS_3 . En la Figura 1b se muestra que bajo el tratamiento térmico se observan picos más definidos e intensos, mostrando una evolución hacia la cristalización en la película. Lo anterior es debido a que las fases secundarias desaparecen y la intensidad en los planos (200), (220), (132), (224) se intensifican con una fuerte orientación preferencial en el plano (112).

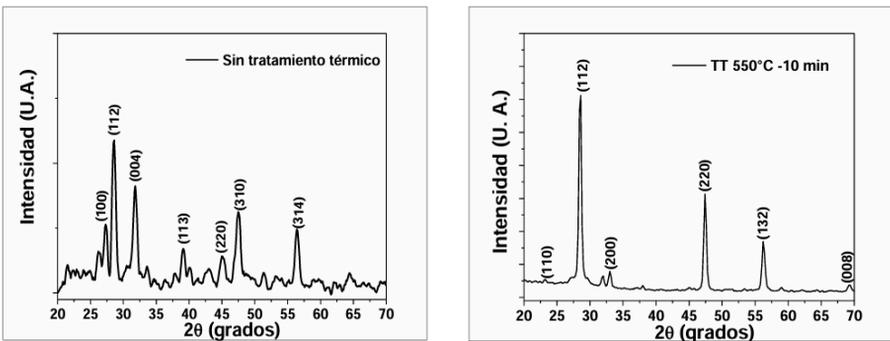


Figura 1. Patrones de XRD de películas delgadas de CZTS a) sin tratamiento térmico, y b) sometida a una atmósfera de Ar + S a 550 °C por 10 min.

Para confirmar la formación de CZTS utilizamos el análisis Raman como método complementario para ubicar sus picos característicos en 252 cm^{-1} , $(287-289)\text{ cm}^{-1}$, $(337-338)\text{ cm}^{-1}$, 351 cm^{-1} , $(368, 372-374)\text{ cm}^{-1}$ (Fontané et al., 2012; Sánchez et al., 2016). La Figura 2 presenta evidencia de una estructura CZTS, las posiciones de sus picos Raman muestran modos de vibración alrededor de 338 cm^{-1} y 288 cm^{-1} que se identifican con modos de simetría "A" del CZTS.

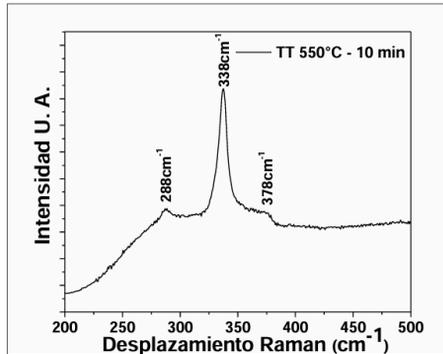


Figura 2. Espectro Raman de una película de CZTS sometida a una atmósfera de Ar + S a 550 °C por 10 min.

La Figura 3 muestra una imagen de SEM de una película tratada 550 °C por un tiempo de 5 min. La película presenta una superficie compacta y granular, lo que indica que bajo el tratamiento realizado se favorece una mezcla homogénea de los elementos constituyentes que mejora la calidad cristalina

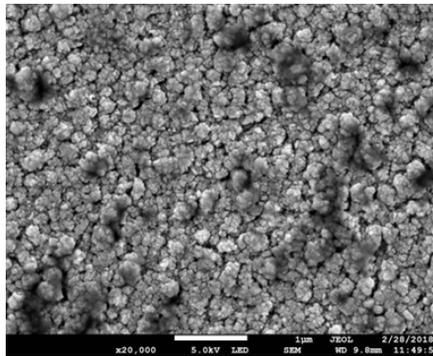


Figura 3. Imagen de SEM de película delgada de CZTS sulfurizadas en Ar + S a 550 °C por 10 min.

Las propiedades ópticas de las películas tratadas fueron estudiadas a partir de los espectros de transmitancia UV-Vis en el rango de 400 – 1100 nm. La brecha de energía fue estimada de la gráfica Tauc usando la fórmula de transición directa, Ec.1. Donde α es el coeficiente de absorción, $h\nu$ es la energía del fotón, c es una constante y E_g^d es la brecha de banda directa (Palomera et al., 2017).

$$(\alpha h\nu)^2 = c(h\nu - E_g^d) \quad (1)$$

En la Figura 4 el valor de brecha de energía fue obtenido por la extrapolación de la región lineal de $(\alpha h\nu)^2$ vs $(h\nu)$ y tomando la intersección en el eje x donde $y=0$. La película sometida a un tratamiento térmico de 550 °C por 10 min presenta un valor en su brecha de energía de 1.48 eV, obtenida cuando la película presenta una mejora en su cristalinidad como se mostró en el análisis de rayos X (Sivagamaï & Geetha Priyadarshini, 2020).

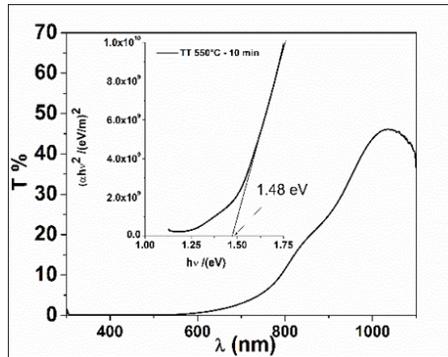


Figura 3. Transmitancia (T%) de una película sulfurizadas en Ar + S a 550 °C por 10 min. La grafica insertada muestra $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ para la estimación de la brecha de banda.

El efecto del tratamiento térmico a 550 °C por 10 min fue investigado sobre los parámetros eléctricos de un dispositivo de CZTS/CdS. La variación del voltaje a circuito abierto (V_{oc}), densidad de corriente a cortocircuito (J_{sc}), factor de forma (FF), resistencia en serie (R_{sh}) y resistencia en paralelo (R_{sh}) se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fotovoltaicos de una celda solar CZTS/CdS. La película de CZTS fue tratada bajo una atmosfera de Ar + S a 550 °C por 10 min.

Celda solar	h (%)	FF (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rs Ohm* m ²	Rsh Ohm* m ²
M11	0.95	23.4	16.37	410	32.5	179.2

Conclusiones

Películas delgadas de CZTS se lograron formar por la evaporación térmica de sulfuros binarios de CuS, SnS y ZnS. El orden de orden de apilamiento que favorece la orientación preferencial hacia la fase kesterita es: Sustrato/CuS/SnS/ZnS.

Los tratamientos térmicos bajo una atmósfera de azufre y temperaturas superiores a 500 °C presentan una orientación preferencial hacia la estructura kesterita con una disminución en fases secundarias. Sin embargo, bajo una temperatura de 550 °C por 10 min y 5 mg de azufre se confirma a través de XRD la formación de CZTS en fase kesterita al observarse un pico intenso en el plano (112) y un pico característico de CZTS en 388 cm⁻¹, mediante Raman. Las películas bajo las condiciones mencionadas muestran valores en su brecha de energía en 1.48 eV y una mejor cristalización con granos más uniformes y compactos. Con las condiciones de procesamiento implementadas un prototipo de celda solar fue desarrollada con una eficiencia de aproximadamente 1%

Se requieren de más estudios, haciendo énfasis a la optimización de la estequiometría en los compuestos binarios, espesor de las películas y tratamientos post-depósito para lograr una película absorbadora de CZTS en su fase pura. Así mismo estudiarla influencia de los tratamientos térmicos en los dispositivos de celda solar.

Referencias bibliográficas

- Agrawal, S., Balasubramanian, C., Mukherjee, S., Kanani, R., Madapu, K. K., & Dhara, S. (2022). Effect of heating rate and precursor composition on secondary phase formation during Cu₂ZnSnS₄ thin film growth and its properties. *Thin Solid Films*, 741(May 2021), 139029. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139029>
- Ahmoum, H., Li, G., Su'ait, M. S., Boughrara, M., Chelvanathan, P., Khaaissa, Y., Kerouad, M., & Wang, Q. (2021). The impact of precursor thickness and surface roughness on the power factor of Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) at near room temperature: Spin-coating deposition. *Superlattices and Microstructures*, 160(October), 107091. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.107091>
- Amrillah, T. (2023). Enhancing the value of environment-friendly CZTS compound for next generation photovoltaic device: A review. *Solar Energy*, 263, 111982. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111982>
- Asakereh, A., Soleymani, M., & Safieddin Ardebili, S. M. (2022). Multi-criteria evaluation of renewable energy technologies for electricity generation: A case study in Khuzestan province, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PC), 102220. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102220>
- Azmi, S., Moujib, A., Layachi, O. A., Matei, E., Galca, A. C., Zaki, M. Y., Secu, M., Rusu, M. I., Grigorescu, C. E. A., & Khomri, E. M. (2020). Towards phase pure kesterite Cu₂ZnSnS₄ absorber layers growth via single step free sulfurization electrodeposition under a fix applied potential on Mo substrate. *Journal of Alloys and Compounds*, 842, 155821. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155821>
- Deokate, R. J., Chavan, H. S., Im, H., & Inamdar, A. I. (2022). Spray-deposited kesterite Cu₂ZnSnS₄ (CZTS): Optical, structural, and electrical investigations for solar cell applications. *Ceramics International*, 48(1), 795–802. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.160>
- Ferdaous, M. T., Chelvanathan, P., Shahahmadi, S. A., Sapeli, M. M. I., Sopian, K., & Amin, N. (2018). Compositional disparity in Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) thin film deposited by RF-sputtering from a single quaternary compound target. *Materials Letters*, 221, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.098>
- Fontané, X., Izquierdo-Roca, V., Saucedo, E., Schorr, S., Yukhymchuk, V. O., Valakh, M. Y., Pérez-Rodríguez, A., & Morante, J. R. (2012). Vibrational properties of stannite and kesterite type compounds: Raman scattering analysis of Cu₂(Fe,Zn)SnS₄. *Journal of Alloys and Compounds*, 539, 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.06.042>

- HefaUain, S., Kumar Swami, S., Dutta, V., & Narain Sharma, S. (2021). Impact on Structural, Morphological, and compositional properties of CZTS thin films annealed in different environments. *Inorganic Chemistry Communications*, 133, 108879. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108879>
- Kaza, J., Pasumarthi, M. R., & Avadhani, P. S. (2020). Superstrate and substrate thin film configuration of CdS/CZTS solar cell fabricated using SILAR method. *Optics and Laser Technology*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106413>
- Khemiri, N., Chamekh, S., & Kanzari, M. (2020). Properties of thermally evaporated CZTS thin films and numerical simulation of earth abundant and non toxic CZTS/Zn(S, O) based solar cells. *Solar Energy*, 207, 496–502. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.114>
- Lin, B., & Xie, J. (2023). The role of renewable energy alliances in enhancing corporate innovation: Evidence from China. *Renewable Energy*, 219(P1), 119415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119415>
- Liu, W. S., Chen, S. Y., Huang, C. S., Lee, M. Y., & Kuo, H. C. (2021). Investigation of Zn/Sn ratio for improving the material quality of CZTS thin films with the reduction of Cu_{2-x}S secondary phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 157237. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157237>
- Mitra, M., Singha, N. R., & Chattopadhyay, P. K. (2023). Review on renewable energy potential and capacities of South Asian countries influencing sustainable environment: A comparative assessment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103295>
- Olgar, M. A. (2019). Optimization of sulfurization time and temperature for fabrication of Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) thin films. *Superlattices and Microstructures*, 126, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.12.012>
- Olgar, M. A., Sarp, A. O., Seyhan, A., & Zan, R. (2021). Impact of stacking order and annealing temperature on properties of CZTS thin films and solar cell performance. *Renewable Energy*, 179, 1865–1874. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.023>
- Oulad Elhmaidi, Z., Saucedo, E., Abd-Lefdil, M., & el Khakani, M. A. (2022). Substrate temperature optimization of pulsed-laser-deposited and in-situ Zn-supplemented-CZTS films and their integration into photovoltaic devices. *Journal of Alloys and Compounds*, 893, 162292. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162292>
- Palomera, R. C., Martínez, O. S., Pantoja-Enriquez, J., Mathews, N. R., Reyes-Banda, M. G., Krishnan, B., & Mathew, X. (2017). Development and studies of Cd_{1-x}Mg_xTe thin films with varying band gaps to understand the Mg incorporation and the related material properties. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1169–1175. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.163>

- Paranthaman, M. P., Wong-Ng, W., & Bhattacharya, R. N. (2016). Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells. In M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, & R. N. Bhattacharya (Eds.), *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells*. 218. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20331-7>
- Sánchez, T. G., Mathew, X., & Mathews, N. R. (2016). Obtaining phase-pure CZTS thin films by annealing vacuum evaporated CuS/SnS/ZnS stack. *Journal of Crystal Growth*, 445, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.03.039>
- Shockley, W. (1961). The Shockley-Queisser limit. *J. Appl. Phys*, 32(3), 510–519.
- Sivagamai, D., & Geetha Priyadarshini, B. (2020). Composition dependent structural, morphological, optical and electrical properties of CdS:Co window layer grown by chemical bath deposition. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 709–718. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.08.001>
- Xu, J., Yang, J., Jiang, S., & Shang, S. (2021). Secondary phases and disorder degree investigation of Cu₂ZnSnS₄ films. *Ceramics International*, 47(3), 4135–4142. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.290>
- Xu, X., Guo, L., Zhou, J., Duan, B., Li, D., Shi, J., Wu, H., Luo, Y., & Meng, Q. (2021). Efficient and Composition-Tolerant Kesterite Cu₂ZnSn (S, Se)₄ Solar Cells Derived From an In Situ Formed Multifunctional Carbon Framework. *Advanced Energy Materials*, 11(40), 2102298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aenm.202102298>
- Yu, J., Tang, Y. M., Chau, K. Y., Nazar, R., Ali, S., & Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating CO₂ emissions: Evidence from quantile-on-quantile estimation. *Renewable Energy*, 182, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.002>

CAPÍTULO 6

COMPARATIVO DEL SECADO SOLAR DE HOJA DE NARANJA EN UN SECADOR SOLAR TIPO GABINETE Y SECADO SOLAR A CIELO ABIERTO

Margarita Castillo Téllez¹, Beatriz Castillo Téllez², Gerardo Alberto Mejía Pérez², Juan C. Camacho Chab¹, Juan Carlos Percino Picazo¹

Resumen

La naranja amarga es un árbol originario de Asia, la hoja de este árbol es utilizada ampliamente en muchos lugares del mundo tanto para el aprovechamiento de su valor alimenticio y medicinal, como para la elaboración de perfumes, agua de azahar, licores, confituras y aceite esencial. En Tabasco, Yucatán y Campeche se cultiva ampliamente esta variedad de naranja. En este trabajo se presentan las cinéticas de la deshidratación de las hojas de naranja amarga y la velocidad de en un secador solar tipo gabinete con convección natural, forzada y cielo abierto con tiempos de secado entre 270, 340 y 420 minutos respectivamente. La humedad inicial varió entre 80 % y 83 %, la humedad final se midió entre 6.45 % y 9 %. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, localizada a 9°51'00" de LN y 90°31'59" de LO, con clima cálido húmedo, con humedad relativa promedio anual de 60 % y con valores de irradiancia máximos promedio de 900 W/m². Los resultados obtenidos muestran la factibilidad técnica del secado solar de las hojas de naranja amarga, mediante el uso de secadores solares al obtener un producto de alta calidad, un valor agregado y en condiciones de comercializarse en el mercado nacional, alentando su producción en México.

¹ La Dra. Margarita Castillo Téllez es profesora-investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, Camp., México. mcastill@uacam.mx (autor correspondiente).

² La Dra. Beatriz Castillo Téllez es profesora investigadora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal. lbeatriz.castillo@academicos.udg.mx

² El Mtro. Gerardo A. Mejía Pérez es Coordinador de Extensión y Acción Social de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal. gerardo.mejia@reduug.udg.mx

¹ Dr. Juan C. Camacho Chab. Es profesor investigador del Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología la Universidad Autónoma de Campeche. Camp., México juanccam@uacam.mx

¹ Dr. Juan Carlos Percino Picazo es Investigador por México en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, Camp., México. jcpep@ier.unam.mx

Palabras claves. *Secado solar, condiciones controladas, irradiancia solar, secador solar directo, velocidad de secado*

Introducción

El Naranja Amargo (*Citrus aurantium*) actualmente se cultiva en países de clima subtropical a cálido; requiere de terrenos soleados, bien drenados, ligeramente ácidos y ricos en humos. Es un árbol de hoja perenne de 8-10 m de altura, y abundante follaje, tronco grueso, erecto; corteza suave, café ramas verdes, espinas no muy puntiagudas de 2 a 8 cm de largo. Hojas elípticas o lanceoladas de color verde intenso, de aproximadamente 8 cm de largo y de 4 a 8 cm de ancho con el ápice agudo, sinuosas o crenadas, alternas, brillantes, con pequeñas glándulas de aceite, peciolo alado, ancho, de 6 a 13 cm de longitud; las flores muy aromáticas (conocidas popularmente como azahares), blancas o rosadas (SADER, 2017). El naranja amargo es la especie más perfumada de las 15 que comprende el género *Citrus*. La cáscara, la flor, la hoja y la corteza de la fruta se utilizan en medicina tradicional y moderna, tiene propiedades tranquilizantes, antiespasmódicas, digestivas, antifebrífugas, ligeramente sedantes y reguladoras del intestino. La infusión preparada con las hojas se utiliza para el tratamiento de afecciones digestivas (cólicos, dispepsia, inapetencia, náuseas), además, es ampliamente utilizada en afecciones respiratorias (bronquitis, tos, resfríos), tanto las hojas como la flor son excelentes ansiolíticos naturales que la naturaleza puede brindar porque actúa sobre los órganos que se ven afectados por la ansiedad, relajan el cuerpo, y son muy útiles en casos de gastritis nerviosa, cólicos, diarrea, estreñimiento y dolores intestinales a nivel general (S. Jorge Cruz Suárez, 2007).

Secado solar de la hoja de naranja amarga.

Existen una importante cantidad de publicaciones de deshidratado de diferentes tipos de hojas como son ajenojo, caléndula, tomillo, salvia, orégano, lavanda y menta, mencionando los que más abundan en la literatura (Banchemo et al., 2007).

El proceso de secado consiste en la extracción del agua en exceso y para cada hierba existen valores preestablecidos de contenido de agua exigidos para su comercialización en seco, los cuales varían entre 9 % y 10 %. Un correcto seca-

do permite evitarla proliferación de microorganismos, evitar cambios de color y ennegrecimiento, lograr un producto homogéneo, de buen color y la conservación de esencias y sustancias antioxidantes. La pérdida de peso en el secado depende de la especie, del órgano y la época de recolección (Moré Eva, et al., 2013).

El secado es una de las actividades postcosecha más importantes en la agricultura, ya que permite preservar los alimentos por un mayor tiempo al evitar su descomposición, y es que según algunas estimaciones en los países en desarrollo se llega a perder entre un 40 % a 60 % de las cosechas, debido a la falta de métodos adecuados de transporte y conservación (Rodríguez et al., 2017). El secado de las plantas en general se realiza por exposición directa al sol. La utilización de secadores solares ha adquirido una gran importancia en la deshidratación de especies medicinales que requieren preservar los ingredientes activos y las características organolépticas del producto y constituye, paralelamente, un aporte importante en el empleo de fuentes de energía alternativas. El uso de secadores convencionales presenta una alta demanda de energía y, en el secado al aire libre, el proceso depende de las condiciones climáticas, dificultándolo (Chinappi et al., 2012). Se encontró en la literatura un estudio del secado solar de hojas de naranja amarga (L. Ait Mohamed, et al., 2005), en el que se realizó la deshidratación de las hojas mediante un secador indirecto el cual funciona con un sistema de calefacción auxiliar y se impulsa el aire bajo condiciones controladas. A partir de las curvas de secado experimentales obtenidas concluyen que el principal factor que influye en la cinética de secado es la temperatura del aire de secado. (Bayona, 2011). El secado es el método más común para conservar plantas medicinales, pero debido a los altos costos de inversión y energía, el secado representa un gasto elevado en la producción de plantas medicinales. Es necesario adoptar tecnologías que reduzcan efectivamente las pérdidas postcosecha mediante la aplicación de métodos adecuados de manejo, procesamiento y conservación (Téllez et al., 2020).

En el presente trabajo se detalla en el apartado del estudio experimental los materiales utilizados y el método de trabajo llevado a cabo para la deshidratación de las hojas de naranja, se explica también la instrumentación de los secadores solares utilizados en la experimentación y equipos de medición utilizados.

Se presenta en el apartado de Resultados experimentales y discusión el comportamiento de los principales parámetros climatológicos que influyen en la deshidratación como son la temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar de un día soleado durante los días de prueba a manera de ejemplo; se muestra además, el estudio de las cinéticas de secado solar, contenido de humedad y velocidades de secado obtenidas en un secador directo tipo gabinete con y sin convección forzada, al igual que el deshidratado a cielo abierto. Finalmente, se concluye presentando los principales datos que experimentalmente nos llevan a determinar las condiciones y método de secado óptimo de la hoja de naranja amarga en función de las tecnologías evaluadas.

Metodología

Descripción del dispositivo experimental.

Secador solar directo tipo gabinete con y sin convección.

Para el proceso de secado solar, se empleó un secador solar de tipo directo construido íntegramente en material plástico transparente con una superficie de tratamiento de 0.5 m² cada uno. La cámara de secado solar consta de una charola absorbidora de la radiación solar en donde se coloca el producto, se utilizaron dos cámaras de secado similares para la realización de las diferentes pruebas en forma simultánea.

La Figura 1 muestra el tipo de secador solar directo del tipo de gabinete, SSD. En cada secador se registró la temperatura interior a la altura de la charola, el peso y tamaño de las muestras, así como la irradiación solar, la humedad relativa y la temperatura del aire.

El SSD, tiene una cara frontal con una pendiente de 20° para aprovechar la radiación solar incidente y permitir la condensación y escurrimiento del agua. Posee perforaciones en las partes laterales, fondo y trasera, para permitir la circulación y extracción del aire húmedo caliente. Puede operar en convección natural o forzada, mediante un ventilador colocado en la parte trasera, de una potencia de 20 W, y permite una velocidad del aire máxima de 2 ms⁻¹.

La Figura 1 muestra los secadores solares tipo gabinete utilizados (SSD). En la Figura 2 se puede ver el secado a cielo abierto de la hoja de naranja. En cada

secador se registró la temperatura interior, el peso y tamaño de las muestras, así como la irradiancia solar, la humedad relativa y la temperatura del aire.



Figura 1. Secador solar directo tipo gabinete



Figura 2. Secado solar a cielo abierto.

Instrumentación

Humedad.

Para la determinación de la humedad se utilizaron dos balanzas con analizador de humedad, marca, Ohaus MB45, respectivamente, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg, Se cortaron las hojas de las ramas y se colocó una muestra de aproximadamente 1.0 g y se procedió a su deshidratación, obteniéndose el valor de la humedad. Este procedimiento se realizó antes y después de realizar las diferentes cinéticas de secado.

Actividad de agua (aw).

La actividad de agua es un parámetro que determina la estabilidad de los alimentos con respecto a la humedad ambiental. Se determinó la actividad de agua para la hoja fresca y posteriormente para la hoja seca. Se utilizó un equipo marca Rotronic Hygropalm de tipo portátil, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg.

Condiciones Climatológicas.

Durante el período de pruebas se registraron los parámetros climatológicos en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la UAC. Las características (datos del fabricante) son los mostrados en la Tabla 1:

Tabla 1. Características y descripción de los instrumentos de medición de la estación meteorológica.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	MODELO	ERROR MÁXIMO
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimet: < ± 1% sobre 360o a 45o de elevación
Humedad relativa	NRG Systems	RH-5X	± 3%
Temperatura ambiente	NRG Systems	110S	± 1.1 °C
Dirección del viento	NRG Systems	Series #200P	± 3o
Anemómetro	Windsensor	P2546C-OPR	± 0.3 m/s

Análisis y discusión de los resultados

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.

En la Figura 2, se presentan las evoluciones de los parámetros climatológicos durante un día soleado tomado como ejemplo de entre los días de prueba. Como puede observarse durante los días de prueba, la irradiancia global máxima alcanzada fue de 900 W/m^2 , siendo el intervalo de los valores máximos promedio entre 850 W/m^2 y 950 W/m^2 . Los valores de la temperatura ambiente oscilaron entre 30.0 °C y 36.3 °C , siendo el promedio 33 °C . Por otro lado, el valor mínimo que alcanzó la humedad relativa en el día fue 35% , el promedio mínimo en los días de prueba osciló entre 34% y 36% .

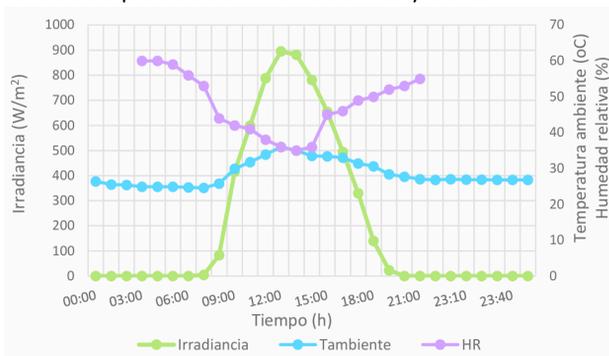


Figura 3. Irradiancia solar global, temperatura ambiente y humedad relativa de un día soleado tomado como ejemplo.

Secado solar directo.

En la Tabla 2 se muestran los valores de actividad del agua (a_w), humedad inicial y humedad final de dos pruebas realizadas a hojas frescas de naranja en el secador solar con convección natural, con convección forzada y a cielo abierto. Como se puede observar, existe poca variación tanto en los valores de humedad como de actividad del agua, resultando casi independientes del modo de funcionamiento del secador solar.

Tabla 2. Humedades (%) y actividad del agua (a_w) en secador solar con convección natural, forzada y cielo abierto.

MUESTRA	HUMEDAD (%)		ACTIVIDAD DE AGUA (a_w)	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
Secado con convección natural	81.26	8.85	0.89	0.209
Secado con convección forzada	80.20	8.75	0.83	0.228
Secado a cielo abierto	80.52	10.94	0.85	0.234

La Figura 4 muestra las temperaturas alcanzadas en el interior de las cámaras de secado de los secadores funcionando con convección natural, con convección forzada, y secado a cielo abierto, así como la irradiancia durante el día mostrado como ejemplo.

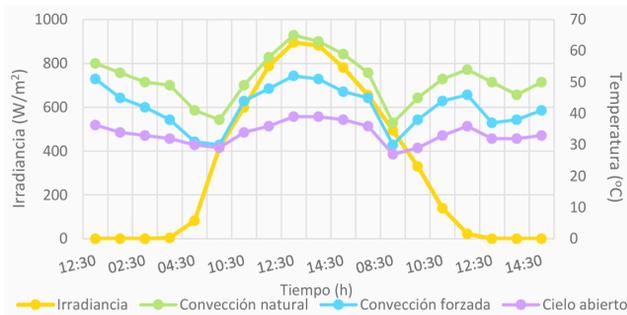


Figura 4. Comportamiento de la irradiancia solar y las temperaturas al interior de las cámaras de secado para los diferentes modos de funcionamiento

Como puede observarse en la figura anterior, las temperaturas en la cámara de secado con convección natural son más elevadas (se midieron hasta 65 °C durante la experimentación) que las que presenta el secador con convección forzada y cielo abierto, lo cual es normal debido a la poca convección que se da en este primer caso; el secador solar con convección forzada alcanzó temperaturas máximas entre 50 °C y 52 °C; finalmente, en el caso de cielo abierto se presentan temperaturas inferiores que en los casos del secador solar de gabinete (la máxima temperatura alcanzada fue de 40 °C). Al observar la gráfica también se puede ver que la coincidencia de las temperaturas mayores en ambas cámaras de secado y en cielo abierto con la irradiancia solar medida en el día de prueba.

La Figura 5 representa la evolución de la humedad en base seca para los tres casos bajo estudio: gabinete con convección natural y forzada y cielo abierto.

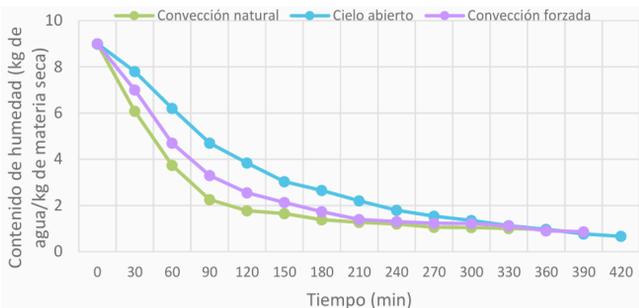


Figura 5. Variación del contenido de humedad en los secadores solares con convección natural, convección forzada y cielo abierto.

Como se puede observar en la gráfica anterior, la cinética a convección natural en este tipo de secadores es más rápida que la correspondiente a convección forzada, debido básicamente a que se obtiene una mayor temperatura, a causa de un menor intercambio térmico con el aire que se encuentra a una velocidad baja. En convección forzada se alcanza una temperatura menor debido a una mayor circulación del aire, provocando la homogenización térmica. En el caso del secado a cielo abierto la circulación de aire no tiene barreras y por lo tanto es afectado directamente por las condiciones climáticas medioambientales, lo cual trae como consecuencia el retraso de la pérdida de humedad en el producto. Este efecto se puede observar en los tiempos correspondientes de secado, en donde se tiene en cielo abierto 420 minutos, para convección forzada 340 y 270 minutos para la convección natural.

La Figura 6 presenta la variación de las velocidades de secado en cada uno de los secadores directos en función del contenido de humedad y cielo abierto.

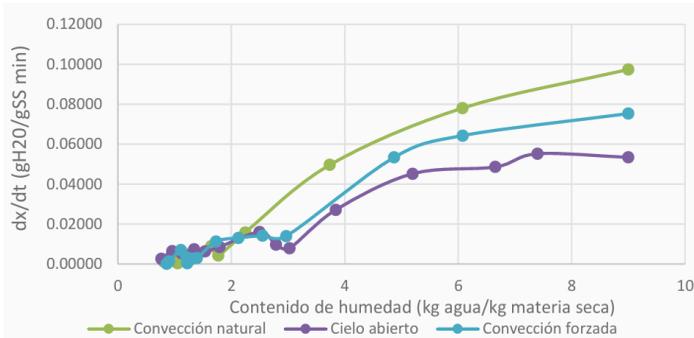


Figura 6. Variación de la velocidad de secado con respecto a la variación del contenido de humedad obtenido con los secadores solares con y sin convección forzada.

Como se puede observar en la figura anterior, en el caso de los secadores directos (tanto convección forzada como convección natural) no se observó ningún periodo de velocidad constante, la velocidad más alta fue la de convección natural con un valor de 0.0953, con una temperatura máxima de 65 °C y un tiempo de secado de 4.5 horas. En el caso de cielo abierto, la velocidad máxima alcanzada fue de 0.0533 con temperaturas de 40 °C en el área de secado y un tiempo de secado de 7.66 horas.

Conclusiones

Los tiempos de secado obtenidos en el gabinete solar con convección natural fueron más cortos en todos los casos, 4.5 horas con convección natural, 5.66 horas para convección forzada y 7.66 horas para cielo abierto. El secado con convección forzada resultó más lento comparado con convección natural. Sin embargo, se obtuvo un deshidratado más uniforme y mejor color de la hoja; se alcanzaron temperaturas hasta de 50 °C en convección forzada, estas temperaturas son suficientes para obtener un secado óptimo, comparado incluso con tecnologías de secado solar indirecto (Kaya and Dadali, 2009) y secado en horno eléctrico (Castillo et al, 2006). En general los productores de nuestro país utilizan el secado a cielo abierto. Al proteger sus productos mediante el secado solar directo tipo gabinete considerando, las pérdidas debido a un inadecuado proceso de secado, a la infección de hongos e insectos, ataque de roedores y aunado a la falta de higiene se eliminan totalmente, hace ver la importancia del trabajo realizado en el estudio experimental que se desarrolla en este proyecto. Los resultados obtenidos muestran que es factible el secado solar de la hoja de naranja agria mediante el secado solar en gabinete, obteniendo una ventaja considerable sobre el secado a cielo abierto con un mínimo mantenimiento y alcanzando un producto deshidratado de alta calidad, garantizando un secado uniforme y evitando proliferación de microorganismos dañinos para la salud, logrando un ahorro energético importante.

Referencias bibliográficas

- Banchemo, L., Carballo, S., & Telesca, J. (2007). Manual De Secado Solar De Especies Medicinales Y.
- Bayona, C. A. (2011). Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas Camilo Andrés Bayona Roa. Tesis Doctoral, 144.
- Chinappi, I., Jerez C., A., & Uzcategui T., M. C. (2012). SECADO SOLAR DE PLANTAS MEDICINALES SOLAR DRYING OF MEDICINAL PLANTS. Academia, 23, 235–242.
- Rodríguez, H., Diez, Q., Pool, B., Glicerio, R., Solar, S., Verduras, D. E. F. Y., & Quintana, E. N. (2017). Secado Solar De Frutas Y Verduras En Quintana Roo, México.

- S. Jorge Cruz Suárez. (2007). Más de 100 plantas medicinales en medicina popular Canaria.
- SADER. (2017). Agrícola Nacional. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, I(1), 1–14.
- Téllez, M. C., Téllez, B. C., Navarro, J. A., Sierra, J. C. O., & Marzoug, R. (2020). Drying of medicinal plants through hybridization of solar technologies, as a proposal to support food security in Mexico. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019, 290–299. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.08.01>

CAPÍTULO 7

REVALORIZACIÓN DEL ACEITE USADO DE LAS CAFETERÍAS DE LA UPCH: UNA PROPUESTA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Patricia de la Cruz Burelo¹, Cintya Valerio Cárdenas², Emanuel Hernández Núñez³, Ramón Eduardo Santiago González⁴, Miguel Ángel Velázquez Carmona⁵, Karla Beatriz de la Cruz Burelo⁶, Jesús Gabriel Yedra Merodio⁷

Resumen

El aceite usado es un residuo altamente contaminante que, si no se gestiona adecuadamente, puede causar graves problemas ambientales. Tan solo un litro de aceite contamina 40 mil litros de agua. En este contexto, el proyecto presentado propone una iniciativa de economía circular para la revalorización del aceite usado de las cafeterías de la Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH). El aceite usado se recolecta de las cafeterías de la UPCH a través de contenedores especiales, posteriormente se realiza un tratamiento donde se separa de los residuos sólidos y se somete a un proceso de purificación. El aceite tratado se ha utilizado para la producción de biodiesel, jabón en barra y velas aromáticas. Los resultados preliminares del proyecto muestran que es posible revalorizar el aceite usado de las cafeterías de la UPCH, generando productos de alto valor económico y ambiental. El biodiesel producido puede

¹ Patricia de la Cruz Burelo es Profesora de Tiempo Completo en la Universidad Popular de la Chontalpa, Tabasco, patricia.delacruz@upch.mx (Autor correspondiente)

² Cintya Valerio Cárdenas es Profesora de Tiempo Completo en la Universidad Popular de la Chontalpa, Tabasco, Cintya.valerio@upch.mx

³ Emanuel Hernández Núñez es Profesor investigador en el CIVESTAV-Unidad Mérida, Yucatán, emanuel.hernandez@cinvestav.mx

⁴ Ramón Eduardo Santiago González es profesor de ingenierías en la Universidad Popular de la Chontalpa, Tabasco, ramon.santiago@upch.mx

⁵ Miguel Ángel Velázquez Carmona es Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Popular de la Chontalpa, Tabasco, m.vazquez@upch.mx

⁶ Karla Beatriz de la Cruz Burelo es Lic. en Comunicaciones del Centro de Cambio Global para la Sustentabilidad del Sureste A.C.

⁷ Jesús Gabriel Yedra Merodio es profesor de Tecnologías de la Información en la Universidad Popular de la Chontalpa

Agradecemos al CCYTET por el apoyo a través del proyecto “Valorización del aceite vegetal residual de las cafeterías de la UPCH para producir biodiesel” con clave PRODECTI-2022-01/089.

utilizarse como combustible para vehículos, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El jabón en barra y las velas aromáticas son productos de consumo final que pueden sustituir a los productos tradicionales elaborados a partir de petróleo.

Palabras claves. *Aceite usado, economía circular, biodiesel, desarrollo sostenible*

Introducción

En términos generales, el aceite de cocina usado se puede definir como una sustancia a base de aceite que consiste en materia vegetal comestible que ha sido sometida a un proceso de calentamiento durante la preparación de alimentos. Este proceso modifica las características físicas y químicas del aceite, haciéndolo inadecuado para el consumo humano (Sheinbaum et al., 2015).

Por otro lado, los aceites vegetales usados son residuos que, al ser vertidos al agua, forman una capa que impiden su correcta oxigenación y dificultan su depuración. Por lo cual, cuando el agua vuelve al medio ambiente con estos residuos, se produce la contaminación de ríos, mares y mantos acuíferos; además, genera la proliferación de microorganismos que representan un riesgo para la salud (Villabona Ortiz et al., 2017).

Según la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA), este tipo de residuo debe ser reciclado, reusado o confinado para evitar su impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. Sin embargo, muchos establecimientos lo vierten al drenaje o al suelo, provocando atascos en tuberías, plagas urbanas, daños a la infraestructura y emisiones de gases de efecto invernadero.

Para México de acuerdo con lo reportado por Castañeda (2021), solo se recupera el 30% del aceite vegetal de cocina que se utiliza, por lo tanto, el volumen de residuo que se genera es alrededor de 672,000 toneladas de aceite vegetal de uso al año. Ante esta situación, surge la necesidad de buscar alternativas que permitan revalorizar este aceite, aprovechando sus potencialidades para generar productos útiles y reducir su impacto negativo.

Una de estas alternativas es la aplicación de los principios de la economía circular, un modelo que busca optimizar el uso de los recursos y minimizar la generación de residuos, imitando los ciclos naturales. La economía circular se basa en tres pilares: reducir, reutilizar y reciclar. Así, se busca disminuir el consumo de materias primas, prolongar la vida útil de los productos, recuperar los materiales al final de su ciclo y transformar los residuos en recursos (Espinoza H., 2023).

En este capítulo se presenta una propuesta de economía circular para el desarrollo sostenible, basada en la revalorización del aceite usado de las cafeterías de la UPCH. Se analizan las posibles aplicaciones que se le pueden dar, tales como la producción de biodiésel, jabón, velas, pinturas, entre otras. Se evalúan los beneficios ambientales, sociales y económicos que se podrían obtener con esta propuesta, así como los retos y oportunidades que implica su implementación. Finalmente, se ofrecen algunas recomendaciones para impulsar este tipo de iniciativas en el ámbito académico y empresarial.

Metodología

El estudio se realizó en las instalaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa, ubicada en el municipio de Cárdenas, Tabasco y consistió de 3 etapas: a) un programa de recolección del aceite de cocina usado con una de las dos cafeterías establecidas en la institución; b) una campaña de recolección con la comunidad universitaria por un periodo de 5 días, durante este tiempo los interesados depositaban sus residuos de aceite de cocina en un contenedor. Previamente se había anunciado la campaña donde se explicó la forma de traer el aceite usado; además, se les explicó la importancia de recolectar el aceite y reutilizarlo, se mostró que puede tener otras aplicaciones como la producción de jabones; c) un taller de valorización del aceite residual de cocina para la producción de biodiésel que se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Química Petrolera, donde asistieron 30 alumnos de diversas ingenierías de la UPCH. El taller constaba de una primera sección donde se introdujo a los participantes en los conceptos básicos de biodiésel, economía circular y desarrollo sostenible. Finalmente, se les explicó cómo se elabora el biodiésel, las medidas de seguridad, así como el material y reactivos a utilizar; como refuerzo se brindó a cada participante un manual de lo que se había explicado. Al término del taller los participantes realizaron carteles de los conocimientos adquiridos como retroalimentación de este.

Análisis y discusión de resultados

Los resultados que se muestran son preliminares del proyecto “Valorización del aceite vegetal residual de las cafeterías de la UPCH para la producción de biodiesel” financiado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET) y que concluye en Julio del 2024.

a) Programa de recolección de aceite de cocina usado de las cafeterías de la UPCH.

Para llevar a cabo la recolección del residuo se habló con la encargada de la cafetería de la Universidad ubicada en el edificio B de la institución, le explicamos la importancia de la recolección del aceite y le pedimos dejar un recipiente.

La primera semana fue de 5 litros, pero debía recolectarse al menos dos veces por semana, después de 1 mes consideramos que bidones de 20 litros eran lo más recomendable. En un periodo de 3 meses contabilizamos un promedio de 80 litros por mes de aceite desechada en el establecimiento.

El aceite que se recolecta se filtra con algodón por dos métodos, gravedad o vacío, posteriormente se elimina cualquier resto de agua secando a 110°C por un periodo de 60 minutos. El aceite limpio y seco se guarda en recipientes para su posterior empleo. Estas actividades se realizan en el laboratorio de Química Sustentable. Las posibilidades de reutilizar este residuo son muchas, en el laboratorio se han preparado jabones en barra para uso doméstico a partir de la reacción de la grasa con una solución de hidróxido de sodio al 40 % (Salgado, 2018), el cual debe secarse por un periodo de 30 días antes de su uso y en nuestro caso sustituimos el aceite de coco por sal común para brindar mayor dureza al jabón (Figura 1).



Figura 1. Jabones en barra elaborados con aceite de cocina residual de las cafeterías de la UPCH

b) Campaña de recolección con la comunidad universitaria

El objetivo de la campaña era generar conciencia en la comunidad de la Universidad Popular de la Chontalpa sobre la importancia de reciclar el aceite de cocina usado y dar a conocer los problemas ambientales y de salud que genera. Es por ello por lo que la campaña se lanzó el 27 de septiembre “día de la Conciencia ambiental”, se utilizaron las redes sociales y poster que se colocaron en diversas áreas transitadas de la institución, esto con la finalidad de preparar a la sociedad y la semana de la recolección conocieran como debían entregar su residuo, las fechas, el lugar donde estaría el módulo y las diversas actividades que se realizarían (Figura 2).



Figura 2. Cartel de la campaña de recolección de aceite realizada en la UPCH

El primer día de la campaña se llevó a cabo un pequeño taller de producción de jabón con el aceite que ya se había recolectado de la cafetería, esto permitió un mayor acercamiento de los interesados a las aplicaciones de este desecho y que realmente tiene un valor agregado, así mismo durante la semana se donaron muestras de jabones previamente preparados, se explicó los daños que genera el aceite si no tiene una correcta disposición. Al término de la semana se determinó que se recolectó 50 L de aceite, la cual tendrá el mismo proceso, limpieza y secado (Figura 3).



Figura 3. Campaña de recolección de aceite en la UPCH

El Taller se impartió durante el 1er Congreso Internacional de Ciencias, Sociales y Humanidades realizado en la universidad. La meta era dar a conocer a los estudiantes los conceptos de biocombustibles, economía circular y desarrollo sostenible a través de la reutilización de un residuo que tienen a su alcance cuando cocinan en casa. Al taller asistieron 30 personas, 28 alumnos pertenecientes a la UPCH y 2 asistentes externos del Congreso, se dividieron en equipos de 5 personas, se explicaron los conceptos antes mencionados y su relación con el aceite de cocina usado. Se les entregó un manual de cómo preparar biodiésel y se les explicó paso a paso, además de las medidas de seguridad necesarias en caso de querer reproducir la actividad, cada integrante del equipo se le asignó una tarea y en conjunto supervisaron la reacción de transesterificación para obtener el biocombustible que tiene un tiempo de 1 h, al término de ese tiempo colocaron la mezcla de reacción en un embudo de separación para aislar el biodiésel de los subproductos (Jadán S et al., 2023).

Al término del taller cada equipo llevó a cabo un cartel con los conceptos aprendidos en este, alguno de los asistentes lo presentaron, observándose que biocombustible, reciclar, economía circular eran de los temas más representativos (Figura 4).



Figura 4. Taller de biodiésel a partir de aceite vegetal residual

La revalorización del aceite de cocina de las cafeterías de la UPCH tiene importantes beneficios ambientales, ya que evita que este residuo acabe en los vertederos, donde puede contaminar el suelo y el agua. Además, la revalorización del aceite usado permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles, ya que puede utilizarse para fabricar biodiésel, un combustible renovable que no produce gases de efecto invernadero.

De igual forma también presenta beneficios sociales, ya que contribuye a la creación de empleo y a la formación de la población. Además, la revalorización del aceite usado puede ayudar a mejorar la salud pública, ya que evita que este residuo se contamine y se convierta en un foco de enfermedades.

Así mismo, puede presentar recompensas económicas, ya que puede generar ingresos para las cafeterías y para las empresas que se dedican a la revalorización de residuos. Además, puede ayudar a reducir los costes de gestión de residuos.

No obstante, a lo largo del tiempo que llevamos desarrollando el proyecto hemos encontrado que también tiene algunos retos que deben ser superados para que se pueda llevar a cabo de forma eficaz, por ejemplo:

Infraestructura: Es necesario contar con la infraestructura adecuada para la recogida y el tratamiento del aceite de cocina usado. Esto incluye la instalación de contenedores específicos para el aceite usado, así como la creación de empresas especializadas en la recogida y el tratamiento de este residuo.

Costes: La revalorización del aceite de cocina usado puede tener un coste inicial elevado, ya que es necesario instalar la infraestructura necesaria. Sin embargo, a largo plazo, esta práctica puede ser rentable, ya que genera ingresos y reduce los costes de gestión de residuos.

Por otro lado, la revalorización del aceite de cocina de las cafeterías de la UPCH presenta también algunas oportunidades, que pueden ayudar a superar los retos mencionados anteriormente:

Apoyo institucional: La UPCH puede apoyar la revalorización del aceite de cocina usado a través de políticas y programas de promoción.

Cooperación público-privada: La UPCH puede colaborar con empresas privadas para la recogida y gestión del aceite de cocina usado.

Innovación tecnológica: La innovación tecnológica puede ayudar a reducir los costes de la revalorización del aceite de cocina usado.

Conclusiones

La revalorización del aceite de cocina usado es una práctica con importantes beneficios ambientales, sociales y económicos. Sin embargo, para que esta práctica se pueda implementar de forma efectiva, es necesario superar algunos retos, como la concienciación de la comunidad universitaria, la infraestructura adecuada y los costes asociados.

La UPCH puede apoyar la revalorización del aceite de cocina usado a través de políticas y programas de promoción, así como colaborando con empresas privadas. Además, la innovación tecnológica puede ayudar a reducir los costes de la revalorización del aceite de cocina usado.

Referencias bibliográficas

- Castañeda Castillo, N. (2021). Diagnóstico del aceite vegetal residual generado en comercios de alimentos en tepoztlán, morelos. Cuernavaca, Morelos: UAEM.
- Espinoza H., A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. Revista de Economía Institucional, 109-134.
- Jadán S., M., Morejón F., M., García F., S., Burgos B., G., & García V., G. (2023). Obtención de Biodiésel a partir de la transesterificación de aceite vegetal residual. infoANALÍTICA, 31-51.
- Salgado, J. (2018). Elaboración de jabones con aceite reciclado. Foro de Estudios sobre Guerrero, 699-703.
- Sheinbaum, C., Balam, M., Robles, G., Lelo de Larrea, S., & Mendoza, R. (2015). Biodiesel from waste cooking oil in Mexico City. Waste Management & Research, 730-739.
- Villabona Ortiz, Á., Iriarte Pico, R., & Tejada Tovar, C. (2017). Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos grasos de procesos de fritura. Teknos Revista Científica, 21-29.

CAPÍTULO 8

EL HIDRÓGENO Y LAS TECNOLOGÍAS RENOVABLES: RETOS Y PERSPECTIVAS

Roger Castillo Palomera¹, Ildefonso Zamudio Torres², Marcela del Carmen Arellano Cortaza³, Lizeth Rojas Blanco⁴, Manuel González Solano⁵, Erik Ramírez Morales⁶

Resumen

La producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua es un proceso clave para la generación de energía limpia y sostenible. Al descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno mediante electricidad, se obtiene un combustible versátil que puede alimentar celdas de combustible para la generación de electricidad sin emisiones contaminantes. Este método facilita el almacenamiento de energía y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente cuando se utiliza electricidad de fuentes renovables. En cuanto a los sistemas fotovoltaicos, enfrentan retos y oportunidades. Los desafíos incluyen la variabilidad y la intermitencia de la radiación solar, así como los costos iniciales. Sin embargo, las oportunidades radican en avances tecnológicos, como el desarrollo de tecnologías de almacenamiento y la reducción de costos, que mejoran la viabilidad y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, contribuyendo así a la transición hacia una matriz energética más sostenible.

Palabras claves. *Energía, Energías renovables, Producción de hidrógeno, Almacenamiento de energía, Sistemas energéticos.*

¹ Roger Castillo Palomera. Prof. Investigador Ing. Mecánica eléctrica, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. roger.palomera@ujat.mx

² Ildefonso Zamudio Torres. Prof. Investigador Ing. Química, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. ildefonso.zamudio@ujat.mx

³ Marcela del Carmen Arellano Cortaza. Prof. Investigador Ing. Química, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. marcelo.arellano@ujat.mx

⁴ Lizeth Rojas Blanco. Prof. Investigador Ing. Química, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. lizeth.rojas@ujat.mx

⁵ Manuel González Solano. Prof. Investigador Ing. Eléctrica electrónica, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

⁶ Erik Ramírez Morales. Prof. Investigador Ing. Química, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. erik.morales@ujat.mx (autor correspondiente)

Introducción

Los Estados Unidos Mexicanos, mejor conocido como México, situado a 19°25'10"N 99°08'44"O y con alrededor de 130 millones de personas en el 2023, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, es como la mayoría de los países, un consumidor voraz de energía. Se han realizado importantes eventos a nivel mundial con el objetivo de atacar los problemas que nos aquejan, como la escasez de agua, el hambre y la demanda de energía, tales como la sucedida en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en donde los líderes mundiales adoptaron una serie de objetivos para mitigar estas problemáticas, entre ellos México, que entre otros compromisos, se planteó el objetivo 7 de energía asequible y no contaminante, en donde prioritariamente al 2030 se pretende garantizar el acceso a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, aumentar el porcentaje de producción de energía a través de fuentes renovables de energía, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles, así como mejorarla eficiencia energética del consumo (Niet et al., 2021).

Se han hecho algunos esfuerzos a nivel nacional para alcanzar este objetivo, tales como el compromiso de alcanzar al 2030 el 35 % y para el 2050 el 50 % de generación con energías limpias, la creación de los Certificados de Energías Limpias (CELs), los Atlas Nacionales de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL), la puesta en marcha de los proyectos Centros Mexicanos de Energías Limpias (CEMIEs), entre otros (Petarra, 2021).

Retos y oportunidades en sistemas fotovoltaicos

Según el Informe Nacional Voluntario 2021: La Agenda 2030 en México, “la electricidad en México se genera en un 32.5 % a través de energía limpias: hidroeléctrica (14.7 %), eólica (8.1 %), solar (6.7 %), nuclear (1.9 %) y geotérmica (1.1 %)”, resultados prometedores, pero sin duda aún se puede hacer mucho más, ya que la demanda energética va en aumento.

Por otro lado, en la Figura 1 la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) nos muestra en su portal datos y mapas estadísticos de alta importancia para analizar las perspectivas de generación de energía desde 1990 hasta 2021 en nuestro país.

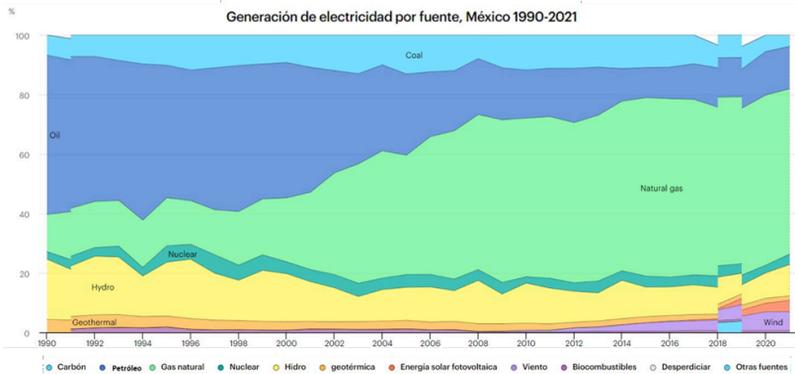


Figura 1. Generación de electricidad en México por tipo fuente primaria en los años 1990-2021 (International Energy Agency, 2023).

Por otro lado, en la Figura 1 la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) nos muestra en su portal datos y mapas estadísticos de alta importancia para analizar las perspectivas de generación de energía desde 1990 hasta 2021 en nuestro país.

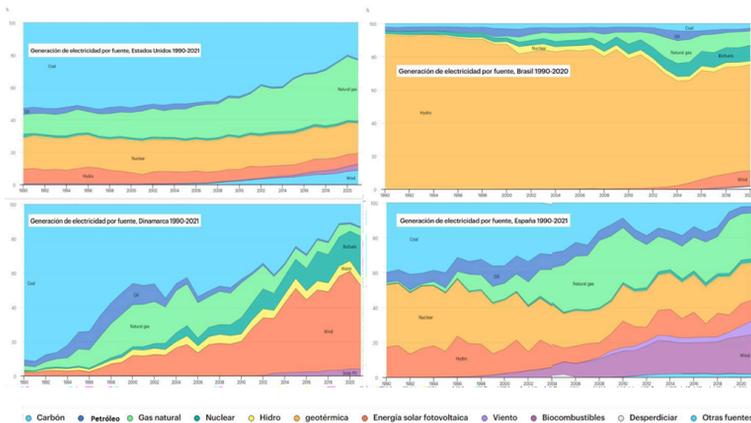


Figura 2. Generación de electricidad en Estados Unidos, Brasil, Dinamarca y España por tipo de fuente primaria en los años 1990-2021 (International Energy Agency, 2023).

En la Figura 2, se puede observar el mismo parámetro para otros países, en donde el crecimiento del uso de las energías limpias se ha visto reflejado en su forma de producción de energía.

Esta generación de energía a nivel nacional principalmente se consume en el sector transporte, industrial, residencial, comercial, entre otros, como se muestra en la Figura 3 siguiente.

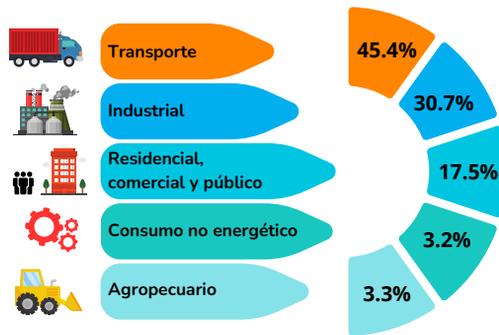


Figura 3. Distribución del consumo de energía por sector para México, 2016.

Fuente: (Coordinación de la Investigación Científica, 2020).

México posee una riqueza energética renovable enorme sin lugar a dudas, se cuenta con zonas con potenciales eólicos, por su posición en el ecuador posee un potencial solar envidiable para otros países, así como una gran cantidad de ríos con potencial de generación hidroeléctrico, bioenergía, mareomotriz y sin dejar de lado la generación nuclear, que aunque mal vista en muchos aspectos es una gran fuente de generación de energía, que usada de forma correcta se puede llegar a una buena simbiosis con ella.

Sin duda alguna se debe cambiar las políticas energéticas con miras a una forma de obtención de energía de forma armoniosa con la sociedad, el ambiente y la economía, en eso se basa la sustentabilidad energética.

El uso de las fuentes renovables de energías a nivel mundial es sin duda primordial si se quiere una verdadera transición energética y descarbonización de la industria. Una de las tecnologías renovables que mayor repunte ha tenido en los últimos años es sin duda la generación Fotovoltaica, tal como lo reporta la IEA (ver Figura 4).

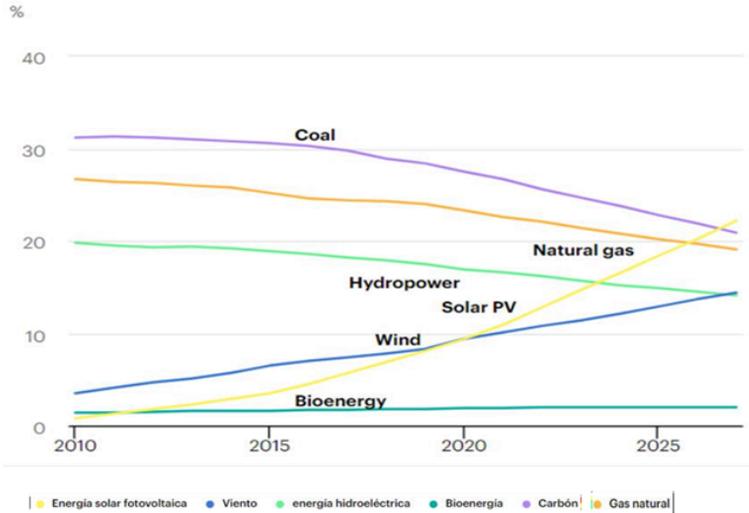


Figura 4. Participación de la capacidad energética mundial acumulado por tecnología 2010-2027 (International Energy Agency, 2023).

En México su popularidad ha ido en aumento, pero se requiere más esfuerzo por parte de los sectores privados y gubernamentales. La Figura 5 muestra la proyección de su crecimiento del sector fotovoltaico en los próximos años.

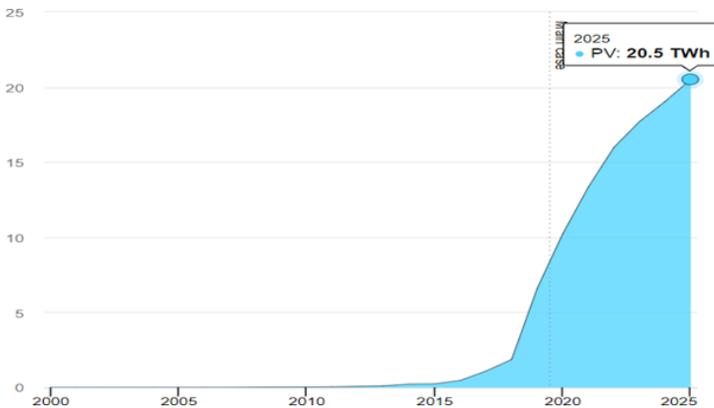


Figura 5. Generación fotovoltaica, México, 1990-2025 (International Energy Agency, 2023).

Esta proyección se puede ampliar si las políticas gubernamentales y la participación del sector privado e industria colaboran con un mismo objetivo, el de mitigar los problemas ambientales, a nivel nacional y mundial.

Una de las opciones para la mitigación del cambio climático es el uso de Tecnologías fotovoltaicas, la generación fotovoltaica se divide en dos grandes tipos, como lo muestra el siguiente esquema (Figura 6).

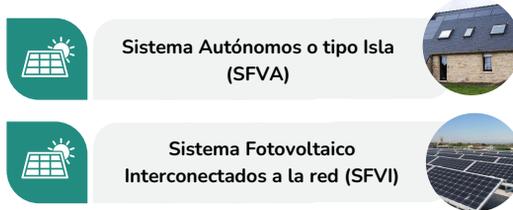


Figura 6. Tipos de sistemas fotovoltaicos.

Ambas tienen diferentes fines y aplicaciones, ventajas y desventajas, pero en los últimos años los SFVI se han popularizado mucho en el sector residencial, ya que sus costos en general van a la baja, los sistemas autónomos, por otro lado, debido a que necesitan un sistema de almacenamiento de energía (baterías) su inversión inicial se eleva, hay que confiar en las nuevas investigaciones en esta línea y que las nuevas generaciones de baterías sean más eficientes y menos costosas. Algunas aplicaciones se presentan a continuación (Figura 7).



Figura 7. Tipos de sistemas fotovoltaicos.

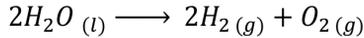
Electrólisis para producción de Hidrógeno

El avance y la aplicación de tecnologías eficientes en energías renovables son requisitos fundamentales para satisfacer la creciente demanda energética y abordar el cambio climático global (Chi & Yu, 2018). La energía del hidrógeno, caracterizada por carecer de contenido de carbono y tener una densidad energética considerablemente alta, representa un portador energético ideal tanto para almacenar energía renovable como para servir como materia prima esencial en la industria química. La electrólisis del agua impulsada por electricidad ya sea a través de membranas de intercambio de aniones (AEM) o de intercambio de protones (PEM) en la electrólisis del agua, emerge como una tecnología vital en la conversión y almacenamiento de energía, con el propósito de mitigar las emisiones de carbono asociadas a los combustibles fósiles convencionales (Amores et al., 2020; Shiva Kumar & Himabindu, 2019). En el proceso de producción de hidrógeno mediante la división del agua, se incluyen los procesos catódicos de evolución de hidrógeno (HER) y anódicos de evolución de oxígeno (OER), donde la cinética lenta de la OER debido al proceso electroquímico acoplado de cuatro electrones y cuatro protones limita la eficiencia general de la división del agua (Shiva Kumar & Lim, 2022; T Wang et al., 2022). Por lo tanto, la comprensión de los pasos elementales de la reacción y sus vías catalíticas preferenciales sienta las bases teóricas para el diseño específico de catalizadores de alto rendimiento (Khanet al., 2018). La exploración de técnicas de caracterización avanzadas y el análisis exhaustivo de cálculos teóricos han agilizado el proceso de descubrimiento de sitios activos catalíticos reales, aclarando múltiples intermediarios catalíticos y estableciendo mecanismos catalíticos innovadores.

Recientemente, se han logrado avances significativos en la revelación de la evolución estructural y los mecanismos de reacción de los electrocatalizadores de OER mediante el uso de técnicas de caracterización electroquímica in situ, lo que ha contribuido considerablemente al diseño racional y la aplicación de catalizadores de OER (Brauns & Turek, 2020).

La electrólisis del agua es un procedimiento químico que involucra la descomposición del agua (H_2O) en sus componentes básicos, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), mediante la aplicación de electricidad. Durante este proceso, se genera hidrógeno gaseoso en el cátodo (electrodo negativo) y oxígeno gaseoso

en el ánodo (electrodo positivo).



Esto significa que, al aplicar una corriente eléctrica al agua, se produce hidrógeno gaseoso en el cátodo (electrodo negativo) y oxígeno gaseoso en el ánodo (electrodo positivo).

La electrólisis del agua es importante por varias razones:

El hidrógeno producido durante la electrólisis del agua es una fuente potencial de energía limpia y renovable. Puede utilizarse como combustible en celdas de combustible para generar electricidad sin emitir contaminantes atmosféricos, ya que la única emisión al quemar hidrógeno es vapor de agua (Xu et al., 2023).

La electrólisis del agua puede ser utilizada como un método de almacenamiento de energía. Cuando hay un excedente de energía eléctrica en la red, se puede utilizar para realizar la electrólisis y almacenar el hidrógeno resultante. Luego, ese hidrógeno se puede utilizar más tarde para generar electricidad cuando sea necesario (Cavaliere et al., 2021).

Si la electricidad utilizada en el proceso de electrólisis proviene de fuentes renovables, la producción de hidrógeno resultante puede ser una forma de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía (Wang et al., 2021). La electrólisis del agua también es fundamental en la investigación y desarrollo de tecnologías energéticas más sostenibles. La mejora de la eficiencia y la reducción de costos en este proceso son áreas de interés clave para avanzar hacia un futuro más limpio y sostenible (Zeradjanin, 2024).

Producción de Hidrógeno

De acuerdo con el reporte de la ONU: “Perspectivas de la población mundial” (2022), se prevé que, en la década de 2080, la población mundial alcance un máximo de alrededor de 10 400 millones de personas y mantenga este nivel hasta 2100. El fenómeno del crecimiento poblacional trae consigo el proceso de urbanización con la finalidad de satisfacer las diversas necesidades humanas, dentro de las que destaca la demanda energética (IEA, 2022).

En este sentido, actualmente se está padeciendo de una crisis energética a

nivel mundial debido a diversas razones, por ejemplo: la pandemia COVID-19, y los conflictos entre diversos países. Esto se ve reflejado en las alzas de los precios de los combustibles fósiles, como lo son el petróleo y el gas natural por lo que es importante tomar medidas para contrarrestar estos efectos (Jeong et al., 2023).

Aunado a esta problemática el uso excesivo o desmedido de estos tipos de energías se ha visto reflejado en el calentamiento global y el cambio climático, que han traído graves consecuencias no solo a la población humana, sino también a la flora y fauna de los diversos ecosistemas (Ergin et al., 2021). Por ello, se está trabajando arduamente a nivel mundial en la transición de los combustibles fósiles a fuentes de energías renovables, con la intención de disminuir la huella de carbono de la humanidad (Kumar et al., 2023). En los planes estratégicos de corto y mediano plazo de los diferentes órdenes de gobierno, se encuentra la investigación, uso y promoción de las fuentes de energías renovables: solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidráulica, entre otras, como fuentes energéticas complementarias a las que actualmente usamos. Mientras que en los planes a largo plazo se encuentran la sustitución de las fuentes de energías tradicionales por aquellas en las que el daño ambiental es menor (Gargalo et al., 2023; Hamann et al., 2023). En este sentido, el hidrógeno molecular (H_2) ha tomado un papel clave en este proceso de descarbonización, como muchos autores lo denominan. El hidrogeno es el elemento químico más abundante en la tierra, por lo que su utilización para el transporte energético se considera de bajo costo y amigable con el medio ambiente (Durakovic et al., 2023).

El hidrógeno es considerado como el mejor sustituto de los combustibles fósiles, ya que se quema para producir únicamente agua como subproducto sin emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (AlHumaidan et al., 2023). Sin embargo, el H_2 generalmente se encuentra en el agua, biomasa y los hidrocarburos, por lo que es necesario producirlo u obtenerlo de otras fuentes, es decir que no se encuentra de forma pura en la Tierra (Amin et al., 2022).

El hidrógeno molecular que se produce se clasifica en función de la fuente de energía y del método de obtención empleado:

Hidrógeno gris: para la obtención de este tipo de hidrogeno, se utilizan com-

bustibles fósiles, por ejemplo, el gas natural o el carbón. Este tipo de hidrógeno encabeza la lista ya que representa alrededor del 95 % del hidrógeno que se produce a nivel mundial. En este caso, el reformado de metano y la gasificación del carbón son los métodos más utilizados para la obtención de este tipo de hidrógeno. La principal desventaja de estos tipos de obtención son las grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) liberado al ambiente. Por lo tanto, el hidrógeno que se produce por cualquier método de obtención que produzca CO_2 se considera hidrógeno gris, por lo que no se considera bajo en carbono (Atilhan et al., 2021; Hu et al., 2022).

Hidrógeno azul: este tipo de hidrógeno se produce de manera similar al hidrógeno gris, es decir, existen emisiones de CO_2 , sin embargo, estas no se liberan al ambiente y quedan almacenadas en el suelo. Este proceso se denomina como captura y almacenamiento de carbono (CAC, por sus siglas en inglés). Los principales métodos de producción del hidrógeno azul, son la gasificación del carbono y el reformado de metano con vapor, ambos con captura y almacenamiento de carbono. Entonces, al utilizar procesos CAC's, el hidrógeno azul se considera como un combustible bajo en carbono, pero de alto costo de producción (AlHumaidan et al., 2023; Howarth & Jacobson, 2021).

Hidrógeno verde: este tipo de hidrógeno se considera como de nulas o bajas emisiones de CO_2 , ya que se obtiene utilizando electricidad que proviene de energías limpias, como la energía solar, eólica. Durante el proceso de obtención, se suministra energía eléctrica lo que produce la división del agua (H_2O) en H_2 y oxígeno(O_2), este proceso recibe el nombre de electrólisis. La electrólisis es considerada un procedimiento de alto costo, sin embargo, la principal ventaja es que no existen emisiones de CO_2 , como en el caso del hidrógeno gris y azul (Chai et al., 2021; Kheirrouz et al., 2022).

Otros colores: el hidrógeno negro se produce cuando se utiliza carbón negro (proceso de gasificación) para su obtención. El hidrógeno rojo se produce a partir de biomasa. El rosa se obtiene mediante electrólisis impulsada por energía nuclear. El color amarillo se utiliza para referirnos a hidrógeno producido mediante electrólisis mediante energía solar. El hidrógeno turquesa se produce mediante un proceso llamado pirólisis de metano para producir hidrógeno molecular y carbono sólido. Por último, en muy raras ocasiones se podría encontrar depósitos subterráneos de hidrógeno geológico natural, el

cual se denomina hidrógeno blanco (H Industries, 2018; Prinzhofer et al., 2018).

Conclusiones

Es importante destacar que en cuanto a los diversos métodos de producción de hidrógeno que determinan la limpieza, la rentabilidad, la eficacia de acuerdo con el método de producción empleado. A pesar de sus beneficios, es importante acentuar que la electrólisis del agua aún enfrenta desafíos, como la eficiencia del proceso y el costo de la electricidad requerida. Sin embargo, a medida que avanza la investigación y se desarrollan tecnologías más eficientes, la electrólisis del agua podría desempeñar un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Aún queda mucho por hacer, y cada sector tiene formas de cómo ayudar en la carrera por la investigación de las tecnologías renovables, desde la parte gubernamental e industria, hasta en casa ayudando a ahorrar energía, se puede apagar la luz y acondicionador de aire cuando no se utilicen, compartir el auto con tus vecinos, fomentar el uso de bicicletas, lavar la carga máxima en tu lavadora, desconectar los cargadores y a aparatos electrónicos y no dejarlos en “stand by”, cambiar a focos ahorradores o de leds, entre muchas otras buenas prácticas.

Referencias bibliográficas

- AlHumaidan, F. S., Absi Halabi, M., Rana, M. S., & Vinoba, M. (2023). Blue hydrogen: Current status and future technologies. *Energy Conversion and Management*, 283, 116840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116840>
- Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Rahman Farooqi, Z. U., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33112–33134. <https://doi.org/10.1016/j.IJHYDENE.2022.07.172>
- Amores, E., Sánchez, M., Rojas, N., & Sánchez-Molina, M. (2020). Renewable hydrogen production by water electrolysis. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00010-X>

- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668.
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. In *Processes* (Vol. 8, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
- Cavaliere, P. D., Perrone, A., & Silvello, A. (2021). Water electrolysis for the production of hydrogen to be employed in the ironmaking and steelmaking industry. In *Metals* (Vol. 11, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/met11111816>
- Chai, Y. H., Mohamed, M., Cheng, Y. W., Chin, B. L. F., Yiin, C. L., Yusup, S., & Lam, M. K. (2021). A review on potential of biohydrogen generation through waste decomposition technologies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–26.
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. In *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis* (Vol. 39, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Coordinación de la investigación científica. (2020). Estrategia legislativa para la agenda 2030.
- Durakovic, G., del Granado, P. C., & Tomasgard, A. (2023). Are green and blue hydrogen competitive or complementary? Insights from a decarbonized European power system analysis. *Energy*, 282, 128282. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128282>
- Ergin, E., Altinel, B., & Aktas, E. (2021). A mixed method study on global warming, climate change and the role of public health nurses from the perspective of nursing students. *Nurse Education Today*, 107, 105144. <https://doi.org/10.1016/J.NEDT.2021.105144>
- Gargalo, C. L., Yu, H., Vollmer, N., Arabkoohsar, A., Gernaey, K. V., & Sin, G. (2023). A process systems engineering view of environmental impact assessment in renewable and sustainable energy production: status and perspectives. *Computers & Chemical Engineering*, 108504. <https://doi.org/10.1016/J.COMPHEMENG.2023.108504>
- H2 Industries. (2018). Hydrogen in colors. <https://h2-industries.com/en/hydrogen/>
- Hamann, K. R. S., Bertel, M. P., Ryszawska, B., Lurger, B., Szymański, P., Rozwadowska, M., Goedkoop, F., Jans, L., Perlaviciute, G., Masson, T., Fritsche, I., Favaro, T., Hofer, A., Eisenberger, I., Gutschi, C., Grosche, C., Held, J., Athenstaedt, U., & Corcoran, K. (2023). An interdisciplinary understanding of energy citizenship: Integrating psychological, legal, and economic perspectives on a citizen-centred sustainable energy transition. *Energy Research & Social Science*, 97, 102959. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2023.102959>
- Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen. *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676–1687.

- Hu, Y., Li, J., Man, Y., & Ren, J. (2022). The dynamic hydrogen production yield forecasting model based on the improved discrete grey method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(42), 18251–18260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.026>
- IEA, P. (2022). *World Energy Outlook 2022*, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- International Energy Agency. (2023, April 1). International Energy Agency. *World Energy Employment 2023*.
- Jeong, D., Hwang, S., Kim, J., Yu, H., & Park, E. (2023). Public perspective on renewable and other energy resources: Evidence from social media big data and sentiment analysis. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101243. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2023.101243>
- Khan, M. A., Zhao, H., Zou, W., Chen, Z., Cao, W., Fang, J., Xu, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2018). Recent Progresses in Electrocatalysts for Water Electrolysis. In *Electrochemical Energy Reviews* (Vol. 1, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0014-z>
- Kheirrouz, M., Melino, F., & Ancona, M. A. (2022). Fault detection and diagnosis methods for green hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(65), 27747–27774.
- Kumar, V., Kumar Jethani, J., & Bohra, L. (2023). Combating climate change through renewable sources of electricity- A review of rooftop solar projects in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103526. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103526>
- Niet, T., Arianpoo, N., Kuling, K., & Wright, A. S. (2021). Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: expanding the food–energy–water nexus. In *Energy, Sustainability and Society* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00275-0>
- Petrarca, R. (2021). Energías limpias en México: proyecciones para la energía solar. *RISAD*, 3(1).
- Prinzhofer, A., Tahara Cissé, C. S., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315–19326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. In *Materials Science for Energy Technologies* (Vol. 2, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Shiva Kumar, S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. In *Energy Reports* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>
- United Nations, D. of E. and S. A. P. D. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.

- Wang, S., Lu, A., & Zhong, C. J. (2021). Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. In *Nano Convergence* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. In *Carbon Neutrality* (Vol. 1, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8>

CAPÍTULO 9

DISEÑO DE MEZCLAS APLICADO AL SISTEMA ZNO- CEO₂ Y UREA PARA LA FOTODEGRADACIÓN DE ÁCIDO ACETIL SALICÍLICO

Ventura Baltazar Obed¹, Ghodavarthi Srinivas¹, Sánchez
Trinidad Cecilia¹, Cervantes Uribe Adrián¹

Resumen

Se sintetizaron catalizadores de óxido de cerio, óxido de zinc y urea. Se empleó el diseño de mezclas para construir una superficie de respuesta. El modelo fue Simplex Lattice, el cual solo contempla los compuestos puros y sus combinaciones binarias. La variable por optimizar fue la degradación de ácido acetilsalicílico. Los catalizadores fueron sintetizados por difracción de rayos X y UV-Vis de sólidos. Los resultados de difracción muestran una interacción entre los componentes de las muestras binarias, modificando la estructura cristalina. De igual forma, la activación de los catalizadores se realizó en regiones específicas del espectro visible. La actividad se vio favorecida en las mezclas binarias, mostrando mejor desempeño con el óxido de cerio presente.

Palabras Claves. *ZnO, CeO₂, C₃N₄, ácido acetil salicílico, fotocatalisis.*

Introducción

Existe un creciente interés por los contaminantes emergentes (CE), compuestos de origen y naturaleza química diversa, cuya presencia en el medio ambiente y sus potenciales consecuencias han sido mayormente subestimadas, generando problemas ambientales y de salud. Estos compuestos se dispersan en el entorno y se han identificado en fuentes de suministro de agua, incluyendo aguas subterráneas y potables. Actualmente, se dispone de escaso conocimiento acerca de su presencia, impacto y tratamiento en el medio ambien

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT), DACB, Km.1 carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, C.P. 86690, A.P. 24, Cunduacán (Tabasco), México.

te (Janet, 2012). El diseño de nanocatalizadores eficientes se presenta como un desafío continuo. Para abordar inquietudes tanto industriales como ambientales, es imperativo que estos catalizadores posean una estructura definida, sean ecoamigables, exhiban alta actividad catalítica y mantengan una elevada estabilidad química (Janet, 2012). La presencia de productos químicos farmacéuticos en el medio acuático constituye una preocupación de gran relevancia. Los principales mecanismos de introducción de estos productos en el entorno incluyen la excreción humana, la eliminación de compuestos no utilizados y el uso agrícola, entre otros (Poynton, 2009). Una gran variedad de productos farmacéuticos se ha detectado en aguas superficiales y subterráneas, asociados a la descarga de aguas residuales (Barnes, 2008; Watkinson, 2009). Estos residuos farmacéuticos ingresan al ciclo del agua por diversas vías, siendo las plantas de tratamiento de aguas residuales una de las principales fuentes de entrada, ya que muchos de estos compuestos no son retenidos en sus procesos y, además, debido a que varios de estos residuos son descargados directamente al ecosistema. Un motivo de inquietud adicional respecto a estos fármacos es la detección de algunos de ellos, como el ibuprofeno, el diclofenaco, la carbamacepina y el ácido acetilsalicílico, en aguas potables, lo cual incrementa la contaminación del entorno (Delgado, 2011). Según las propiedades fisicoquímicas de los fármacos, sus metabolitos y productos de degradación, así como las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a las aguas subterráneas, contaminando los mantos acuíferos o quedar retenidas en el suelo, acumulándose y potencialmente afectando al ecosistema y a los seres humanos a través de la cadena trófica (Pérez, 2007). A nivel global, los fármacos más ampliamente utilizados son analgésicos, antihipertensivos y antimicrobianos. Los analgésicos, en particular, son de los fármacos más consumidos y se caracterizan por ser comúnmente automedicados. Se ha reportado la presencia de diclofenaco y ácido acetilsalicílico en aguas residuales, así como naproxeno, ibuprofeno y acetaminofén en aguas residuales hospitalarias (Ashp, 1999). Además, se ha identificado la presencia de metabolitos del ibuprofeno, lo cual subraya la importancia de comprender las rutas metabólicas de cada compuesto para determinar o descartar el origen de su toxicidad (Jiménez, 2011). A la luz de lo expuesto, es imperativo desarrollar sistemas más modernos que sean ecológicos, eficaces en la degradación o eliminación completa de los contaminantes ambientales y, por ende, que constituyan una técnica alternativamente limpia. Los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) se funda

mentan en la generación de especies reactivas de oxígeno, como los radicales hidroxilos, que poseen un electrón no apareado y, por tanto, presentan tiempos de vida cortos. Esto les permite reaccionar activamente con diversas especies químicas que, en otras circunstancias, serían muy difíciles de degradar. Los AOPs se revelan como una alternativa superior a otros métodos convencionales, al generar productos de oxidación termodinámicamente estables, como dióxido de carbono, agua y compuestos orgánicos biodegradables. Dentro de los POA, la fotocatalisis desempeña un rol esencial, ya que aprovecha la energía solar mediante un fotocatalizador (Ameta, 2018). Adicionalmente, estos fotocatalizadores han demostrado ser eficaces para abordar problemáticas relacionadas con la contaminación ambiental y la demanda energética. El término "fotocatalizador" es una fusión de "foto", relacionada con fotón, y "catalizador", una sustancia que altera la velocidad de una reacción en su presencia. Por consiguiente, los fotocatalizadores son materiales capaces de modificar la velocidad de una reacción química cuando se exponen a la luz. A este fenómeno se le conoce como fotocatalisis. Este proceso engloba reacciones que ocurren mediante el aprovechamiento de la luz y un semiconductor. El componente que absorbe la luz y actúa como catalizador para las reacciones químicas es conocido como fotocatalizador, lo que confirma que todos los fotocatalizadores son, en esencia, semiconductores. La fotocatalisis representa un fenómeno en el que la exposición de un material semiconductor a la luz genera un par electrón-hueco, dando origen a la actividad de degradación de contaminantes orgánicos por medio de la eficacia fotocatalítica. Se pretende diseñar la mezcla ternaria ($\text{ZnO/g-C}_3\text{N}_4/\text{CeO}_2$) ya que ofrece mayor degradación de contaminantes orgánicos, una mayor estabilidad a largo plazo y estos sistemas tienen mejor eficacia fotocatalítica, mecánica y transmitancia óptica.

Metodología

Con el fin de lograr la optimización de los materiales, se construyó un diagrama de fases ternario que fungió como superficie de respuesta con tres variables. Cada variable estuvo representada por un material y se llevó a cabo con la asistencia del software Statistica 2016®. En este programa se diseñó la superficie en forma de triángulo, donde los puntos dentro del diagrama representan combinaciones de los componentes en diferentes proporciones masivas, mientras que los vértices corresponden a los componentes puros de

cada material. Las proporciones se calcularon para obtener 5 gramos de cada muestra, y se determinaron mediante análisis estadístico, como se detalla en la Tabla 1. La síntesis se realizó mediante combustión sólida a una temperatura de 500 °C en una atmósfera oxidante, utilizando una rampa de 2 °C por minuto.

Para consultar la simbología utilizada a lo largo del texto, se puede hacer referencia a la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidades másicas en (g) necesarias de cada precursor para combinar compuestos puros y binarios.

SIMBOLOGÍA	CeO ₂ (g)	ZnO (g)	C ₃ N ₄ (g)
Zn	0.0	4.5	0.0
Ce	5.1	0.0	0.0
CN	0.0	0.0	3.9
ZnCN	0.0	2.3	1.9
CeCN	2.5	0.0	1.9
ZnCe	2.5	2.3	0.0

Para registrar los patrones de difracción de rayos X (DRX) se utilizó el difractómetro avanzado Bruker D8. Se empleó el espectrómetro de adsorción UV-Vis Varian CARY 300 para realizar estudios espectrales a temperatura ambiente entre 200-800 nm.

Análisis y discusión de los resultados

La Figura 1 muestra los resultados del análisis de difracción de rayos X para las muestras en estado puro. En la muestra de zinc (Zn), se identificaron difracciones provenientes de los planos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) confirmando la presencia de la estructura hexagonal característica

del óxido de zinc. Este hallazgo fue validado mediante el archivo JCPDS No. 75-0576. En cuanto a la muestra de cerio (Ce), se identificaron los planos (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331), (420) y (422), los cuales concuerdan con la estructura cristalina cúbica del óxido de cerio. La fase cristalina fue corroborada utilizando el archivo JCPDS N. 65-2975. Por último, la muestra de nitruro de carbono (CN) presentó ángulos de difracción a 24.5° y 13.1° , correspondientes a los planos (002) y (100) característicos de este compuesto. Estos resultados fueron respaldados por la bibliografía (Fuentes-Torres, 2021).

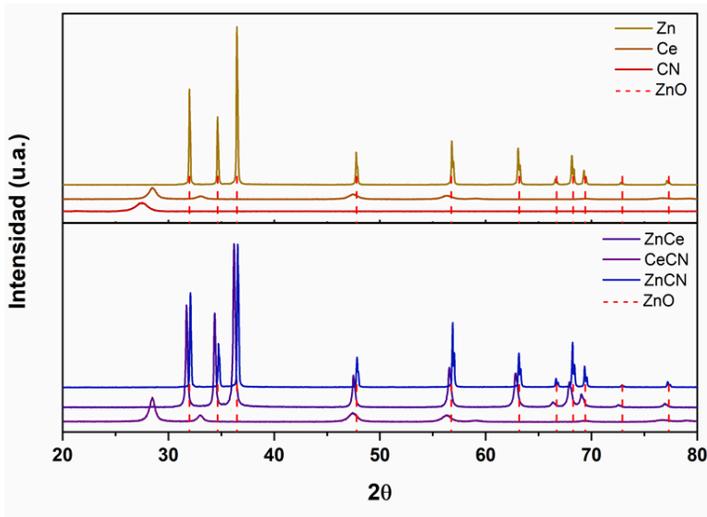


Figura 1. Patrones de difracción de los catalizadores.

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos a partir de las muestras binarias. En la muestra ZnCN, se identificó la estructura hexagonal característica del óxido de zinc, cuya autenticidad se respaldó mediante el archivo JCPDS No. 75-0576. La presencia de carbono en el compuesto afecta la intensidad de los picos de difracción, resultando en un ensanchamiento y ligera disminución, lo cual sugiere una menor cristalinidad (Sasirekha, 2018). Por otro lado, en la muestra CeCN se identificó la estructura cúbica del óxido de cerio, la cual fue corroborada por el archivo JCPDS No. 65-2975. La combinación de urea y nitrato de cerio, bajo la influencia de calor, conduce a una liberación de energía durante su descomposición (Vipin, 1989). La presencia de urea aumen-

ta el tamaño de las partículas debido a la energía liberada durante la descomposición a baja temperatura (Wynne, 1987). En lo que respecta a la muestra ZnCe, se observaron patrones de difracción de rayos X idénticos a los del óxido de zinc. Sin embargo, no se pudo asignar la estructura hexagonal wurzita del óxido de zinc debido a un desplazamiento de los patrones de 0.5° (consultar Figura 2B). Se ha documentado la existencia de una heterounión entre el óxido de zinc y el óxido de cerio lo que da lugar a una de las muchas polimorfias del óxido de zinc. Esta heterounión se atribuye a los enlaces -Ce-O- y -Zn-O- (Cerrato, 2018).

Los resultados de las muestras en estado puro se presentan en la Figura 5. La muestra de Zn exhibe un borde de absorción a 446 nm, una característica que concuerda con la literatura (Chi, 2020; Wittawat, 2020). En cuanto a las muestras de Ce y CN, sus bordes de absorción se encuentran a 428 y 460 nm respectivamente, lo cual está en línea con lo reportado en la bibliografía (Tomova, 2015; Ding, 2018).

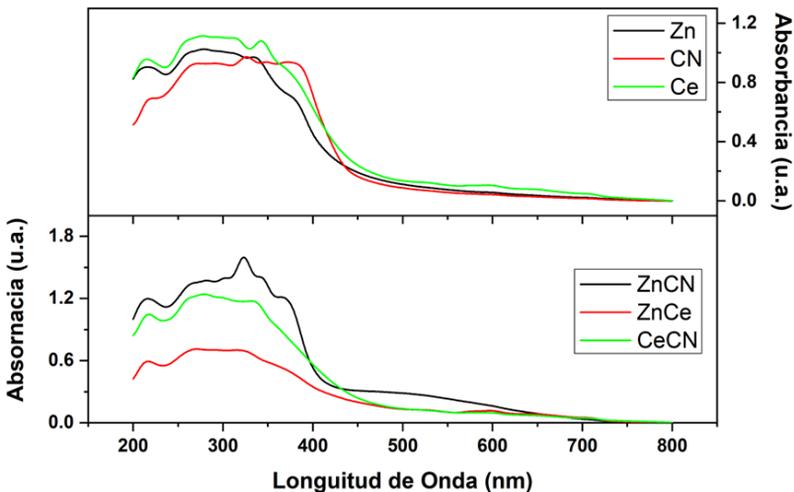


Figura 2. Espectros UV de sólidos de los catalizadores.

El análisis por UV de las muestras binarias se muestra en la Figura 2. La muestra Zn-CN presenta bordes de absorción a 700 y 422 nm. Esto indica que este material absorbe en la región del rojo, sugiriendo que la interacción entre el óxido de zinc, el carbono y el nitrógeno logra desplazar la activación a la región visible. A partir del análisis de difracción de rayos X, se descarta la presencia de nitruro de carbono en la mezcla binaria Zn-CN, y de acuerdo con la literatura, la interacción entre el óxido de zinc y el nitruro de carbono no logra un desplazamiento hacia el rojo (Hu, 2020). Sin embargo, el óxido de zinc dopado con nitrógeno podría ser capaz de causar este efecto en las propiedades electrónicas del óxido de zinc (Osman, 2016).

La muestra Zn-Ce presenta una activación a una longitud de onda de 500 nm, y la interacción entre las especies provoca un desplazamiento en la absorción en comparación con sus contrapartes puras (Zn y Ce). De acuerdo con Xiong et al., la presencia de cerio en el óxido de zinc tiene un efecto fotosensibilizador y desplaza la activación hacia el rojo (Xiong, 2017). Por otro lado, la muestra Ce-CN muestra una brecha de absorción cerca de los 473 nm. Esta brecha es ligeramente mayor en comparación con la muestra Ce (461 nm). Esta leve mejora se debe al dopaje de nitrógeno, que introduce un nuevo nivel de energía en el espacio intrabanda del CeO₂ y reduce la energía requerida a través del nivel del dopante (Shen, 2020).

El borde óptico corresponde a las energías del fotón que generan transferencias electrónicas, a partir de esto es posible determinar la energía de band gap (E_g) y existen diferentes modelos empíricos. El E_g se estimó mediante la ecuación de Tauc y a partir de los espectros de absorción UV (Figura 2), teniendo en cuenta que:

$$\alpha(E) \propto (E - E_g)^{m/2}$$

Donde $\alpha(E)$ es el coeficiente de absorción para un fotón de energía E , y $m=4$ para una transición indirecta entre bandas (Pelizzeti, 1985). Las energías de brecha de banda calculadas mediante un ajuste lineal de la pendiente de la abscisa se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Ancho de banda y región espectral de activación

MUESTRA	ANCHO DE BANDA (eV)	REGIÓN ESPECTRAL
CN	2.52	Azul
Zn	2.98	Azul
Ce	3.91	Azul
ZnCN	2.68	Rojo
CeCN	3.07	Azul
ZnCe	2.98	Verde

La energía de la banda prohibida (E_g) es un factor crucial que influye en las propiedades de transporte electrónico de los materiales. Los valores de E_g proporcionan información sobre el efecto y la interacción entre las distintas especies presentes en cada muestra. En el caso de la muestra de ZnO, se observa un ancho de banda que coincide con lo documentado en la literatura (Wu, 2021). El óxido de cerio, por su parte, exhibe una E_g que varía entre 3.1 y 3.8 eV, dependiendo del precursor y del método de síntesis (Li, 2020; Rejesh, 2020). La muestra de Ce presenta una E_g cercana a la reportada, y cualquier diferencia leve se atribuye al proceso de síntesis. Se ha informado que la E_g del nitruro de carbono es aproximadamente de 2.51 eV cuando se utiliza urea como precursor (Zhu, 2021). La muestra CN muestra una E_g similar a la documentada en la literatura. En cuanto a las muestras binarias ZnCN, ZnCe y CeCN, se observa un cambio significativo en los valores de E_g en comparación con sus contrapartes puras.

Con respecto a la actividad catalítica de los materiales tanto puros como binarios mencionados anteriormente, se llevó a cabo la degradación de una solución de Ácido Acetilsalicílico a temperatura ambiente. Las capacidades de los materiales para fotodegradar la molécula objetivo se presentan en la Figura 3.

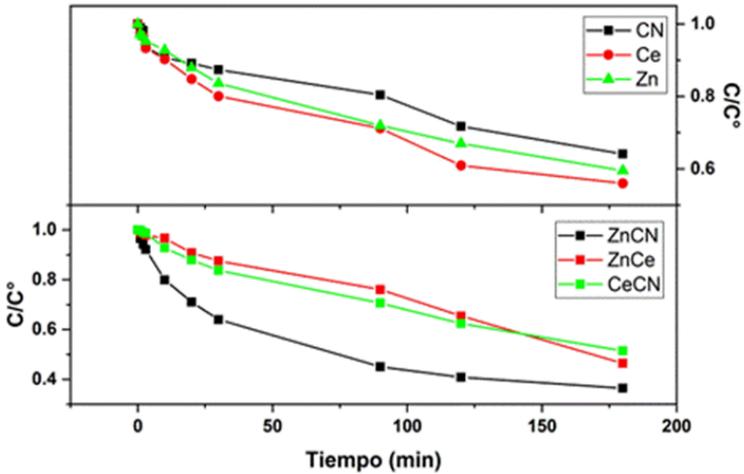


Figura 3. Perfil de concentración a través del tiempo de la fotodegradación.

Los avances en la degradación de los catalizadores puros hacia la molécula objetivo muestran un notable progreso en la reducción del contaminante en menos de una hora de reacción, siendo el cerio el que logra degradar la mayor cantidad durante la primera y segunda hora. Los catalizadores binarios, también representados en el gráfico, muestran una disminución del contaminante. Las mezclas binarias de Zn-Ce y Ce-CN muestran una degradación casi similar en función del tiempo, pero después de casi tres horas, la mezcla Zn-Ce termina degradando un mayor porcentaje durante la reacción. En cuanto a la mezcla binaria Zn-CN, al inicio de la reacción presenta un alto nivel de degradación sobre la molécula objetivo, y a medida que transcurre el tiempo, la degradación se incrementa, siendo este sistema binario el que arrojó los mejores resultados entre los tres previamente mencionados.

El criterio de un valor-p menor que 0.05 es comúnmente utilizado para la selección de modelos en análisis estadísticos (Días, 2019). En nuestro caso, este criterio nos llevó a elegir el modelo cuadrático, indicando una relación significativa entre las variables estudiadas. Además, es importante considerar los coeficientes de determinación (r^2) al seleccionar un modelo. El modelo cuadrático demostró un r^2 mucho mayor en comparación con el modelo lineal, lo que sugiere que proporciona un ajuste más preciso a los datos experimenta-

les. Esta mayor proporción de variabilidad explicada por el modelo cuadrático respalda aún más su elección como el modelo más adecuado para nuestro estudio, véase Figura 4.

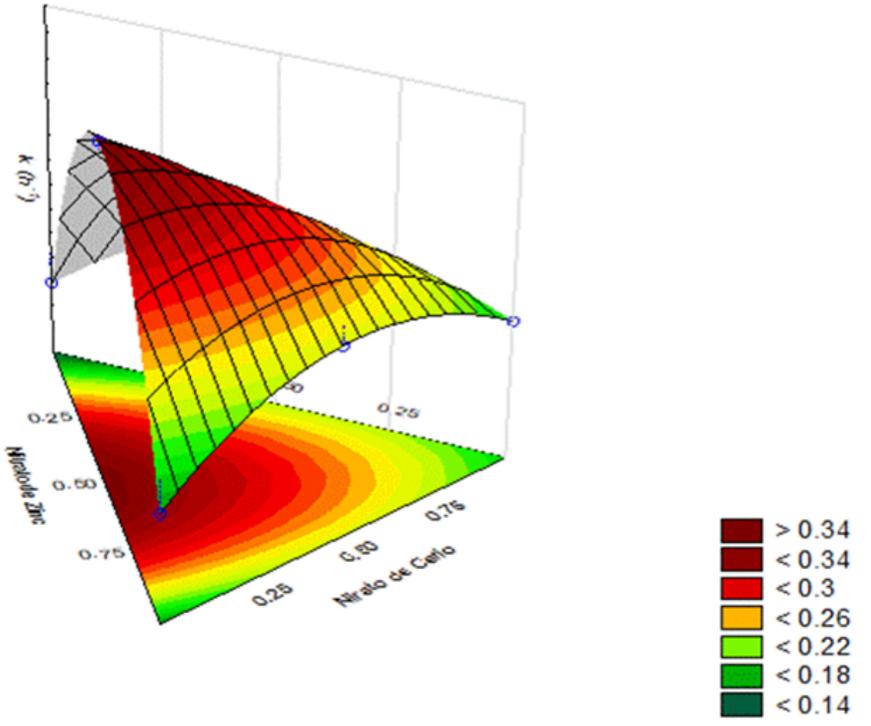


Figura 4. Superficie de respuesta en función de la constante cinética.

A partir del gráfico de trazas, podemos comprender cómo influyen los diferentes elementos en la respuesta, como se ilustra en la Figura 5. Se observa que el valor de la constante cinética aumenta a medida que se añade nitrato de cerio, alcanzando un máximo. De manera similar, al agregar urea, se obtiene un máximo que coincide con la presencia de nitrato de zinc. No obstante, se observa un efecto contrario con el cerio sobre la constante cinética, la cual disminuye a medida que se incrementa su concentración. Estos resultados sugieren una interacción compleja entre los componentes y su influencia en la cinética de la reacción.

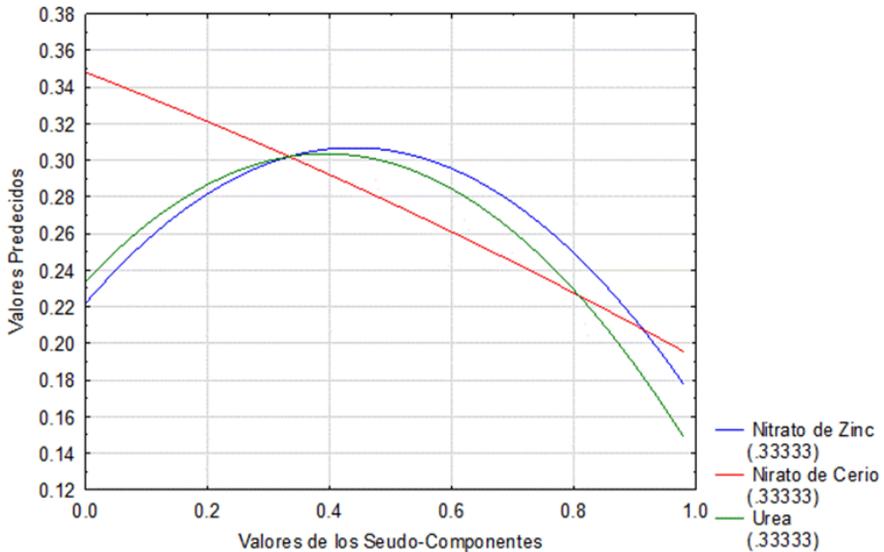


Figura 5. Valores de la variable (k , constante cinética) en función de la proporción.

Conclusiones

Los resultados revelan el extraordinario potencial del sistema binario Zn-CN como catalizador fotocatalítico para degradar el Ácido Acetilsalicílico. La caracterización por difracción de rayos X confirma la influencia del carbono en la estructura de ZnO, resultando en una menor cristalinidad, pero con interacciones valiosas. La Espectroscopia UV-Vis destaca la activación en la región visible gracias a la interacción de ZnO con carbono y nitrógeno, abriendo nuevas perspectivas en aplicaciones fotocatalíticas. Adicionalmente, se descarta la presencia de nitruro de carbono en la mezcla binaria Zn-CN, mientras que el óxido de zinc dopado con nitrógeno sugiere un potencial desplazamiento hacia la región roja, gracias a sus propiedades electrónicas. Las condiciones y metodología de reacción, junto con el uso adecuado de proporciones masivas de catalizadores, han generado resultados altamente óptimos. Destaca que el catalizador Ce se posiciona como el más eficaz entre los componentes puros, mientras que, en las mezclas binarias, el Zn-CN demuestra un impresionante potencial al degradar más del 63 % del Ácido A-

ceilsalicílico en un tiempo récord. Estos hallazgos no solo amplían nuestro entendimiento de la fotodegradación, sino que también prometen avances significativos en la aplicación práctica de estos sistemas en el tratamiento de compuestos orgánicos.

Referencias bibliográficas

- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Photocatalysis. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>.
- ASHP. (1999). Therapeutic Position Statement on the Safe Use of Oral Nonprescription Analgesics. *Am J Health Syst Pharm*, 56(11), 1126-1131.
- Barnes, K., et al. (2008). A national reconnaissance of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants in the United States - I) Groundwater. *Sci Total Environ*, 402, 192-200.
- Cerrato, E., Gionco, C., Paganini, M.C., Giamello, E., Albanese, E., & Pacchioni, G. (2018). Origin of Visible Light Photoactivity of the CeO₂/ZnO Heterojunction. *ACS Appl. Energy Mater.*, 1, 4247-4260. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00887>.
- Chi, N., Mai, T., Thi, T., Van, T., & Juang, R. (2020). Enhanced Removal of Various Dyes from Aqueous Solutions by UV and Simulated Solar Photocatalysis over TiO₂/ZnO/RGO Composites. *Separation Purification Technology*, 232, 115962. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115962>.
- Delgado, S. (2011). Evaluación de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de canarias (tecnología). Proyecto Universidad de La Laguna.
- Dias, A.C., Fontes, M.P.F., Reis, C., Bellato, C.R., & Fendorf, S. (2019). Simplex-Centroid Mixture Design Applied to Arsenic (V) Removal from Waters Using Synthetic Minerals. *J. Environ. Manage.*, 238, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.099>.
- Ding, J., Long, G., Luo, Y., Sun, R., Chen, M., Li, Y., Zhou, Y., Xu, X., & Zhao, W. (2018). Photocatalytic Reductive Dechlorination of 2-Chlorodibenzo-p-Dioxin by Pd Modified g-C₃N₄ Photocatalysts under UV-Vis Irradiation: Efficacy, Kinetics and Mechanism. *J. Hazard. Mater.*, 355, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.014>.
- Fuentes-Torres, M.O., Ortiz-Chi, F., Espinosa-González, C.G., Aleman, M., Cervantes-Uribe, A., Torres-Torres, J.G., Kesarla, M.K., Collins-Martínez, V., Godavarthi, S., & Martínez-Gómez, L. (2021). Facile Synthesis of Zn Doped G-C₃N₄ for Enhanced Visible Light Driven Photocatalytic Hydrogen Production. *Top. Catal.*, 64, 65-72. <https://doi.org/10.1007/s11244-020-01298-9>.

- Gil, J. M., Soto, M. A., Usma, I. J., & Gutiérrez, D. O. (2012). Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments. *Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos*, 7(2), 52-73. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>.
- Hu, C., Hu, X., Li, R., & Xing, Y. (2020). MOF Derived ZnO/C Nanocomposite with Enhanced Adsorption Capacity and Photocatalytic Performance under Sunlight. *J. Hazard. Mater.*, 385, 121599. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121599>.
- Jiménez, C. (2011). Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Rev. Lasallista Investig.*, 8(2), 143-153.
- Li, P., Wang, B., Qin, C., Han, C., Sun, L., & Wang, Y. (2020). Band-Gap-Tunable CeO₂ Nanoparticles for Room-Temperature NH₃ Gas Sensors. *Ceram. Int.*, 46, 19232-19240. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.261>.
- Osman, H., Su, Z., Ma, X., Liu, S., Liu, X., & Abduwayit, D. (2016). Synthesis of ZnO/C Nanocomposites with Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity. *Ceram. Int.*, 42, 10237-10241. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.147>.
- Pelizzetti, N.S., & E. (1985). *Journal of Organometallic. J. Organomet. Chemistry*, 297, 331-340.
- Pérez, S., & Barceló, D. (2007). Fate and occurrence of X-ray contrast media in the environment. *Anal Bioanal Chem*, 387, 1235-1246.
- Poynton, H. C., & Vulpe, C. D. (2009). Ecotoxicogenomics: Emerging Technologies for Emerging Contaminants. *Journal of the American Water Resources Association*, 45, 83-96.
- Rajesh, K., Sakthivel, P., Santhanam, A., & Venugobal, J. (2020). Incorporation of Silver Ion on Structural and Optical Characteristics of CeO₂ Nanoparticles: White LED Applications. *Optik*, 216, 164800. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164800>.
- Sasirekha, C., Arumugam, S., & Muralidharan, G. (2018). Green Synthesis of ZnO/Carbon (ZnO/C) as an Electrode Material for Symmetric Supercapacitor Devices. *Appl. Surf. Sci.*, 449, 521-527. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.172>.
- Shen, Z., Xia, Q., Li, Y., Yin, C., Ge, Z., Li, X., & Wang, Y. (2020). Adsorption-Enhanced Nitrogen-Doped Mesoporous CeO₂ as an Efficient Visible-Light-Driven Catalyst for CO₂ Photoreduction. *J. CO₂ Util.*, 39, 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101176>.
- Tomova, D., Iliev, V., Eliyas, A., & Rakovsky, S. (2015). Promoting the Oxidative Removal Rate of Oxalic Acid on Gold-Doped CeO₂/TiO₂ Photocatalysts under UV and Visible Light Irradiation. *Sep. Purif. Technol.*, 156, 715-723. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.070>.
- Vipin, P.M., Sanjaynath, V.V., Varma, H.K., Warriar, K.G.K., & Damodaran, A.D. (1989). Non-Linearity in Rare Earth Doped Zinc Oxide Varistor Prepared by Flash Combustion Method. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 5, 233-236. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(89\)80006-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(89)80006-8).

- Watkinson, A. J., et al. (2009). The occurrence of antibiotics in an urban water shed: From waste water to drinking water. *Sci Total Environ*, 407, 2711-2723.
- Wittawat, R., Rittipun, R., Jarasfah, M., & Nattaporn, B. (2020). Synthesis of ZnO/TiO₂ Spherical Particles for Blue Light Screening by Ultrasonic Spray Pyrolysis. *Mater. Today Commun.*, 24, 101126. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101126>.
- Wu, Y., Zhang, D.B., Zhao, Z., Pei, J., & Zhang, B.P. (2021). Enhanced Thermoelectric Properties of ZnO: C Doping and Band Gap Tuning. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 41, 1324-1331. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.042>.
- Wynne, A.M. (1987). The Thermal Decomposition of Urea: An Undergraduate Thermal Analysis Experiment. *J. Chem. Educ.*, 64, 180. <https://doi.org/10.1021/ed064p180>.
- Xiong, Z., Lei, Z., Xu, Z., Chen, X., Gong, B., Zhao, Y., Zhao, H., Zhang, J., & Zheng, C. (2017). Flame Spray Pyrolysis Synthesized ZnO/CeO₂ Nanocomposites for Enhanced CO₂ Photocatalytic Reduction under UV-Vis Light Irradiation. *J. CO₂ Util.*, 18, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.01.013>.
- Zhu, D., & Zhou, Q. (2021). Nitrogen Doped G-C₃N₄ with the Extremely Narrow Band Gap for Excellent Photocatalytic Activities under Visible Light. *Appl. Catal. B Environ.*, 281, 119474. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119474>.

CAPÍTULO 10

EL AMBIENTE Y SUS RIESGOS ECOLÓGICOS. ENFOQUE SOCIAL DEL COMPROMISO PARA LA SOSTENIBILIDAD

José del Carmen Méndez González¹, Edelia Claudina Villarreal Ibarra², Daniela Reyes Raya³

Resumen

El uso indiscriminado de la tecnología ha llevado a la sobreexplotación de recursos, producto de la alta demanda por contar con múltiples comodidades, para un planeta tan incesantemente sobrepoblado colocando al ambiente a riesgos ecológicos constante y que de alguna manera se tiene que ver ese impacto desde el punto vista social para que se genere un compromiso que lleve a mejorar la sostenibilidad. Para ello se deben incrementar alternativas sanas, para hacer frente a las consecuencias para disminuir el desbalance del planeta que lleva al límite el desequilibrio en el cuidado ambiental.

En este capítulo se abordan distintos puntos de vistas en favor al ambiente, las consecuencias por no cuidarlo y lo que la sociedad debe de hacer en pro del mismo, sin dejar de lado la formación de recursos humanos mediante una educación y concientización ambiental. Principalmente se pretende la realización de análisis que permita la identificación del cuidado del ambiente, sus riesgos ecológicos, su impacto social y sus efectos que pueden afectar a las nuevas generaciones. En pro de contar con una comunidad ocupada del cuidado del ambiente para vivir y disfrutar de las riquezas y bondades que el planeta tierra nos proporciona.

Palabras claves. *Medio Ambiente, educación ambiental, Desarrollo sostenible, Recursos renovables.*

¹ Profesor de Carrera. Universidad Popular de la Chontalpa. México, jose.mendez@upch.mx

² Profesor de Carrera Titular. Universidad Popular de la Chontalpa. México. Autor correspondiente: edelia.villareal@upch.mx

³ Estudiante. Universidad Popular de la Chontalpa. México, reyesdani1998r@gmail.com

Introducción

A lo largo de la convivencia del ser humano con el planeta se hace latente una crisis climática en perjuicio de millones de personas producto de alteraciones climatológicas que poseen características intrínsecas aún incomprendidas por los seres humanos; bajo el supuesto de una base química se sabe de condiciones debidas al manido efecto invernadero “si bien sólo una décima de grado del calentamiento global sería imputable a este” (Sánchez, 2020), al agujero de la capa de ozono, a los residuos tóxicos, a la contaminación de las aguas subterráneas, del aire, de la lluvia ácida, entre otros efectos; así cómo muchas de las actividades humanas que consumen recursos naturales, remueven vegetación, utilizan suelos productivos, modifican el paisaje, desplazan personas, producen residuos o emisiones. Es decir, generan cambios en las condiciones ambientales que pueden ser muy variables en cuanto a su significancia, magnitud, duración, extensión, entre otras. En el capítulo se realiza un análisis sobre la sobreexplotación de los distintos recursos, así como las consecuencias que esta acción conlleva; la identificación de las características y criterios que deben considerarse en una evaluación de impacto ambiental y concientización en la juventud para el cuidado del medio ambiente. Finalmente se puede identificar la necesidad de promover la educación ambiental desde temprana edad en apego a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuesto por la Naciones Unidas.

Metodología

El capítulo está organizado sobre la base de preguntas, con ello se busca imprimirle una perspectiva metodológica heurística a este análisis. La primera pregunta, la introducción, orienta la fundamentación del estudio, los efectos ambientales y lo enmarca en el enfoque de los ODS. La segunda pregunta, de carácter contextual, ofrece información sobre la comprensión en los jóvenes de los sistemas biológicos, sobre la base del concepto de biología ambiental. En tercer lugar, nos preguntamos sobre las alteraciones al medio ambiente y las alternativas para mitigar el impacto. La cuarta pregunta es el papel que cumple la educación para el logro de la Conciencia en los jóvenes ante la crisis ambiental. Responderla nos permite presentar la perspectiva conceptual que orienta el artículo. Finalmente, a modo de conclusiones, nos preguntamos por la importancia de vincular el medio ambiente con la educación.

¿Cómo es la comprensión de los sistemas biológicos en los jóvenes?

La perspectiva moderna desde el enfoque de los niños y jóvenes, que son quienes heredarán el planeta requiere de considerar diversos aspectos relevantes que les permitan comprender que las ramas ambientales visto como una ciencia de la vida, experimentó un desarrollo extraordinario en las últimas décadas, que ha llevado a una gran diversificación de los ámbitos de estudio.

Surge el concepto de biología ambiental como el estudio de la relación de los sistemas biológicos (organismos, especies, ecosistemas) con su entorno. Sin lugar a dudas, es una ciencia que actúa de una manera muy profunda en el estudio de la biodiversidad y del papel que juega en el funcionamiento de la biosfera. Sin embargo, no es la única que está arraigada en disciplinas con una larga tradición de reconocimiento de los diferentes seres vivos; también lo es la Botánica o la Zoología, ramas que tratan del funcionamiento de los organismos y su respuesta al medio o la fisiología; además con una vocación integradora del conjunto de seres vivos y del medio lo es la Ecología (Acevedo et al., 2013; p. 8).

Desde sus orígenes la humanidad ha conseguido convertirse en un factor geológico extraordinariamente importante, al tomar de la Tierra todo lo que necesita y esta acción, sobre todo en el siglo XX la ha alterado física, química y biológicamente, provocando distintos efectos, como: el agotamiento, la erosión, la desertización, el deterioro y el envenenamiento de la piel de la Tierra, conocida también como suelo (Costeau, 1992; p. 136). Es necesario, sin lugar a dudas comprender a la naturaleza como proveedora como lo que señala Herrera (2008, p. 20), cuando se adentra uno al ambiente es necesario saber cuándo nos referimos a la naturaleza; es decir el mundo natural se ve envuelto en los fenómenos del mundo físico y también a la vida en general. Por ende, no se incluye a los objetos artificiales y por supuesto la intervención del ser humano. En otras palabras, se encuentra la naturaleza en un perfecto equilibrio. Por esa razón es necesario considerar que las nuevas generaciones en México y en otros países deberán comprender la evolución del cuidado del ambiente, como uno de los principales retos que enfrenta la humanidad, visualizar que se dé la satisfacción de las necesidades presentes y futuras de las sociedades, conservando, al mismo tiempo los recursos naturales y manteniendo los procesos ecológicos que sustentan la vida en el planeta (Avenidaño et al., 2012; p. 17). Como todo aprovechamiento que el ser humano busca en el planeta, sin

lugar a dudas, la problemática ambiental que se vive tiene su origen en el encuentro de los seres humanos modernos con la naturaleza. El humano, de pronto se da cuenta de la enorme riqueza de recursos naturales y de los vastos territorios que hacen pensar que existen grandes posibilidades de explotación de recursos presumiblemente ilimitados y que permitirían, a la postre, la expansión y dominio económico de algunas regiones (Suárez, 2014). Al pasar de los años, muchos de esos recursos y riquezas hicieron notar que su disponibilidad es completamente limitada, y peor aún, la naturaleza misma nos ha mostrado que todas las actividades que el ser humano realice en su desarrollo económico e industrial, en cualquier espacio y tiempo y por el motivo que sea, altera las condiciones naturales de nuestro medio ambiente. Esto no es nuevo, pero sí, cada vez es más crítico (Avenidaño et al., 2012; p. 17). En la convivencia en las aulas y en la vida diaria, al contar con recursos renovables, bajo el supuesto de inagotables, como la energía producida por el Sol o el viento, la fuerza de las mareas, etc.; así como los recursos renovables limitados. Hoy en día son los más demandados y entre ellos destacan el petróleo, el carbón y el gas natural, mientras a los que consideramos como potencialmente renovables Costeau (1992; p. 133), señala que estos, dependen de la velocidad de explotación del hombre frente a la de regeneración del recurso, se incluyen los recursos biológicos como la agricultura, la ganadería y la pesca.

¿Cuáles son las alteraciones al medio ambiente y las alternativas para mitigar el impacto?

Durante el aprovechamiento de los distintos recursos por la naturaleza, se ha generado una alteración de los ciclos biogeoquímicos, Avenidaño et al. (2012, p. 92), afirma que casi todas las actividades humanas realizadas en el presente afectan uno o más ciclos biogeoquímicos, lo cual puede ser de consecuencias muy graves para el futuro de la vida en nuestro planeta. De considerar lo señalado por Medellín (2006) citado por Herrera (2008, p. 112), sobre cuatro “leyes o principios de la ecología”, es imperativo difundir a las nuevas generaciones. La primera ley de la ecología indica que “Todo está relacionado con lo demás”, es decir al vivir en relación estrecha con la naturaleza y lo que se haga o deje de hacer tendrá sus repercusiones tanto positivas como negativas.

Por otra parte, enfocarse en lo marcado en la segunda ley y considerar que “Todo va a dar a algún lado”; en la naturaleza no existe el concepto de desecho

mientras que en los procesos industriales sí, estos son lineales, son impositivos, no cumplen una función en los ciclos naturales, sino que perturban y generan deterioro y contaminación. Al no prestarle atención a las leyes anteriores, luego entonces es necesario que analicemos la tercera ley, y esta señala que “Nada es gratis”; y esto acarrea sus respectivas consecuencias. Finalmente, la cuarta regla señala “La naturaleza es más sabia”, al hacer caso omiso y pensar que “el hombre dominaría la naturaleza” se ha perdido de vista que tan poderosa es la madre naturaleza y que tan poco se le conoce, aún con los grandes avances tecnológicos. Lo analizado en estas reglas, muestra la relación de que lo generado se regresará con creces (Camacho, 2011; p. 38). Silva (2012, p. 7), Ramos (2010, p. 7), explican que el hombre ha conocido su ambiente desde tiempos remotos, así mismo señalan que el ambiente es un sistema global y este está constituido tanto por elementos naturales como artificiales, los cuales pueden ser de naturaleza física, química, biológica, sociocultural y de sus interrelaciones, en permanente modificación por la acción humana o natural. Se destaca la importancia de incentivar a las nuevas generaciones a comprender que la contaminación del ambiente, se considera a toda presencia de sustancias, energía u organismos extraños en un ambiente determinado en cantidades, tiempo y condiciones tales, que pueden causar desequilibrio ecológico (Arellano, 2002; p. 22). Un ejemplo tal y como es el caso de la contaminación del agua, el comportamiento de diversos compuestos gaseosos en el aire, se puede precipitar hacia esta en forma de CO₂, SO_x y NO_x, además de partículas sólidas suspendidas. Sin olvidarnos de las sustancias líquidas que se vierten en lagos, ríos y océanos o los residuos sólidos provenientes de las ciudades los cuales son depositados en diversas áreas donde causan severos daños al suelo.

Para visualizar tal impacto, es necesario identificar las fuentes de los contaminantes, como lo señalan Arellano y Guzmán (2011, p. 14), Encinas (2011, p. 4) y Arellano (2002, p. 23), donde los contaminantes son eliminados por fuentes de emisión que pueden ser naturales como artificiales y que estos están en constante interacción con el aire, el agua y el suelo tal y como lo señala Encinas (2011, p. 4) que los contaminantes sufren una serie de procesos, no solo transporte y dispersión, sino también reacciones químicas, los cuales serán convertidos en contaminantes secundarios, tal y como se presenta en la Figura 1.

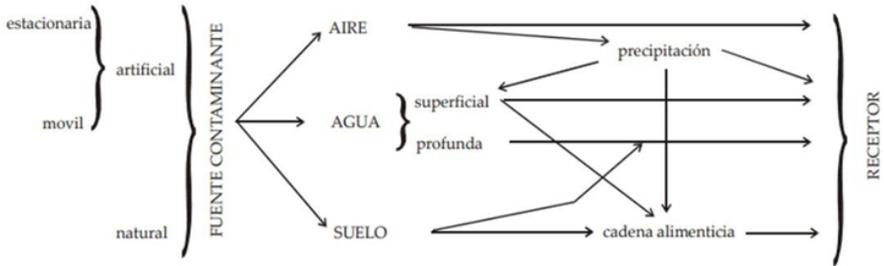


Figura 1. Proceso de contaminación (Encinas, 2011, p.4)

Esta evolución que se da al estar interactuando el ser humano con la naturaleza, genera un impacto ambiental y como señala Ramos (2010, p. 57), se considera como la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Por otra parte, y desde el punto de vista Español (2002, p. 12), considera que es "La alteración inducida en el medio ambiente por una determinada actuación, tal y como es y tal como se percibe". Ante una situación e alteración ambiental no queda más que realizar una evaluación de impacto ambiental y en donde se pueden considerar varios puntos para una buena evaluación ambiental tal como se ve en la Figura 2.

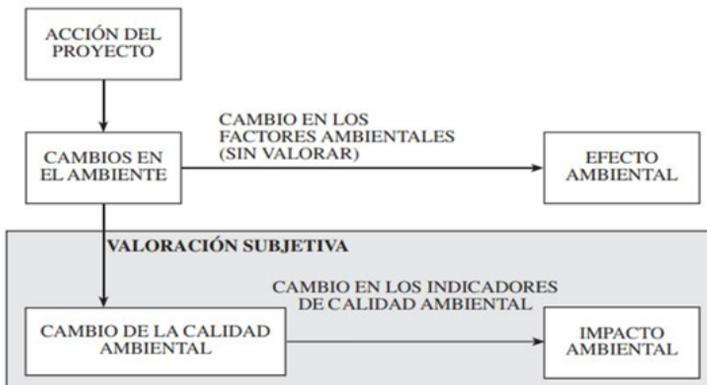


Figura 2. Ciclo del impacto ambiental (Garmendia et al. 2005. p. 18).

Durante la implementación de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Arboleda (2005, p. 32) y, por otra parte, Español (2002, p. 23), señalan que es muy importante realizar un inventario cuando se trate de implementar una evaluación que haya generado un impacto al ambiente y se requiere la participación de especialistas en cada área del medio ambiente, que identifiquen los mecanismos ambientales que pueda activar el proyecto y que además valoren los efectos de estos procesos. Por tal razón García y Priotto (2009, p. 32), describen en la Figura 3 que el medio ambiente se concibe como un entorno de una colectividad humana, medio de vida compartido con sus componentes naturales y antrópicos.

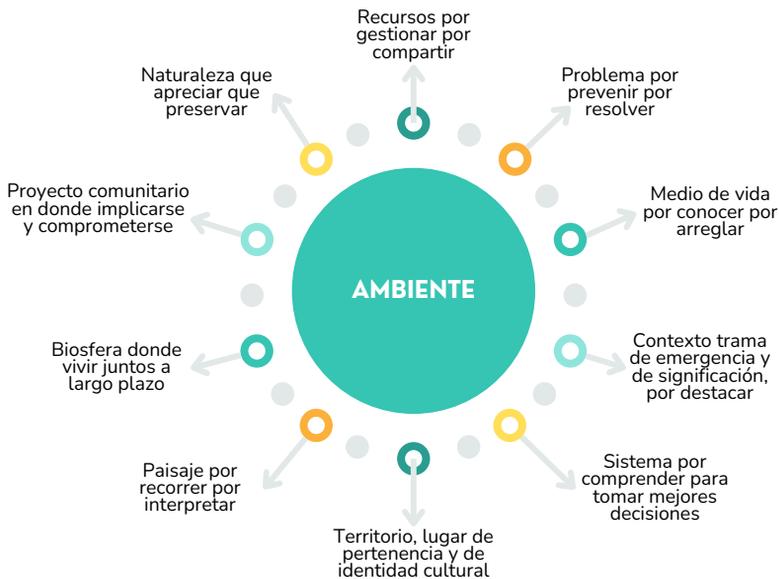


Figura. 3. Componentes del ambiente en un inventario (García y Priotto.2009; p. 32).

¿Qué papel cumple la educación para el logro de la conciencia en los jóvenes ante la crisis ambiental?

Es transcendental que las nuevas generaciones se eduquen y creen conciencia ante la crisis ambiental que se vive en la actualidad y sean capaces de enfrentar y remediaren un futuro no tan lejano. Tal como lo señala Español (2002, p.23) los problemas tienen efectos globales y sus soluciones van más allá del ámbito

del estado-nación; por otra parte, puede traer ventajas a la relación entre lo local y lo global para contribuir a la conformación de una sociedad sostenible. Y en ese ámbito educativo es necesario entender lo señalado por Pérez (2015, p. 67-69) quien remarca la necesidad de la transformación de una política comunitaria en el ámbito global de los problemas ambientales.

En ese sentido entran en acción las distintas organizaciones al cuidado del ambiente, quienes forman a los jóvenes en educación ambiental y retoma importancia la bioética, ciencia que proveerá de herramientas indispensables para la conservación o cuidado del medio ambiente; para que sean los profesionales especializados en transmitir los conocimientos científicos y valores ambientales (Sánchez, 2020). Además, aquellos que vigilarán que se cumplan las leyes y las normas establecidas, así como proponer nuevas leyes para mejorar el cuidado de nuestro planeta y la preservación de la raza humana.

Las actividades de estas entidades pueden ir desde realizar campañas informativas sobre temas ecológicos hasta invertir cientos de millones de dólares para apoyar la consecución de proyectos económicos sustentables. A nivel nacional e internacional se pueden encontrar decenas de organizaciones preocupadas por proteger el bienestar de la Tierra. Existen 35 mil organizaciones en México, sin embargo, solo mil se dedican a velar por el sector ambiental. Las más conocidas e importante en su actividad son: Greenpeace (Fundada en 1971 en Vancouver, Canadá), WWF (World Wildlife Fund) (Conocida como Fondo Mundial para la Naturaleza, Suiza en 1961; The Nature Conservancy (Conocida por sus siglas TNC, USA en 1951), PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) en 1972 sede en la ciudad de Nairobi, Kenia (Marrero, 2021).

En el marco de la celebración anual del Calendario Ambiental se realizan celebraciones o conmemoraciones promovidas por organizaciones nacionales o internacionales alrededor del mundo. De este modo, se pueden encontrar fechas de sensibilización y de promoción de causas que buscan **concientizar a la población mundial sobre diferentes problemas ecológicos**. Temas de agenda ambiental como el **cambio climático**, la **explotación de los recursos naturales** y la **conservación de los ecosistemas**, se pueden encontrar durante todo el año.

Solo por mencionar algunas de las fechas que se celebraran a nivel mundial durante todo el año témenos las siguientes fechas: en enero 26 (día Mundial de la Educación Ambiental); el 28 (día Mundial para La Reducción de las Emisiones de CO₂); en Marzo témenos al día 22 (Día Mundial del Agua); en Abril está el día 22 (Día de la Tierra); en Mayo está el día20 (Día Mundial de las Abejas) y el 22 (Día Mundial de la Biodiversidad - ONU); en Junio el día 5 (Día Mundial del Medio Ambiente); en Julio 3 (Día Internacional sin Bolsas de Plástico); el 1er Lunes de Octubre se celebra el (Día Mundial del Hábitat - ONU), etc. Testa (2007, p. 12), considera que sin lugar a dudas la educación en todos los niveles, es fundamental para lograr el desarrollo sostenible, al educar a las personas para el desarrollo sostenible, incluir la protección ambiental en los programas de estudios y promover un equilibrio entre los objetivos económicos, las necesidades sociales y la responsabilidad ecológica.

Es éste un ámbito marcado por una escasez crónica de recursos y que imposibilita la preparación de los alumnos para el futuro tanto a nivel técnico como de valores. En ese sentido, la bioética guarda relación con otras disciplinas de vanguardia, como la denominada ciencias ambientales una materia que nace para aumentar el conocimiento sobre la complejidad de los ecosistemas que nos rodean y nuestras relaciones como especie en el medio ambiente; ambas servirán de canal para la transmisión del mensaje ambiental para una educación ambiental y por ende la conservación del medio ambiente (Sánchez, 2020). Tan acertadamente Have (2010, pp. 11-12), afirma que, para concebir y aplicar políticas racionales, coherentes y escasas, se requiere conocer cuál es el soporte del desarrollo sostenible, lo que se desea conservar en la naturaleza y con qué finalidad.

¿Por qué es importante el vínculo entre medio ambiente y educación de cara al futuro?

La Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU describe en el informe Burtland la desprotección del medio ambiente, una distribución inequitativa de la riqueza y fracturas en el tejido social; y no fue hasta el 2015 cuando en la Asamblea de las Naciones Unidas se aprobaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el avance, que sin lugar a dudas deja de manifiesto la importancia de la educación ambiental para renovar y crear la idea que la educación tiene la responsabilidad directa sobre la formación de ciudadanos que construyan desarrollo sostenibles, particularmente se busca

establecer en el presente artículo el ODS 4, el cual plantea que al 2030 se debe de asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, por lo que el quehacer educativo apoyado con la acción de la ODS en nuestras universidades en cuestión de la enseñanza-aprendizaje es el espacio propicio para desarrollar esa idea a través de una formación más pertinente a estas exigencias. Este objetivo contribuye al cumplimiento de prácticamente todos los ODS (2018; p. 29), como se destaca por Casañas y Miñano (2019, pp. 202-221) donde señalan que las ODS son una gran oportunidad para potenciar la educación para el desarrollo sostenible en la formación universitaria y se pretende orientar al profesorado a la hora de integrar las ODS en la docencia formal universitaria con la finalidad de fomentar las competencias para el desarrollo sostenible. Expresado de otra manera supone el logro equilibrado del desarrollo económico, el desarrollo social y la protección al medio ambiente bajo la perspectiva de la cohesión social, la convivencia democrática y el respeto por las diferencias cobran sentido en la idea de desarrollo (Naciones Unidas 2002). No queda nada que añadir al terrorífico panorama de una civilización que se pone en peligro a sí misma. La ganancia de poder del «progreso» técnico-económico se ve eclipsada cada vez más por la producción de riesgos (Beck, 1998; p. 19).

En México, el derecho al medio ambiente se instituyó en el texto del artículo 4 constitucional en 1999, estableciendo que: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”, sin olvidarnos que el ambiente es nuestro entorno; nuestra vida y su calidad depende de la vida del planeta, sus recursos y sus especies, por ello debemos tomar las medidas necesarias para protegerlo.

Análisis y discusión de resultados

Se ha analizado la raíz de los distintos acontecimientos que ha vivido la humanidad desde la época de la revolución industrial hasta nuestros días, se enfocó en analizar, en estudiar y en entender, por qué nuestro planeta se está desde una perspectiva un lugar poco llamativo para seguir viviendo en él, debido al daño que le estoma haciendo día a día por tanta contaminación; por lo que es necesario que se cumplan al pie de la letra las distintas normas nacionales e internacionales, debemos mirar a otros países para identificar co-

mo le están haciendo frente a este problema que no tiene fronteras y que a todos nos está afectando, y pocos países se están interesando en un problema que es de todos.

Desde ese punto de vista y de manera específica es necesario que los estudiantes desde cualquier trinchera siempre tengan la curiosidad de que acciones se deben de emprender en nuestro planeta con fines de no continuar contaminando nuestro hogar. Desde el punto de vista social se ve un panorama bastante gris hacia el ambiente y que enmarca un sinfín de acontecimientos que de manera indirecta parecieran no tener una raíz o fuente de origen, pero todo esto nos afecta en este demandando cuidados, que la explosión demográfica nos está gritando que ya somos mucho y nuestra tierra nos mira con su cara seca y erosionada dándonos alimentos precarios y bajos de nutrientes.

Conclusiones

Se identifica la importancia del enfoque global al realizar una evaluación de impacto ambiental, los criterios que se debe de seguir en los distintos ecosistemas, sin dejar de lado el respeto y cuidado para preservar su equilibrio. Dar atención a la bioética y educación ambiental como herramienta imprescindible para lograrla tan ansiada conciencia ambiental y garantizar la sostenibilidad como un compromiso para las generaciones venideras.

La identificación de que existen distintas organizaciones ambientales o ecológicas que existen en México y a nivel internacional quienes, a través de pláticas, implementan normas y acciones en pro del ambiente para el logro de una economía ambiental sana y sin repercusiones para el planeta.

Finalmente, al afirmar que, de involucrarse y poner de nuestra parte, saldremos beneficiados desde el uso de la tecnología, el esparcimiento sano en un ambiente recreativo para la disminución del estrés por el trabajo que realizamos para sobrevivir en un ambiente que esté libre de toxinas y de desechos y promover una educación para un mejor futuro.

Referencias bibliográficas

- Acevedo, B. R. L., Severichi, S. C. A. y Castillo, B. M. E. 2013. *Biología y microbiología Ambiental. Prácticas de Laboratorio*. Ed. Eumed. Ned. España. p. 8.
- Arboleda, G. J. A. 2005. *Manual para la evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades*. Colombia. p. 1-32.
- Arellano, D. J. 2002. *Introducción a la Ingeniería ambiental*. Ed. Alfa omega. I. P. N.México. p. 17
- Arellano, D. J. y Guzmán, P. J. E. 2011. *Ingeniería ambiental*. Ed. Alfa omega. México. p. 14.
- Avendaño, P. R. C., Galindo, U. A. R. y Angulo, R. A. A. 2012. *Ecología y educación ambiental*. Ed. UAS-DGEP. México. p. 15.
- Beck, U. 1998. *La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*. Ed. Paidós básica. España. pp. 13-46.
- Camacho, A. I. 2011. *Ecología y medio ambiente*. Ed. ST-Editorial.com. México. p. 2-75.
- Casañas, E. B. y Miñano, R. R. 2019. Integración de los ODS en la enseñanza formal universitaria. In: Barrón, R. A. y Muñoz, R. J. M. 2019. Ed. GIPEP. España. pp. 202-221.
- Costeau, J. Y. 1992. Capítulo 5. ¿Hacia dónde vamos? In: *Impacto ambiental. El planeta herido*. Por Valdés, V. Ed. Calamêo. España. pp. 132-162.
- Encinas, M. M. D. 2011. *Medio Ambiente y Contaminación. Principios básicos*. Ed. Attribution-Non Commercial-No Derivatives 4.0 International. p. 3.
- Español, E. I. 2002. *Herramientas para la gestión ambiental. Curso Internacional de Gestión Ambiental*. Ed. Probides. Facultad de Ciencias Facultad de Ingeniería. Uruguay. pp. 12 – 114.
- García, D. y Priotto, G. 2009. *Educación ambiental. Aportes políticos y pedagógicos en la construcción del campo de la Educación Ambiental*. Ed. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Argentina. pp. 15-137.
- Garmendia, S. A., Salvador, A. A., Crespo, S. C. y Garmendia, S. L. 2005. *Evaluación de impacto ambiental*. Ed. Pearson Prentice Hall. España. pp. 4-17.
- Herrera, C. J. C. 2008. *Introducción al estudio del medio ambiente*. Ed. Agenda ambiental. México. p. 20.
- Marrero, A. S. V., & Asuaga, C. (2021). *Gestión Ambiental en las Organizaciones: Una revisión de la literatura*. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, (18), 5.
- Naciones Unidas (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3)*. Santiago. p. 29.

- Pérez, P. G. (2015). Capítulo 2. Ciudadanía ambiental: participación y responsabilidad colectiva en favor del medio ambiente In: Alfie, C. M. 2015. Litnoah. Ambiente y territorio I. Ed. DCSH UAMC. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa. México. pp. 67-69.
- Ramos, C. J. R. (2010). La ingeniería ambiental como eje defensor de la sostenibilidad económica agroindustrial. Ed. Monitoreo ambiental - Grupo Eumed.net. Perú. pp. 7-25.
- Reynosa, N. E. (2015). Crisis ambiental global Causas, consecuencias y soluciones prácticas. University Cesar Vallejo. Perú. pp 51.
- Sánchez de la Iglesia, E. (2020). Bioética y educación ambiental como compromiso para la sostenibilidad. Revista Iberoamericana De Bioética, (13), 01–10. <https://doi.org/10.14422/rib.i13.y2020.005>
- Silva, T. B. A. (2012). Evaluación Ambiental: impacto y daño. Un análisis jurídico desde la perspectiva científica. Tesis Doctoral. Ed. Universidad de Alicante. España. p. 35.
- Suárez Tamayo, S., & Molina Esquivel, E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. Revista cubana de higiene y epidemiología, 52(3), 357-363.
- Ten Have, H. A. M. J. (2010). Introducción: medio ambiente, ética y políticas. In: Ética ambiental y políticas internacionales. UNESCO. 2010. Ed. UNESCO. Francia. pp. 11-12.
- Testa, S. (2007). Plan Estratégico de Desarrollo Sostenible en red para Roraima (Brasil). Master en Cooperación Internacional y Gestión de Proyectos. Tesina de maestría. Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net. p. 12.

2



CONSUMO Y ACCIONES RESPONSABLES



CAPÍTULO 11

ACTIVIDAD ANTIFÚNGICA DEL SILICATO DE SODIO (SS) SOBRE LA PUDRICIÓN DE LA CORONA DEL BANANO CV. 'ENANO GIGANTE' EN EXPERIMENTOS IN VITRO

Vianey González-Jiménez¹, Pedro A. Moscoso-Ramírez²

Resumen

Se evaluó la actividad antifúngica del silicato de sodio (SS) sobre la pudrición de la corona (PC) del banano cv. 'Enano Gigante' mediante experimentos in vitro. Las concentraciones de 70, 90 y 110 mM de SS suprimieron totalmente el crecimiento micelial de *Colletotrichum musae*, seguidos por la concentración de 50 mM de SS con un valor de inhibición del crecimiento micelial de 83.4 %. En la inhibición de la germinación de conidios de *Colletotrichum musae*, la concentración más efectiva de SS fue 110 mM, la cual inhibió 84.0 %. El resto de las concentraciones de SS tuvieron inhibiciones de germinación de conidios más bajas.

Palabras claves. *Colletotrichum musae*, postcosecha, silicato de sodio, in vitro, pudrición de la corona

Introducción

Los plátanos son cultivados en los trópicos y subtropicos, con una producción de 150 millones toneladas anuales, India es el país productor más grande, seguido por China, Indonesia, Ecuador y Filipinas, quienes aportan el 53 % de la producción mundial total (FAO, 2020).

¹ Vianey González-Jiménez. Dra. en Ciencias Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. vianey.gonzalez@upch.mx. ORCID: 0000-0003-2746.

² Dr. Pedro A. Moscoso-Ramírez. Dr. en Ciencias. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México. Autor correspondiente : moscoso@colpos.mx. ORCID:0000-0003-3056-8062.

México es el décimo segundo productor de plátano a nivel mundial con 2,384,778 toneladas por año (FAO, 2020). La infección por hongos en las plantas es la causa más frecuente de pérdidas extensas en la agricultura (Maqbool et al., 2010).

El banano (*Musa acuminata* L.) es una fruta tropical altamente perecedera que tiene una vida postcosecha corta y sufre pérdidas graves después de la cosecha (De Costa and Erabadupitiya, 2005). La pudrición de la corona (PC) causada por un complejo fúngico, *Colletotrichum musae* (Finlay and Brown, 1993), *Thielaviopsis paradoxa* (Alvindhia et al., 2002) y *Fusarium* spp (Alvindhia et al., 2000; Hirata et al., 2001; Jimenez et al., 1993), es la principal enfermedad postcosecha (Kyu et al., 2007; Mirshekari et al., 2012) en México y de todas las áreas productoras de banano en todo el mundo (Lassois et al., 2008). Algunos hongos están involucrados en más de una enfermedad en los bananos, como *Colletotrichum musae*, que puede causar tanto la pudrición de la corona como la antracnosis; además, estos patógenos pueden existir en los campos de banano como saprófitos en hojas de banano o tejidos de inflorescencia muertos (Nelson, 2008). La incidencia de la enfermedad aumenta periódicamente en las temporadas de lluvias (Krauss and Johanson, 2000), condición ambiental que es muy recurrente en las principales zonas productoras de plátano en Tabasco.

El manejo de la enfermedad se realiza principalmente con fungicidas químicos sintéticos convencionales (procloraz, imazalil, y tiabendazol). Sin embargo, estos fungicidas traen consigo varios problemas: i) contaminación del medio ambiente, ii) acumulación de residuos en el fruto por arriba del límite permisible y iii) aparición de cepas del hongo resistentes a los fungicidas (Jinasena et al., 2011; Gatto et al., 2011). Ante esta problemática, se deben aplicar métodos culturales, físicos, químicos de baja toxicidad y biológicos como una alternativa a los fungicidas sintéticos convencionales para controlar las enfermedades postcosecha de los frutos del plátano (Alvindhia and Natsuaki, 2007; Lassois et al., 2008). Las sustancias químicas de baja toxicidad reconocidas como GRAS incluyen algunos aceites esenciales, extractos de plantas y otros compuestos naturales, pero también algunas sales orgánicas e inorgánicas tales como, el cloruro de calcio, carbonatos, sorbatos, benzoatos, acetatos, sales silicatos, entre otras (Palou and Pérez-Gago, 2021). El silicato de sodio es una sustancia GRAS, que se ha probado contra varias enfermedades fúngicas con éxito. Por ejemplo, Bi et al. (2006) la evaluó contra el patógeno *Alternaria alternata* en melones Hami (*Cucumis melo* L. var. inodoro Jacq.).

Pavanello et al., (2016) la probó sobre *Monilinia fructicola* en melocotón. Mientras que Youssef et al. (2020) lo evaluó contra *Musicillium theobromae* en banano.

Metodología

Patógeno fúngico

El hongo *Colletotrichum musae* se obtuvo de la colección de cultivos fúngicos del Campus Tabasco. El hongo fue resembrado y cultivado en medio papa dextrosa agar (PDA) e incubado a 25°C durante 7 a 14 días.

Experimentos in vitro

Efecto del silicato de sodio en el crecimiento micelial de *Colletotrichum musae*

Para evaluar el efecto del SS (38.7 % de ingrediente activo) sobre el crecimiento micelial de *C. musae*, se probaron los siguientes tratamientos: 30, 50, 70, 90 y 110 mM, más el control. Se usó un diseño experimental completamente al azar. Cada tratamiento consistió de 5 cajas de Petri conteniendo PDA adicionado con las diferentes concentraciones de SS (cada caja de Petri fue una repetición). Se preparó una solución acuosa madre o stock concentrada a 1000 mM de SS, la cual se adicionó al medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA), cuando dicho medio estaba a la temperatura de 45- 50°C para lograr las concentraciones (Tratamientos) finales deseadas de SS. Aproximadamente 20 ml de medio PDA con el SS adicionado se vaciaron en cada caja Petri. 24 horas después del vaciado en las cajas de Petri, un disco de micelio de 5 mm de diámetro con medio de cultivo PDA de *Colletotrichum musae* de 7 días de edad, se tomó de la colonia y se colocó en el centro de otra caja de Petri (100 mm de diámetro), conteniendo las concentraciones deseadas de SS adicionado en el PDA y se incubó a 25°C a obscuridad. El experimento se realizó por duplicado.

Se midieron dos diámetros (mm) de la colonia de *C. musae* de manera perpendicular uno del otro a los 9 días de incubación. El crecimiento micelial se expresó como la inhibición de crecimiento micelial en porcentaje (%ICM), la cual

se calculó mediante la siguiente fórmula: $\%ICM = ((DCC - DCT) / DCC) * 100$

Dónde:

DCC= Diámetro de la colonia en el control en mm DCT= Diámetro de la colonia en el tratamiento en mm

Efecto del silicato de sodio en la germinación de conidios de *Colletotrichum musae*

Se evaluaron cinco tratamientos con SS a 30, 50, 70, 90 y 110 mM, más el control sobre la germinación de conidios de *C. musae*. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar. El ensayo se realizó usando la técnica del portaobjeto con concavidad. Cada tratamiento con 4 repeticiones (cada repetición fue una concavidad). Se preparó una solución acuosa madre a la concentración de 1000mM de SS, la cual se adicionó al medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA), cuando dicho medio estaba a la temperatura de 45¹- 50°C. Para lograrlas concentraciones finales deseadas de SS, aproximadamente 100 µl de PDA con el SS adicionado de los diferentes tratamientos se colocaron en cada concavidad de los portaobjetos, usando una micropipeta. Transcurrido 24 horas, se colocó y distribuyó una alícuota de 20 µL de una suspensión de conidios de *Colletotrichum musae* a la concentración de 10 conidios mL de 14 días de edad sobre la superficie del PDA añadido con SS contenida en las concavidades de los portaobjetos. Los portaobjetos con concavidad se colocaron dentro de cajas Petri y se incubaron a 25°C. Se valoró la germinación de conidios hasta que germinó más del 80 % de los conidios en el control. Se realizó el conteo de conidios germinados de un total de 200 conidios por tratamiento (4 repeticiones por tratamiento) a las 12 h después de la inoculación. Los conidios se consideraron germinados cuando la longitud del tubo germinativo correspondía a la mitad o más del diámetro del conidio. El experimento se realizó dos veces. La variable se expresó como el porcentaje de la inhibición de germinación de conidios de *C. musae* (%IGC) y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\%IGC = (1 - (CGT/CGC)) * 100$$

Dónde:

CGT= número de conidios germinados en el tratamiento CGC= número de conidios germinados en el control.

Análisis estadístico

Los datos de inhibición de crecimiento micelial en porcentaje se transformaron a la función arcoseno antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA) con el software Statgraphics (Statgraphics Plus, v 5.1; Manugistics Inc., Rockville, Maryland, EE.UU.). La significancia estadística se consideró en el nivel $P = 0.05$. Se aplicó la prueba de medias de la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher para separar medias cuando fue necesario. Los valores mostrados son medias no transformadas.

Análisis y discusión de los resultados

Efecto del silicato de sodio en el crecimiento micelial de *Colletotrichum musae*

El análisis de varianza mostró un efecto estadístico significativo ($P \leq 0.05$) del SS sobre la inhibición del crecimiento micelial de *C. musae* después de un periodo de incubación de 9 días a 25°C a oscuridad (Figura 1). Las concentraciones de 70, 90 y 110 mM de SS suprimieron totalmente el crecimiento micelial de *C. musae*, seguidos por la concentración de 50 mM de SS con un valor de inhibición del crecimiento micelial de 83.4 %.

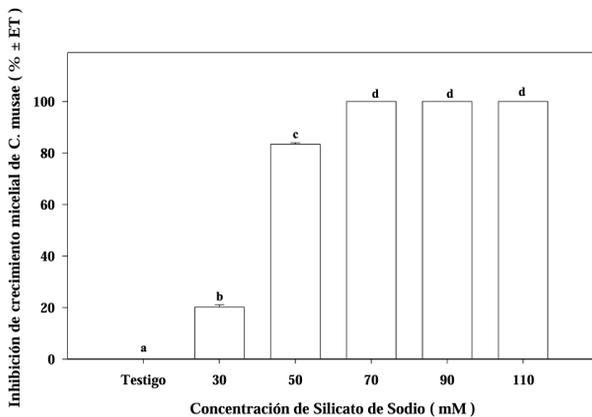


Figura 1. Efecto in vitro del silicato de sodio sobre la inhibición de crecimiento micelial de *C. musae* después de 9 días de incubación a 25°C a oscuridad.

Letras diferentes en columnas significan diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher ($P \leq 0.05$) aplicado a datos transformados al arcoseno. Barra es el error típico (ET; $n = 5$).

Se muestran las medias de inhibición de crecimiento micelial no transformadas de dos experimentos.

Efecto del silicato de sodio en la germinación de conidios de *Colletotrichum musae*

Con respecto al efecto del SS en la inhibición de la germinación de conidios de *C. musae*, se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) después de 12 h de incubación a 25°C a oscuridad. La concentración más efectiva de SS fue 110 mM, la cual inhibió 84.00 % (Figura 2). El resto de las concentraciones de SS tuvieron inhibiciones de germinación de conidios más bajas.

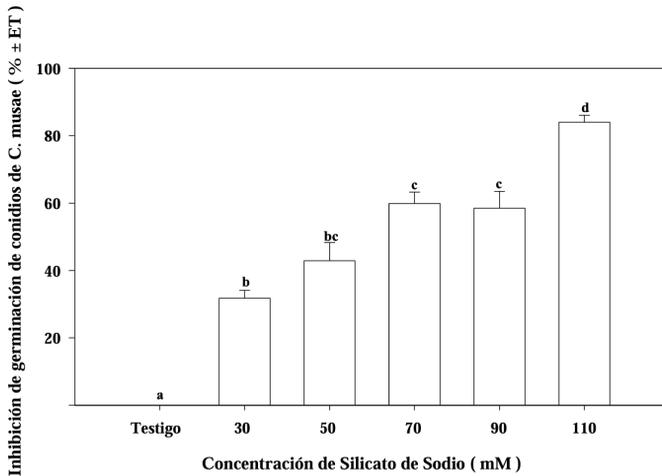


Figura 2. Efecto del silicato de sodio sobre la germinación de conidios de *C. musae* incubados a 25°C a oscuridad durante 12 h.

Columnas con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher ($P \leq 0.05$) aplicado a datos transformados al arcoseno. Barra indica error típico (ET; $n = 4$). Se muestran medias de inhibición de germinación de conidios no transformadas de dos experimentos.

El crecimiento micelial de *C. musae* se inhibe por completo con silicato de sodio (SS) a 70 mM, y la germinación de conidios tuvo una inhibición de 84.00 % a 110 mM de SS. Otros estudios han reportado que el silicato de sodio al 4 % inhibe por completo el crecimiento micelial de *Mucicillium theobromae* en banano (Youssef et al., 2020). Ge et al. (2017) reportan que la concentración de 200 mM de silicato de sodio inhibe el 76.10 % del crecimiento micelial de *Trichothecium roseum*. Bi et al. (2006) estudiaron el efecto del silicato de sodio para controlar *Alternaria alternata*, *Fusarium semitectum* y *Trichotheciumroseum*, encontrando que, a 100 mM, el crecimiento micelial de los hongos se inhibió. Un estudio más reciente revela que concentraciones de 2.5 y 3 % de silicato de sodio inhibe hasta el 100 % el crecimiento del micelio de *C. brevisporum* aislado de frutos con antracnosis en papaya Maradol (Vidal-Vergara et al., 2022).

El silicato de sodio al 0.5 y 1.0 % inhiben solo el 9 % del crecimiento micelial de *Colletotrichum gloeosporioides* en papaya (Rayón-Díaz et al., 2021). Concentraciones de 2000 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de silicato de potasio inhiben completamente el crecimiento micelial de *Colletotrichum sp* (Nikagolla et al., 2021).

En varias investigaciones se reporta actividad antifúngica con otras sales, el hipoclorito de sodio a 90 g l^{-1} reduce el crecimiento micelial de *C. musae* hasta 85.00%. Aplicaciones de 15 mM de ácido propiónico reducen hasta 75 % el crecimiento micelial de *C. musae* (Khan et al., 2001). De Costa and Gunawardhana (2012) reportan que una concentración de 300 mM de bicarbonato de sodio inhibe completamente la esporulación y reduce el crecimiento del micelio en un 95 %.

Alvindia and Natsuaki 2007 estudiaron diversas sales (g l^{-1} de carbonato de sodio, 5 g l^{-1} de hipoclorito de sodio, bicarbonato de sodio, cloruro de calcio y 6 g l^{-1} de cloruro de sodio) para control de la PC en banano causada por *Lasiodiplodia theobromae*, *Colletotrichum musae*, *Thielaviopsis paradoxa* y *Fusarium verticillioides* inhibiendo completamente la germinación de conidios. Recientemente Qiao et al. (2022) reportan que concentraciones de 20 mg l^{-1} de hinokitiol inhibe completamente el crecimiento micelial y la germinación de esporas de *C. musae*.

Otras investigaciones han informado que el aceite de clavo (0.1 $\mu\text{l/ml}$) suprime totalmente el crecimiento micelial y la germinación de conidios de *C. musae* (Rizwana, 2018). El control del crecimiento micelial y germinación de conidios in vitro de *C. musae* por aplicaciones de tratamientos con SS probablemente ha causado cambios morfológicos y deshidratación de las hifas como parte de su mecanismo fungistático, así como escasez de micelio, asimetría, hinchazón, alteraciones de las paredes de las células, disolución de los orgánulos celulares, y membrana plasmática o material electrónico en las células hifales (Li et al., 2009; Shen et al., 2010; Wang et al., 2010; Niu et al., 2016). Así como disminución en el tamaño y producción de conidios (Datnoff and Heckman, 2014). También se ha demostrado que la aplicación de silicio induce la producción de compuestos antifúngicos después de la penetración del patógeno en la epidermis de las células (Cai et al., 2009) y actúa como modulador de la resistencia del huésped a patógenos (Fauteux et al., 2005; Van Bockhaven et al., 2013).

Conclusiones

Según los resultados encontrados se concluye que *Colletotrichum musae* es susceptible al silicato de sodio. El crecimiento micelial se inhibe 100 % a partir de 70 mM y 84 % la germinación de conidios cuando se utiliza una concentración de 110 mM. Se recomienda hacer estudios in vivo en empacadoras de banano que evalúen de manera prospectiva la eficiencia del silicato de sodio, para recomendarlo como sustituto de algunos fungicidas de bases sintética.

Referencias bibliográficas

- Alwindia, D.G., and Natsuaki, K.T. (2007). Control of crown rot-causing fungal pathogens of banana by inorganic salts and a surfactant. *Crop Protection* 26:1667-1673. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.02.008>.
- Alwindia, D.G., Kobayashi, T., Yaguchi, Y and Natsuaki, K.T. (2000). Symptoms and the associated fungi of post-harvest diseases on non-chemical bananas imported from the Philippines. *Jpn. J. Trop. Agric.*, 44, 87-93.
- Alwindia, D.G., Kobayashi, T., Yaguchi, Y., and Natsuaki, K.T. (2002). Pathogenicity of fungi isolated from non-chemical bananas. *Jpn. J. Trop. Agric.* 44, 215e223.
- Bi, Y., Tian, S. P., Guo, Y. R., Ge, Y. H., and Qin, G. Z. (2006). Sodium silicates reduces postharvest decay on Hami melons: Induced resistance and fungistatic effects. *Plant Disease*, 90(3): 279–283. <http://doi.org/10.1094/PD-90-0279>.

- Cai, K, Gao, D, Chen, J, Luo, S. (2009). Probing the mechanisms of silicon-mediated pathogen resistance. *Plant Signal Behav.* 4(1):1-3. doi: 10.4161/psb.4.1.7280. PMID: 19568332;PMCID: PMC2634059.
- Datnoff, L. E., and Heckman, J. R. (2014). Silicon fertilizers for plant disease protection. In *Proc. of the 16th World Fertilizer Congress of CIECRIO*. De Janeiro-RJ, Brazil, 20– 24 October, pp. 37–38.
- De Costa, D.M., and Erabadupitiya, H.R.U.T. (2005). An integrated method to control postharvest diseases of banana using a member of the *Burkholderia cepacia* complex. *Postharvest Biology and Technology.* 36, 31-39.
- <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.11.007>
- De Costa, D.M., and Gunawardhana, H.M.D.M. (2012). Effects of sodium bicarbonate on pathogenicity of *Colletotrichum musae* and potential for controlling postharvest diseases of banana'. *Postharvest Biology and Technology* 68:54-63. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.02.002>
- Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J., and Belanger. (2005). Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiology Letters*, 249:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.06.034>
- Finlay, A.R., and Brown, E.A. (1993). The relative importance of *Colletotrichum musae* as a crown rot pathogen on Windward Island bananas. *Plant Pathol.* 40, 568e575. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1993.tb01471.x>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). FAOSTAT statistics database 2019. 16 enero. 2023. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Gatto, M.A, Ippolito, A., Linsalata, V., Cascarano, N. A., Nigr, F., Vanadia, S., and Venere,
- D.D. (2011). Activity of extracts from wild edible herbs against postharvest fungal diseases of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 61(1), 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.02.00510>
- Ge, Y., Chen, Y., Li, C., Wei, M., Lv, J and Meng, K. (2017). Inhibitory effects of sodium silicate on the fungal growth and secretion of cell wall- degrading enzymes by *Trichothecium roseum*. *Journal of Phytopathology*, 165 (9): 620-625 <http://doi.org/10.1111/jph.12600>.
- Hirata, T., Kimishima, E., Aoki, T., Nirenberg, H.I., and O'Donnell, K. (2001). Morphological and molecular characterization of *Fusarium verticillioides* from rotten banana imported into Japan. *Mycoscience* 42, 155e166.
- Jimenez, M., Logrieco, A., and Botalico, A. (1993). Occurrence and pathogenicity of *Fusarium* species in banana fruits. *J. Phytopathol.* 137, 214-220. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1993.tb01341.x>
- Jinasena, D., Pathirathna P., Wickramarachchi, S and Marasinghe, E. (2011). Use of chitosan to control anthracnose on “Embul” banana. In *International Conference on Asia Agriculture and Animal, IPCBEE (Vol. 13, pp. 56-60)*.

- Khan, S.H, Aked, J., Magan, N. (2001). Control of the anthracnose pathogen of banana (*Colletotrichum musae*) using antioxidants alone and in combination with thiabendazole or imazalil. *Plant Pathology* 50: 601-608. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2001.00599.x>.
- Krauss, U and Johanson, A. (2000). Recent advances in the control of crown rot of banana in the Windward Islands. *Crop Prot.* 19: 151-160. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(99\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(99)00097-6).
- Kyu, K. W. N., P. Jitareerat., S. Kanlayanarat., and S. Sangchote. (2007). Effects of cinnamon extract, chitosan coating, hot water treatment and their combinations on crown rot disease and quality of banana fruit. *Postharvest Biology and Technology.* 45, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.020>.
- Lassois, L, Bellaire, L., Jijakli, M.H. (2008). Biological control of crown rot of bananas with *Pichia anomala* strain K and *Candida oleophila* strain O, *Biological Control* 45; 410- 418. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.01.013>.
- Li, Y.C., Bi, Y., Ge, Y.H., Sun, X.J and Wang, Y. (2009). Antifungal activity of sodium silicate on *Fusarium sulphureum* and its effect on dry rot of potato tubers. *J. Food Sci.*, 74(5): 213-217. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01154.x>
- Maqbool, M., Ali A., Ramachandran, S., Smith, D.R, Alderson, P.G. (2010). Control of postharvest anthracnose of banana using a new edible composite coating. *Crop Protection* 29(10): 1136-1141. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.06.005>.
- Mirshekari, A., Ding, P., Kadir, J., and Ghazali, H. M. (2012). Effect of hot water dip treatment on postharvest anthracnose of banana var. Berangan. *Afr. J. Agric. Res.* 7(1): 6-10. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.056>
- Nelson, S.C. (2008). *Mango anthracnose (Colletotrichum gloeosporioides)*. Honolulu (HI): University of Hawaii. 9 p. (Plant Disease; PD-48). <http://hdl.handle.net/10125/12410>
- Nikagolla, N.G.D.N., Ganehenege, M.Y and Daundasekera, W.A.M. (2021). Direct inhibitory effect and enhanced antifungal activity of postharvest soluble silica treatment against anthracnose and crown rot pathogens in banana. *Ceylon Journal of Science* 50 (Special Issue): 415-419. <http://doi.org/10.4038/cjs.v50i5.7931>
- Niu, L., Bi, Y., Bai, X., Zhang, S., Xue, H., Li, Y. and Calderón-Urrea, A. (2016). Damage to *Trichothecium roseum* caused by sodium silicate is independent from pH. *Canadian Journal of Microbiology*, 62 (2): 1-12. <https://doi.org/10.1139/cjm-2015-0657>
- Palou, L, Pérez-Gago, B. (2021). GRAS Salts as Alternative Low-Toxicity Chemicals for Postharvest Preservation of Fresh Horticultural Products. In: Spadaro, D., Droby, S., Gullino, M.L. (eds) *Postharvest Pathology. Plant Pathology in the 21st Century*, vol 11. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56530-5_11
- Pavanello, EP., Brackmann, A., Da Costa, DIF., Both, V., Ludwi, V. (2016). Use of sodium metasilicate for management of peach brown rot. *Agropec. Trop., Goiânia*, v. 46, n. 3, p. 245-253. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4641221>

- Qiao, Y., Xu, L., Xu, G., Cao, Y., Gao, Y., Wang, Y., Feng, J. (2022). Efficacy and potential mechanism of hinokitiol against postharvest anthracnose of banana caused by *Colletotrichum musae*, 161: 113334. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113334>.
- Rayón-Díaz, E., Birke-Biewendt, A. B., Velázquez-Estrada, R. M., González-Estrada, R. R., Ramírez-Vázquez, M., Rosas-Saito, G. H., Gutiérrez-Martínez, P. (2021). Sodium silicate and chitosan: an alternative for the in vitro control of *Colletotrichum gloeosporioides* isolated from papaya (*Carica papaya* L.). *Revista Bio Ciencias* 8, e1059. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1059>
- Rizwana H. (2018). Postharvest control of anthracnose lesions and its causative agent, *Colletotrichum musae* by some oils. *Cell Mol Biol.* 64(4): 52-58. Doi: <http://dx.doi.org/10.14715/cmb/2018.64.4.9>.
- Shen, G.-H., Xue, Q.H., Tang, M., Chen, Q., Wang, L-N., Duan, C-M., Xue, L., and Zhao, J. (2010). Inhibitory effects of potassium silicate on five soil-borne phytopathogenic fungi in vitro. *Journal of Plant Diseases and Protection.* 117(4): 180-184.
- Van Bockhaven, J., Vleeschauwer, D. D and Hofte. (2013). Towards establishing broad- spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. *Journal of Experimental Botany*, 64: 1281–1293. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers329>
- Vidal-Vergara A., Moscoso-Ramírez P., García-De la Cruz R., Landero-Valenzuela N. (2022). Antifungal Effect of Silicon against Anthracnose on Fruit in Papaya Maradol. *Silicon* 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01588-1>.
- Wang, Z., Pu, H., Shan, S., Zhang, P., Li, J., Song, H., and Xu, X. (2021). Melatonin enhanced chilling tolerance and alleviated peel browning of banana fruit under low temperature storage. *Postharvest Biol. Technol.*, 179: 111571. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111571>
- Youssef, K., Mustafa, Z.M.M., Kamel, M.A.M., Mounir, G.A. (2020). Cigar end rot of banana caused by *Musicillium theobromae* and its control in Egypt. *Archives of Phytopathology and Plant Protection.*

CAPÍTULO 12

DESARROLLO DE ALIMENTO BALANCEADO A BASE DE PRODUCTOS ORGÁNICOS PARA GANADO VACUNO DE LA REGIÓN SURESTE DE MÉXICO

Elizabeth Martínez-Valera¹, Rufino Aquino-Bosquez²

Resumen

Actualmente debido al cambio climático, los ganaderos son afectados por la sequía, cuyos tiempos no favorecen en la alimentación del bovino y reducen su peso e incluso llegan hasta la muerte del animal, dándoles consigo una pérdida económica, de igual manera otras personas optan por la limpieza de sus predios con contaminantes, como lo son los pesticidas e insecticidas los cuales no ayudan al desarrollo del pasto y lo único que provocan son la pérdida de nutrientes del subsuelo dejando consigo mismo afectaciones de pastizales. En esta investigación se elabora un alimento con cáscara de naranja, maíz, melaza, soya y sal premezcladas para generar una nutrición balanceada que enriquezca la alimentación del ganado vacuno, mejorando el lapso de tiempo de engorda y la contribución económica, enfocándose a todos aquellos ganaderos que se dedican a dicha actividad de animales de engorda. Este alimento balanceado es favorable, por la reducción del tiempo de engorda y de mejorar la ganancia económica hacia el cliente y por una calidad única, por el origen orgánico de la materia prima empleada, libre de químicos e incluso demostrando que es una buena propuesta porque cuenta con los nutrientes esenciales como: minerales, proteínas y carbohidratos suficientes para una buena alimentación y un buen desarrollo en los bovinos presentaron de acuerdo a los resultados obtenidos, pelaje más suave y brillante, desarrollaron mejor músculo y aumento de peso. Se obtuvo la satisfacción del cliente ya que fueron pocos meses los que estuvieron a prueba y los resultados fueron positivos.

Palabras claves. *Alimento, ganado vacuno, alimentación, orgánico, nutrientes*

¹ Elizabeth Martínez-Valera, elizab.mv@laventa.tecnm.mx. ORCID: 0000-0002-4036-7873. No. CVU 747242. Tecnológico Nacional de México: Campus Villa la Venta, Tabasco, México. Ingeniería Industrial.

² Rufino Aquino-Bosquez. rufino.ab@laventa.tecnm.mx. ORCID:0000-0001-7050-3429. Tecnológico Nacional de México: Campus Villa la Venta, Tabasco, México. Ingeniería Industrial.

Introducción

El alimento natural para el ganado y otros animales domésticos lo constituyen los pastos y los forrajes verdes. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas, en casi ninguna parte del mundo la producción de forrajes es constante durante todo el año. En las zonas templadas, el crecimiento de las plantas se detiene durante los meses de invierno como consecuencia de bajas temperaturas, y en las tropicales, durante los periodos de sequías. En algunas zonas, el exceso de humedad puede ser limitante para la producción de forrajes. En los países con condiciones climáticas extremas, se suplementa el pastoreo de los animales o se reemplaza con forrajes conservados, hasta por periodos de seis meses; lo cual significa que, en los meses de crecimiento favorable de los pastos, se requiere producir el alimento necesario para el todo el año, si se quiere mantener el hato y sostenerlos niveles de producción. (Mena A). La restringida cantidad y calidad de forrajes disponibles es uno de los factores clave que limitan la producción ganadera, sobre todo en regiones que basan la explotación vacuna en el pastoreo directo en los prados de temporada, como en Tabasco. En diversas regiones, el impacto de las variaciones climáticas tales como fuertes precipitaciones, nortes, sequía, inundaciones, etc. afectan la producción forrajera y exigen considerar, además, la Incidencia del manejo que se realiza en pastizales y potreros. (Schlavo, 1989). En las zonas tropicales de México, es común observar que más del 80 % de los ganaderos utilizan el sistema extensivo para producir leche, carne y becerros, siendo este sistema considerado como de bajos insumos donde muy pocas veces se utilizan suplementos alimenticios y minerales. En este sistema de producción los promedios de producción de leche, carne, así como los índices reproductivos son bajos, siendo los principales factores limitantes la estacionalidad en la producción de forrajes a través del año, la baja calidad nutricional de los pastos, la alta incidencia de ecto y endoparásitos, así como el efecto negativo del becerro en crianza tradicional sobre la eficiencia reproductiva de las hembras. (Livas, 2015). La calidad nutricional del forraje disponible en la pradera está directamente relacionada con el estado de madurez el cual a su vez es regulado por la temperatura ambiental. Se sabe ampliamente que a medida que la temperatura se incrementa, el forraje tiende a crecer más rápidamente y su grado de madurez es mayor causando una fuerte disminución del contenido de proteína digestible y un mayor incremento de las fracciones fibrosas indigestibles. En el trópico cuando el forraje es consumido después de los 30 -35 días, los animales tienden a consumir un

pasto de menor valor nutricional principalmente bajo en energía, minerales y proteína digestible, lo que repercute directamente en un menor consumo de nutrientes de calidad y por ende en una menor producción de leche y carne. (Livas, 2015). Una dieta bien balanceada y un manejo adecuado, optimizan la producción de leche, la reproducción y la salud de la vaca, así como la calidad y cantidad de carne producida. La nutrición en los bovinos se basa en la energía (carbohidratos), proteína, minerales, vitaminas y agua y en cantidades adecuadas y equilibradas. La energía es la encargada de las funciones de crecimiento y mantenimiento del animal y de generar calor. La proteína tiene como función hacer crecer el tejido, entre otras funciones vitales. Generalmente lo que comen los animales no cubre las necesidades diarias para producir eficientemente, ya sea por la poca disponibilidad de alimentos en los potreros o por los pastos de baja calidad. (INTAGRI, 2021). El Valor nutritivo es la cantidad adecuada de los nutrientes en un alimento, que permitan satisfacer los requerimientos o necesidades para la crianza de los animales, nos muestra los cinco principales nutrientes y sus funciones. (INATEC M. D., 2016, p 10). La composición nutricional de los alimentos del ganado se divide en agua, ceniza bruta, proteína cruda, grasa cruda, fibra cruda y otro extracto soluble libre de nitrógeno. Los alimentos del ganado se ingieren y digieren en el tracto digestivo y se absorben como parte del proceso de nutrición. Ese valor de los alimentos se determina por cuantos nutrientes de los alimentos pueda utilizar el ganado, por lo tanto, es importante el contenido de ingredientes y la digestibilidad.

Los alimentos que se utilizan en la alimentación del ganado se dividen en:

Alimentos voluminosos: Son los pastos, forrajes y residuos agrícolas como bagazo de caña de azúcar y paja de arroz, por lo general son voluminosos, poco digestibles y tienen pocos nutrientes. Sin embargo, cuando los pastos son jóvenes su digestibilidad y valor nutritivo en materia seca son altos.

Alimentos concentrados: Son aquellos de origen animal y vegetal y que pueden ser proteicos o energéticos pueden estar contenidos en frutos, granos, subproductos de procesamiento de grano o en alimentos basados en harinas de algunos animales como la harina de pescado. Generalmente son menos voluminosos y presentan una mejor digestibilidad y valor nutritivo. Los granos de cereales son ricos en carbohidratos, proteínas y lípidos dependiendo de la especie (gramínea o leguminosa). Por ejemplo, el maíz, trigo y sorgo son ricos

en almidón, la soya es rica en proteínas y el girasol y las semillas de ajonjolí son ricos en lípidos. (INATEC, 2016, p 20). Al acondicionar los ingredientes; si son granos como el maíz o sorgo, se deben moler a un tamaño de partícula que facilite su consumo y su mezcla con los demás ingredientes. Para la utilización de la soya en la alimentación de rumiantes no es necesario tostar la soya.

Metodología

La investigación utilizada fue la aplicada o mixta, esta investigación involucra problemas tanto teóricos como prácticos. Este enfoque de investigación mixta es significativo a la hora de llevar a cabo la investigación por que permite involucrar diferentes factores y poder dar más veracidad a la investigación. El método cualitativo, permite revelar las propiedades de cada uno de los bovinos utilizados identificando sus características y cualidades, este método se empleó por medio de la observación, y en los instrumentos de recolección de datos, en donde se registrarán y analizarán datos sobre las diferentes variables. El método cuantitativo permite obtener datos cuantificables, relacionarlos, analizarlos y examinarlos, de este se puede derivar un análisis estadístico, en la cual se obtendrá los pesos antes y después del suministro del alimento balanceado a base de productos orgánicos.

Materiales: Para la formulación y desarrollo del alimento balanceado a base de productos orgánicos se utilizaron los siguientes insumos e instrumentos de trabajo.

Mezcladora de paletas: Las mezcladoras de paletas son las ideales para la elaboración de alimentos balanceados para ganado a base de harinas de grano, pastas, concentrados, rastros, esquilmos agrícolas y concentraciones de líquido menores a 10 % sobre la fórmula (ganado, cerdos y aves). El tiempo promedio de mezcla es de 5 minutos y dependerá de los ingredientes a mezclar. El objetivo de la mezcladora es mover las partículas de los ingredientes y permitir el proceso de creación de alimentos balanceados, por esta razón as mezcladoras que promueven un máximo movimiento de partículas y efectuar un mezclado más rápido y eficiente. Uno de los objetivos de una planta de alimentos es producir una mezcla uniforme que asegure a los animales un consumo de alimentos balanceados.

Molino de martillo NO. 20: Un molino de martillos es una trituradora que puede moler, pulverizar, y aplastar una amplia gama de materiales. Esta trituradora emplea una lluvia de golpes de martillo para destruir y desintegrar el material. Se puede utilizar para moler una gran variedad de materiales, por ejemplo, para la fabricación de piensos para el ganado, alimentos para mascotas, entre otros. Por otra parte, estos equipos son ampliamente utilizados en el procesamiento de semillas oleaginosas como la soya, girasol, canola, etc. Su diseño permite una fácil y rápida limpieza del equipo, fabricados en Acero Inoxidable o Hierro Gris, además que poseen ventilación en su interior. Estos molinos son de gran resistencia, posee un sistema de martillos fijos u oscilantes, de doble vida y fácil de intercambiar, pueden tener recubrimiento de tungsteno para productos abrasivos. Son muy fáciles de operar y limpiar, sus piezas se cambian de manera sencilla.

Báscula industrial: Una báscula industrial es en extremo duradera, confiablemente exacta y sin margen de error a la hora del pesaje. Todas están perfiladas para gran variedad de trabajos y aplicaciones dentro de la industria o comercio; ayudando al almacenaje, pesaje de cajas, galones, tambos. En su mayoría son de bajo perfil, pero eso no deja a un lado que existen también las diseñadas para alta capacidad.

Se recomienda que el tipo de báscula industrial que va en piso, tenga un acabado en un color que réstale; amarillo o rojo, esto facilitara al operador, incluso en lugares con poca luz a identificar el área en que debe estar para poder realizar el trabajo de pesaje. Son básculas que están fabricadas de acero al carbón resistente A 36. Y los diseños de soporte son únicos en su tipo ya que van anclados, brindando un apoyo a la estructura inferior y así poder proporcionar un apoyo en el armazón más bajo, armado para una larga vida de trabajo en ambientes fuertes y sin perder su exactitud.

Materia prima e insumos

Grano seco destilado (DDG). El grano seco, también conocido como DDGS (granos secos de destilería con solubles) son un subproducto cuyo origen provienen de la fermentación de cereales tales como el grano de maíz, caña de azúcar, cebada, sorgo, trigo o soya para la producción de alcohol. Los granos de destilería con o sin solubles son una fuente excelente de energía para el ganado. En Estados Unidos, el ganado de engorda en finalización se ha alimentado con éxito hasta con el 40 % de DDGS de la materia seca de la

ración, en sustitución del maíz en grano. Cuando se añaden DDGS a la dieta a este nivel, se usa principalmente como fuente de energía, además de suministrar más proteína y fósforo que lo requerido para terminar el ganado de engorda. En un estudio de investigación (Ham et al., 1994), la energía neta de la ganancia de los DDGS para ganado de engorda fue 21 % más alta que el valor de maíz rolado en seco. Como mínimo, la mayor parte de los nutriólogos consideran que los DDGS tienen un valor de energía aparente igual al maíz en grano cuando se alimenta a ganado en finalización a niveles que van del 10 - 20 % de la materia seca del alimento total. En muchos estudios, la alimentación de DDGS a niveles del 15 - 20 % de la materia seca de la dieta mejoró la tasa de crecimiento y la conversión alimenticia del ganado de engorda en finalización, comparado cuando se usan dietas que contienen maíz en grano. Esta mejora en el desempeño a menudo es el resultado de una reducción de la acidosis subaguda y de menores problemas con el ganado que no consume alimento. (Gomez, 2017). En la Tabla 1 se tienen las concentraciones nutrimentales del DDGS (con base en el 100 % de materia seca).

Tabla 1. Concentraciones Nutrimentales del DDGS.

NUTRIENTE	DDGS
Materia Seca, %	88-90
Proteína Cruda, %	25-35
Proteína ingerida degradable % de PC	40-50
Grasa, %	8-10
FND, (%)	40-44
TND, %	77-88
ENm, Mcal/kg	1.96-2.21
Calcio, %	0.11-0.20
Fósforo, %	0.41-0.80

Soya

El uso de la soya (*Glycine max*) en la alimentación animal ha abierto un amplio panorama a la industria de concentrados, al permitir la formulación de dietas con una excelente concentración y disponibilidad de energía, aminoácidos y ácidos grasos esenciales. Por su alto contenido de grasas (18 a 20 %) y proteínas (37 a 38 %), el frijol soya se presenta como una valiosa materia prima para su utilización en la industria destacándose la extracción de aceites y la formulación de alimentos balanceados para animales. Con este recurso es posible satisfacer las necesidades nutricionales de las líneas modernas de aves y cerdos, que exigen raciones de alta calidad nutricional y sanitaria, así como de una elevada densidad energética y proteica. La semilla de soya se compone de proteínas, lípidos, hidratos de carbono y minerales; siendo las proteínas y los lípidos las partes principales, constituyendo aproximadamente un 60 % de la semilla. Las proteínas tienen un alto contenido del aminoácido Lisina comparado con otros cereales.

Son muchos los trabajos realizados en lo que respecta la utilización de la soya como fuente de proteína en la elaboración de dietas para animales, ya sea aprovechando el grano de soya integral al cual se le hace un proceso de cocción o tostado para eliminar los factores anti nutricionales o a través de un proceso más industrializado en donde se separa el aceite del grano y se utiliza el subproducto (torta de soya) como fuente proteica. (Albarracín, 2010).

En la Tabla 2 se tiene la composición Nutricional del grano de soya crudo, grano de soya procesado y de la torta de soya.

Melaza

La melaza es un líquido denso y negrozco constituido por el residuo que permanece en las cubas después de la extracción de la mayor parte de los azúcares de remolacha y caña por cristalización y centrifugación.

Es una buena fuente de energía debido a su contenido de 50 a 60 % de azúcares. Es altamente digestible, estimula el apetito y la degradación de la celulosa por los microorganismos del rumen. Reduce el polvo del alimento y sirve como aglutinante. Tiene alto contenido de potasio que le da propiedades laxativas.

Niveles mayores a 25 % en la ración, reducen la digestibilidad de la fibra y otros carbohidratos, por predilección de las bacterias por los azúcares.

Tabla 2. Composición Nutricional del grano de Soya. Fuente Buitrago, Portela, Eusse. 2010.

Componente	Unidad	Grano de soya		Torta de soya
		Crudo	Procesado	
Materia seca	%	90	90	90
Grasa	%	17.5	17.5	1.5
Proteína	%	37.5	37.5	45.5
Metionina	%	0.52	0.52	0.70
Metionina + cistina	%	1.08	1.08	1.41
Lisina	%	2.42	2.42	2.90
Triptófano	%	0.54	0.54	0.62
Ácido linoleico	%	8.5	8.5	0.55
Fibra	%	5.5	5.5	3.4
Calcio	%	0.26	0.26	0.30
Fósforo	%	0.61	0.61	0.64

Es un insumo pobre en proteína total (3 %), no contiene fibra, su nivel de energía es de 1.45 y 0.90 Mcal/kg respectivamente. Los azúcares que se encuentran contenidos en la Melaza para Ganado son de gran importancia desde el punto de vista de aporte, por su alto nivel energético capaz de cubrir sus necesidades y a un costo económicamente muy atractivo. Pero en numerosas ocasiones las melazas se utilizan un poco más por su agradable olor y gusto que por su valor energético. Logrando con este buen sabor y aroma la estimulación del apetito, causándose un aumento de los niveles de ingestión de los alimentos melazados, y por otro lado permite utilizar otros elementos dentro de la alimentación de mal sabor que pueden ser rechazados por los animales (Carlos F., 2016). En la Tabla 3 se observa la composición de la Melaza.

Maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal perteneciente a la familia de las gramíneas o pomáceas, corresponde a una especie monocotiledónea de crecimiento anual y un ciclo vegetativo muy amplio.

Tabla 3. Composición de la Melaza.

Componentes	Unidad	Rica	Final
Materia seca	%	85.00	83.50
Nitrógeno	%	0.26	0.44
Cenizas	%	2.80	9.80
Azúcares totales	%	86.10	58.30
Sacarosa	%	28.60	40.20
Glucosa	%	29.30	8.90
Fructosa	%	28.20	9.20

Continuación de Tabla 3...

Componentes	Unidad	Rica	Final
Extracto libre de nitrógeno	%	95.60	87.40
Sustancias orgánicas no identificadas	%	9.50	29.10

La (FAO, 1993), define la planta de maíz como “un sistema metabólico cuyo producto final es, en lo fundamental, almidón depositado en unos órganos especializados: los granos”. Dentro de los componentes o partes más importantes del maíz se encuentran:

Endospermo: conformado por almidón y gluten. Es el tejido que rodea el embrión y proporciona alimento para el crecimiento de la semilla. (Dickerson, 2003). Está compuesto por dos regiones bien definidas: el endospermo harinoso, de consistencia suave y apariencia opaca; representa el 34 % del peso del endospermo y el endospermo córneo, de consistencia dura y de apariencia traslúcida; representa el 66 % del peso del endospermo y está formado por células alargadas y de forma irregular (Ospina, 2001).

Almidón: es una de las sustancias químicas de mayor valor comercial. Se ubica en el área lateral y superior de grano y conforma aproximadamente del 70 % al 75 % del grano (Troyer & Mascia, 1999, p. 56).

Gluten: Se ubica mayoritariamente en la parte superior del grano. Se caracteriza por presentar el mayor contenido de proteína (Weigel, 2004).

Gluten feed: Es un componente rico en fibra, pero bajo en proteína. Se emplea para alimentación animal, especialmente ganado bovino (Ramírez et al., 2008, p. 92), y está compuesto por un 60 % de fibra y un 20 % de proteína (White & Johnson, 2003, p. 467). Gluten meal: tiene un alto contenido de proteína y una fracción baja de fibra. Es empleado en la alimentación de aves y cerdos y contiene normalmente un 60 % de proteína y un 10 % de humedad (Blanchard, 1992).

Germen: es el embrión del maíz. Se encuentra en la parte inferior media del grano y representa el 7 % del grano (USDA, 2006, p. 2). El germen contiene altos niveles de aceite (aproximadamente el 30 %) (Troyer, 1991, p. 165).

Pericarpio: Conocido también como cascarilla. Recubre el grano y ocupa aproximadamente el 23 % de este (USDA, 2006, p. 2). Se caracteriza por estar compuesto principalmente de un 40 % de celulosa y un 40 % de pentoglican. (Gonzalez, 2009). Como se puede observar, dentro de la distribución de los principales componentes (Tabla 4) el almidón es el componente mayoritario del grano (de ahí sus múltiples aplicaciones) y se encuentra principalmente en el endospermo. La proteína del maíz, también conocida como zein, se encuentra en el germen al igual que el aceite. El pericarpio se diferencia por su alto contenido de material fibroso.

Tabla 4. Distribución de los componentes del grano de maíz.

Composición	Grano entero (%)	Componentes en Base Seca (%)			
		Endospermo	Germen	Pericarpio	Punta
Almidón	62.0	87.0	8.3	7.3	5.3
Proteína	7.8	8.0	18.4	3.7	9.1
Aceite	3.8	0.8	33.2	1.0	3.8
Ceniza	1.2	0.3	10.5	0.8	1.6
Otros	10.2	3.9	29.6	87.2	80.2
Agua	15.0	-	-	-	-

Sal (Premezclada): Las sales minerales para ganado son tan importantes como lo es el agua y el forraje. Juegan un papel importantísimo en cada aspecto del crecimiento y rendimiento, reproducción, estructura ósea, desarrollo muscular, producción de leche, buen funcionamiento de la digestión y metabolismo. La

suplementación con vitaminas y sales minerales para ganado es necesaria cuando el forraje que pastan carece de los nutrientes necesarios, en hembras gestantes y lactantes, y en animales estabulados a los que se les debe proporcionar una dieta completa.

Los minerales que el ganado requiere en cantidades relativamente grandes son llamados macroelementos e incluyen el Calcio, Fósforo, Magnesio, Potasio, Sodio, Cloro y Azufre. Y aquellos minerales que el ganado requiere en menores cantidades se conocen como elementos traza e incluyen el Hierro, Zinc, Manganeso, Cobre, Yodo, Cobalto y Selenio. Usualmente, las sales minerales para ganado que oferta la industria de la nutrición animal contienen las cantidades necesarias de minerales que se requieren en cada una de las etapas. Estos suplementos de sales minerales para ganado se formulan en base a estudios de suelo de las diferentes regiones geográficas para así conocer que elementos son los deficientes y en base a estudios de los granos y forrajes producidos también en dichas zonas geográficas (Carlos J. , 2015). En la Tabla 5 se pueden observar los componentes de la sal.

Tabla 5. Distribución de los componentes del grano de maíz.

Componente	Sal Mineral	Componente	Sal Mineral
Fosforo %	11.5	Aluminio %	3.9
Calcio %	19.5	Manganeso %	3.9
Silicio %	5.5	Magnesio	7.5
Hierro %	9.8	Digestibilidad %	95.5
Sodio %	11.6	Selenio %	0.04

Cáscara de naranja

La cascara de naranja (alimento alternativo) consiste básicamente en que los desechos orgánicos (cascara de naranja procesada) de la agroindustrial puedan ser aprovechados de manera eficiente, así puede ser un alimento barato y alter-

nativo. Otra ventaja competitiva que tiene el bagazo de naranja es que “es muy fácil de adquirirla, ya que las grandes agroindustrias les generan un nocivo impacto ambiental por las grandes cantidades que ellas mismas procesan, aparte representan gastos adicionales para las empresas productoras de jugo de naranja” agrega la empresa Citrex, añadiendo, así mismo se pueda asumir un fortalecimiento de una cultura más ecológica y una eficiente productividad, y así saber que se estarán reutilizando los desechos agroindustrial, en este caso, las cascaras de naranja (Cuevas, 2012).

Tabla 6. Análisis bromatológico del bagazo de la naranja.

Componentes			
Materia seca %	100	Extracto libre de nitrógeno %	74
Proteína cruda %	7.9	Energía metabolizable Kcal	3182
Fibra cruda %	11.2	Extracto etéreo %	2

En la Tabla 6 se aprecia que la cascara de naranja presenta una materia seca del 100 %, mientras que la proteína, principal factor para que el animal empiece a ganar peso se encuentra con 7.9 %, la fibra cruda al 11.2 % la cual es importante porque garantiza la absorción de las proteínas y de los nutrientes que contienen el bagazo de naranja.

Proveedores

- Unión de crédito de alpura Martínez de la torre Veracruz: **CASCARA DE NARANJA**
- ADM internacional México. **DDG (GRANO SECO DESTILADO)**
- ADM internacional México. **MAIZ AMARILLO**
- Veterinaria la potranca Acayucan Veracruz. **SAL PREMEZCLADA**
- Ingenio presidente Benito Juárez. **MELAZA**
- Nutrysa, Tuxtla Gutiérrez Chiapas. **SOYA**

Descripción del diagrama de proceso:

Identificación: Conocer la materia prima a utilizar

Comprar: Mantener en contacto con los proveedores de materia prima, así como el verificar que este llegue a la instalación de la empresa.

Recepción: lugar donde se guardará la materia prima que fue comprada.

Trituración: utilizar el molino de martillo para los granos de (maíz amarillo) enteros y para su trituración.

Formula: pesar con la báscula cada materia prima para saber que tanto utilizaremos y así tener la medida exacta de cada uno de los componentes.

Transporte: llevar todas las materias primas en carretillas, al área de proceso donde se revolverá.

Mezclado: utilizar la revolvedora de paleta, para mezclar las materias primas y tener el producto terminado.

Envasado: llenado de costales

Pesado: utilizar la báscula para saber que tantos kg de alimento llevara el costal.

Almacenamiento: lugar donde se mantenga seco y sea fácil de cargar.

Descripción del aérea de estudio

El trabajo de campo de la presente investigación se llevará a cabo en el Municipio de Agua Dulce Veracruz, el clima es regularmente cálido, con lluvias la mayor parte del año, principalmente en verano con una temperatura de 25 – 27° C y una precipitación de 50- 70mm. Sus coordenadas geográficas latitud 18.1423 longitud -94.138 18° 8' 32" Norte, 94° 8' 38" Oeste.

Animales utilizados.

Se utilizaron 4 bovinos estos serán divididos en 2 grupos cada grupo tendrá 2 bovinos, para identificarlos el primer grupo fueron bovinos colorados y blancos estos se marcaron para su identificación y el segundo grupo también fueron colorados y blanco, el primer grupo fue alimentado con el alimento balanceado a base de productos orgánicos y el segundo grupo será alimentado con el alimento comercial.

Análisis y discusión de los resultados

Se alimentaron a los bovinos durante 4 meses teniendo los resultados en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados. Elaboración propia

Bovinos	01/04/ 2019	02/05/ 2019	02/06/ 2019	02/07/ 2019	02/08/ 2019
	Kg inicial	Kg 1 mes	Kg 2 meses	Kg 3 meses	Kg 4 meses
Primer grupo	Alimento balanceado a base de productos orgánicos				
Colorado	205 kg	259 kg	310 kg	355 kg	396 kg
Blanco	190 kg	235 kg	292 kg	326 kg	379 kg
Segundo grupo	Alimento comercial				
Colorado	208 kg	240 kg	280 kg	320 kg	360 kg
Blanco	192 kg	226 kg	262 kg	296 kg	360 kg

Se puede observar mediante evidencias fotográficas indicadas en las ilustraciones 1 y 2 en el desarrollo de ambos bovinos los cuales fueron alimentados con alimento balanceado a base de productos orgánicos durante un lapso de 4 meses contando con un área específica donde el bovino se le estuviera alimentando y tomando mes con mes el peso de cuanto fue la ganancia que implementaban en ambos bovinos, esto se realizó con la báscula especial para ganado. Dando a conocer como resultado un avance de 50 kilogramos aproximadamente en su evolución.

Al término de la prueba del alimento balanceado a base de productos orgánicos, se notan algunas diferencias en los bovinos como, por ejemplo, su pelaje es más suave y brillante, sus músculos se desarrollaron mejor, su peso

aumento, completamos con la satisfacción del cliente ya que fueron pocos meses los que estuvieron a prueba y los resultados fueron positivos.

Análisis bromatológicos del alimento balanceado a base de productos orgánicos.

Cabe mencionar que el alimento balanceado a base de productos orgánicos fue enviado para que se le realizara los análisis bromatológicos para conocer los aportes de nutrientes, carbohidratos proteínas y minerales, y así poder balancear los componentes y proporcionar la cantidad adecuada a los bovinos. Estos análisis fueron realizados en la ciudad de Guadalajara Jalisco, en el laboratorio Becar, teniendo resultados de la prueba favorables y libres de los componentes químicos que en otros alimentos se pueden encontrar, cumpliendo con los límites permisibles aplicados en normatividad. De acuerdo con las normas aplicadas para el análisis del alimento, los resultados obtenidos están dentro de los parámetros para un alimento en polvo o granulado.

Humedad. Para un alimento compuesto los resultados obtenidos de la humedad están dentro del rango establecido para su conservación. y para su mejor digestión o digestibilidad.

Extracto libre de nitrógeno (ELN). Es el contenido de carbohidratos vegetales en un alimento este valor se obtiene de la suma de agua, proteína, grasa, fibra y cenizas y se le resta 100, y se obtiene el contenido de ELN. Mientras más bajo sea este valor mejor es el alimento

% de proteína. Cumple con lo establecido en la normatividad, es mayor que la grasa que es de 20.86, lo importante decir que el origen de la proteína es la importante.

Fibra cruda: Es la porción no digerible del alimento y mientras más baja sea es mejor por lo cual está dentro de los rangos.

Las cenizas. son los contenidos de sales y minerales está dentro de los rangos y mientras más bajo es mejor porque es más digerible.



Figura 1. Etapa Inicial de alimentación de los bovinos.



Figura 2. Mes 4 de alimentación de los bovinos.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que el alimento balanceado a base de productos orgánicos es una buena estrategia de inversión, debido a que cuenta con los estándares de calidad de acuerdo a los análisis realizados al alimento, así también tiene mejores beneficios para el ganadero dándole una mejor retribución económica. Teniendo en cuenta diferentes factores, se puede destacar las siguientes condiciones favorables en cuanto a la fabricación del alimento balanceado.

Para la realización del alimento balanceado sus componentes son orgánicos por lo que las materias primas se encuentran en cualquier zona del sureste de Veracruz y sus alrededores.

Si por alguna extraña ocasión existiera un déficit de materias primas existen otros componentes los cuales cuentan con similares nutrientes y pueden ser sustituidos sin detalle alguno.

El lapso que se lleva en la engorda del bovino es mejor, de acuerdo a los resultados obtenidos se acorta el plazo de 6 meses que es el lapso para engorda de los bovinos con alimento comercial, y son 4 meses con el alimento balanceado a base de productos orgánicos obteniendo un buen peso, por lo que es un buen tiempo promedio para los que se dedican a la engorda de bovinos. así mismo reducen sus gastos de inversión.

Referencias bibliográficas

- Albarracín, V. G. (2010). engormix. Obtenido de <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/soya-principal-fuente-proteina-t28541.htm>
- Carlos, F. (2016). fundacion fedna. Obtenido de Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Obtenido de http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/melazas-deca%C3%B1a
- Carlos, J. (2015). lavet. Obtenido de Sales minerales para ganado: La importancia de la suplementación mineral: : <http://www.lavet.com.mx/salesminerales-para-ganado-la-importancia-de-la-suplementacion-mineral/>
- Cuevas, M. M. (2012). El productor. Obtenido de Obtenido de Una alternativa para temporadas de escasez de pastos: cáscara de naranja, opción alimentaria para ganado: <https://elproductor.com/articulostecnicos/articulos-tecnicos-salud-animal/una-alternativa-para-temporadasde-escasez-de-pastos-cascara-de-naranja-opcion-alimentaria-para-ganado/>
- Dickerson, & G. (2003). Specialty Corns". College of Agriculture and Home Economics. Las Cruces: New Mexico State University.
- Gomez, R. (2017). forrajes Gutierrez. Obtenido de <http://www.forrajesgutierrez.com>
- Gonzalez, U. (2009). El maíz y los productos de su industrialización. Mexico: Trillas.
- INATEC. (2016, p 20). NUTRICION ANIMAL.
- INATEC, M. D. (2016, p 10). NUTRICION ANIMAL.
- INTAGRI. (2021). REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN BOVINOS NUM.104. Obtenido de ARTICULOS TECNICOS ME INTAGRI: <https://www.intagri.com/articulos/ganaderia/requerimientos-nutricionales-en-bovinos?p=registro>
- Livas, C. F. (12 de enero de 2015). Estrategias de alimentación para ganado bovino en las regiones tropicales. Obtenido de <https://www.ganaderia.com/destacado/Estrategias-de-alimentaci%C3%B3n-para-ganado-bovino-en-las-regiones-tropicales>
- Ospina, J. (2001). Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos. BOGOTÁ: Universidad Nacional de Colombia.
- Schlavo, B. C. (1989). Aternativas para el desarrollo ganadero en Tabasco. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del agua).
- Weigel, J. L. (2004). Los coproductos alimenticios derivados del proceso de la molienda húmeda del maíz. Washington D.C.: Iowa Corn.

CAPÍTULO 13

LA NUTRICIÓN, FERTILIDAD DE SUELOS Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR EN EL SURESTE DE MÉXICO

Córdova-Sánchez, S¹, Salgado-Velázquez, S², Izquierdo-Hernández, J³, Ramos-Hernández, E⁴, Almenares-López, D⁵, Bolio-López, G. I⁶, Hernández-Villegas, M.M⁷

Resumen

Ya existe información de los estudios de nutrición y fertilidad, que asociada a la agricultura de precisión que contribuiría en mejorar el manejo integrado del cultivo de caña de azúcar. En síntesis, el uso de la agricultura de precisión en el cultivo de caña de azúcar es incipiente aun, de los trabajos reportados se destaca la predicción del rendimiento, estimación de los índices de vegetación para monitorear el cultivo, cálculo de la evapotranspiración para fines de riego con el uso de sensores remotos, sistemas de información geográfica y lenguajes de programación. De igual forma, en el Estado de Tabasco, Impulsora agrícola ha sido precursor de agricultura de precisión al introducir el uso de drones para aplicación de insumos agrícolas y cosechadoras de precisión que miden el rendimiento en el momento de corte para generar mapas de rendimiento.

Palabras claves. *Predicción rendimiento, sensores remotos, drones, índices de vegetación.*

1 Samuel Córdova Sánchez - Profesor de tiempo Completo- Universidad Popular de la Chontalpa- División de Ciencias Básicas e Ingenierías (Autor correspondiente)

2 Sergio Salgado Velázquez – Estudiante de Doctorado en Ciencias Agrícolas en el Trópico - Colegio de Postgraduados – Campus Tabasco

3 José Izquierdo Hernández – Egresado del Doctorado en Ciencias Agrícolas en el Trópico – Colegio de Postgraduados – Campus Tabasco

4 Eder Ramos Hernández – Investigador del INIFAP – Campus Experimental Huimanguillo

5 Damianys Almenares López - Profesor de tiempo Completo, Universidad Popular de la Chontalpa- División de Ciencias Básicas e Ingenierías.

6 Gloria Ivette Bolio López - Profesor de tiempo Completo, Universidad Popular de la Chontalpa División de Ciencias Básicas e Ingenierías.

7 Manuel Mateo Hernández Villegas - Profesor de tiempo Completo, Universidad Popular de la Chontalpa- División de Ciencias Básicas e Ingenierías

Introducción

El requerimiento de nutrientes por la caña de azúcar varía según el cultivar, el suelo, condiciones climáticas y manejo del cultivo. Por ello, en los últimos años se ha realizado un esfuerzo importante en la investigación científica para caña de azúcar en el sureste mexicano, derivando de ello diversas publicaciones especializadas en nutrición y fertilización del cultivo, fertilidad de los suelos cañeros y requerimientos nutrimentales específicos para los cultivares y tipos de suelo que conllevaría hacer una agricultura de precisión en este cultivo. A continuación, se presenta un ejemplo claro de las principales necesidades de nutrimentos por cultivar (Tabla 1).

Tabla 1. Extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de caña de azúcar (kg ha^{-1}) de acuerdo con el rendimiento de tallos molederos.

Elementos	Nutrimento	Rendimiento (t ha^{-1})	
		97.0	94.0
		Mex 57-453	Mex 68-P23
Nitrógeno	N	148.67	70
Fósforo	P_2O_5	98.84	76
Potasio	K_2O	431.64	354
Calcio	Ca	110.30	49.27
Magnesio	Mg	67.13	33.18
Hierro	Fe	10.02	5.2
Manganeso	Mn	0.15	1.06
Zinc	Zn	0.43	0.73
Cobre	Cu	Trazas	Trazas

Adaptado de Palma-López *et al.* (1995).

Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilización (SIRDF) en caña de azúcar

Esta metodología toma en cuenta las características de los suelos y el rendimiento potencial del cultivo. Se determinan las subunidades de suelo mediante interpretación de fotografías aéreas, reconocimientos de campo y muestreos en el área de estudio, en cada unidad se describen perfiles agrológicos y se realizan análisis fisicoquímicos para clasificar los suelos, según

la Referencial Mundial de Suelos (WRB). Este método consiste en estimar la dosis de fertilización (DF) N, P y K para cada unidad de suelo mediante un modelo conceptual, que se basa en el balance entre la demanda del nutrimento (DEM) por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo (SUM) y la eficiencia del fertilizante (EF). El algoritmo respectivo es $DF = (SUM-DEM) / EF$. Para estimar la demanda, se considera la producción de materia seca y la concentración de N, P y K de la biomasa aérea. El suministro de P y K se estima a partir de los resultados del análisis químico de suelos y los aportes de N a partir de la cantidad de los residuos de cosecha y su manejo (Palma-López et al., 2002).

Palma-López et al. (2002), aplicaron por primera vez el SIRDF en caña de azúcar para generar dosis de fertilización por tipo de suelo en el área de abastecimiento del Ingenio Aszuramex en Tenosique, Tabasco. Las dosis de fertilización del modelo conceptual para la fertilización N, P y K fueron: Fluvisol 160-60-60, Vertisol 120-80-80, Cambisol 120-60-60, Luvisol 140-80-80 y Leptosol 160-80-80. Posteriormente esta metodología fue aplicada por Salgado-García et al. (2005), en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISRCH), donde se definieron tres grupos mayores de suelos que se clasificaron en subunidades. Las dosis de fertilización ajustadas (kg/ha^{-1} de N, P_2O_5 y K_2O) fueron 130-80-60, 150-60-60 y 160-80-60 para Fluvisoles éutricos y 130-60-80, 140-80-80, 160-80-80 para Fluvisoles éutri-gleyicos, según el pH ácido, neutro o alcalino; 120-60-60 para Gleysols éutricos con pH ácido y neutro; 140-60-80 para el Gleysol mólico; 160-60-60 y 160-80-80 para Vertisoles éutricos de pH ácido, y neutro, y alcalino; y 160-60-60 para Vertisoles pélicos con pH ácido o neutro. El análisis de la fertilidad establece que los factores limitantes son arcilla, humedad, acidez y deficiencias de P, K y Zn.

El SIRDF también ha sido aplicado para generar dosis de fertilización por tipo de suelo en el área de abastecimiento del Ingenio Pujilticén Chiapas, en donde se definieron nueve grupos mayores de suelos. Las dosis de fertilización ajustadas fueron: 120-80-80 para Chernozem chérnico, Cambisol mólico, Fluvisol calcárico y Regosol calcárico; 160-80-80 para Calcisol hipocálico, Leptosol réndzico y Vertisol éutrico, 120-60-60 para Calcisol vértico y Feozem paquiléptico; 140-80-120 para Gleysol mólico y 100-60-60 para Vertisol poliéutrico (Salgado-García et al., 2008).

Dichas dosis fueron posteriormente validadas, detectandose deficiencias de potasio en todas las unidades de suelo y asociando los menores rendimientos a los suelos Fluvisol, Cambisol y Vertisol que retienen exceso de humedad (Salgado-García et al., 2014). Izquierdo-Hernández et al. (2016) observaron deficiencias en la concentración foliar de K en 10 cultivares de caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Azsuramex.

En el área de abastecimiento del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), aplicando el SIRDF, las dosis de fertilización ajustadas fueron (N, P₂O₅, K₂O kg/ha⁻¹): 120-60-60 para los suelos Cambisoles flúvicos, endogléyicos y estágnicos; 120-70-80 para Cambisoles y Gleysoles; 160-80-80 para Vertisoles gléyico-estágnicos; 120-80-80 para Vertisoles estágnico-éutricos. Además, se generó un mapa de fertilización específico para el área de abasto del IPBJ, a escala 1:40 000 (Salgado-García et al., 2011).

Salgado et al. (2003) realizaron un experimento para evaluar dosis de fertilización durante los primeros tres ciclos del cultivar MEX 69-290, establecido en un suelo vertisol éutrico, concluyendo que con las dosis de fertilización 170-90-100, 170-85-85 y 190-100-100, se obtuvieron los mayores rendimientos calculados de caña en los tres ciclos de cultivo (164, 137 y 110 t ha⁻¹), ya que dosis mayores de N, P y K abatieron los rendimientos de caña, lo cual sugiere que la dosis usada en la actualidad por el ingenio (120-60-60) es insuficiente para satisfacer los requerimientos del cultivar de caña MEX 69-290. El rendimiento se abatió conforme a los ciclos de cultivo. Las dosis de fertilización no modificaron los grados Brix, la pureza, el porcentaje de sacarosa y el contenido de humedad, lo que indica que las dosis óptimas económicas permiten incrementar los rendimientos de caña sin disminuir la calidad del jugo. El suelo no mostró cambios significativos en sus propiedades químicas, únicamente observaron que la relación Ca/Mg sufrió un desbalance, siendo recomendable aplicar yeso (CaSO₄), para evitar posibles antagonismos en la absorción de K y Mg.

Diagnóstico nutrimental para eficiencia de fertilizantes

Espinosa et al. (2016), llevaron a cabo una investigación para conocer el diagnóstico nutrimental de nueve cultivares de caña de azúcar introducidas y dos locales en el ingenio Azsuremex en Tenosique, Tabasco. Se aplicó la dosis

de fertilización NPK 100- 80-60, y realizó análisis foliar para determinar deficiencias nutrimentales y valorar la eficiencia del fertilizante en la nutrición. Los resultados registraron que todas los cultivares presentaron concentraciones medias de nitrógeno, potasio, magnesio, hierro y manganeso. En los nueve cultivares introducidos se registraron concentraciones medias de calcio y cobre, y cuatro variedades presentaron concentraciones medias de zinc.

El cultivar con el diagnóstico nutrimental se observó que el azufre parece ser el más limitante en el suelo Gleysol haplico arcilloso eútrico húmico, aunque no existieron diferencias significativas en los once cultivares respecto a las concentraciones foliares de los nutrimentos estudiados, se cuenta con la respuesta de las variedades introducidas a la zona de producción.

Dosis variables de nitrógeno

Salgado et al. (2017), determinaron el efecto de dosis variables de fertilizante nitrogenado sobre la calidad de jugo, rendimiento, consumo de nitrógeno y rentabilidad de 10 cultivares de caña de azúcar durante el ciclo plantilla, concluyendo que la dosis alta de N afectó negativamente la calidad del jugo, aunque esto depende directamente del cultivar utilizado, se observó una respuesta lineal positiva en el rendimiento, a excepción del cultivar MEX 69-290 que presentó el rendimiento más alto con 120 kg.N.ha^{-1} . El consumo de N fue diferente entre cultivares y aumentó conforme se incrementó la dosis de N. El índice de eficiencia interna (EI) de utilización del nitrógeno varió de 1.6 a 2.0 kg de N por tonelada de tallo. En cinco de los cultivares evaluados es rentable fertilizar con las dosis de 120 y/o 180 kg ha^{-1} de N.

Además, hay publicaciones referentes al uso de fertilizantes alternativos en caña de azúcar como son los abonos verdes: *Cajanus cajan* y *Canavalia ensiformis* (Córdova et al., 2010), los residuos de cosecha y la industrialización como la cachaza (Arreola et al., 2004), y la vinaza (Salgado et al., 2007; Hernández et al., 2008).

El origen cultivares cultivados en los ingenios de Santa Rosalía y Presidente Benito Juárez

El nombre de los cultivares de caña de azúcar es denominado por un código que identifica el lugar, el año que fue obtenido, seguido de un número de indi-

viduos seleccionados (Arévalo et al., 2006). Así, por ejemplo, uno de los cultivares con mayor superficie de siembra en México, es MEX 69-290 donde MEX, significa México (lugar de selección); 69, es el año en que fue seleccionado y 290 corresponde al número de planta seleccionada del total obtenido en la hibridación parental.

Los cultivares de caña de azúcar principalmente cultivados en el estado de Tabasco son: MEX 69-290, MEX 79-431, MEX 68-P23, ITV 92-1424, ITV 92-373, MEX 57-473, ATEMEX 96-40. Además de cultivares extranjeros como CP 72-2086, CP 72-1210, RD 75-11, SP 70-1284, MY 5514, entre otras (Salgado et al., 2013), de los cuales se presenta su nomenclatura en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales cultivares de caña de azúcar cultivados en la zona de abastecimiento del IPBJ e ISRCH.

Cultivar	Lugar De Selección	Año De Selección	Numero De Planta Seleccionada
MEX 69-290	México	1969	290
MEX 79-431	México	1979	431
MEX 68-P-23	México	1968	23
MEX 57-473	México	1957	473
CP 72-2086	Estación experimental de Canal Point ubicada en La Florida USA	1972	2086
CP 72-1210	Canal Point, FloridaUSA	1972	1210
ATEMEX 96-40	Atencingo, México	1996	40

Continuación de Tabla 2...

Cultivar	Lugar De Selección	Año De Selección	Numero De Planta Seleccionada
ITV 92-1424	Ingenio Tezonapa, Veracruz	1992	1424
ITV 92-373	Ingenio Tezonapa, Veracruz	1992	373
My 55-14	MAYARI, Cuba	1955	14
COLPOSCTMEX 05-223	Colegio de postgraduados (COLPOS), Campus Tabasco, México	2005	223
COLPOSCTMEX 06-474	COLPOS, Campus Tabasco, México	2006	474
COLPOSCTMEX 06-039	COLPOS, Campus Tabasco, México	2006	039

Estudios realizados en agricultura de precisión en México

Uno de los primeros intentos en aplicar la agricultura de precisión en el cultivo de caña de azúcar en México, fue el trabajo de Salgado-García et al., (2010) en donde se establecieron lotes de aplicación de dosis de fertilizantes en base a características edáficas, climáticas y de cultivo, para ello se empleó cartografía digital de suelos obtenida de modelos digitales de elevación. Además, que esta lotificación permite generar zonas homogéneas para la administración de las diferentes labores en el cultivo de caña de azúcar por parte del productor e Ingenios, y detectar factores limitantes. Esta metodología denominada Sistema Integrado para recomendar dosis de fertilizantes (SIRDF), se ha aplicado a diferentes regiones cañeras en México.

Las imágenes SPOT 5 HRV

Se han utilizado ampliamente en la identificación de la vegetación a escala regional debido a su alta resolución tal como lo reportó Aguilar-Rivera et al. (2012), donde se demostró la utilidad de las imágenes SPOT 5 HRV y el algoritmo de clasificación supervisada de máxima verosimilitud para la identificación, evaluación y elaboración de cartografía del cultivo de caña de azúcar en "La Huasteca" México. Los resultados mostraron que es posible identificar y mapear el cultivo de caña de azúcar con imágenes SPOT 5 HRV y establecer que, en la región cañera de la Huasteca, tan solo el 48.8 % de la superficie cultivada tiene media a alta productividad, el resto presenta problemas que deberían atenderse mediante acciones de manejo de sitio específico para incrementar la productividad en el mediano plazo. Cabe mencionar el trabajo desarrollado en la Huasteca Potosina por Aguilar-Rivera et al. (2013), donde se elaboró un mapa de aptitud de tierras cañeras con el apoyo de información de crecimiento de caña de azúcar, cartografía de suelos y el uso de imágenes satelitales Landsat 5 y Spot. Lo anterior, permitió establecer zonas homogéneas para manejo de caña de azúcar.

Índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI)

En el distrito de riego 016 del estado de Morelos se desarrolló una función matemática para estimar el rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con base en el análisis temporal de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) e índices de estrés de humedad (MSI) calculados de imágenes de Landsat-ETM+ y, estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc). Se demostró que la integración de información climática, sistemas de información de geográficas e imágenes de satélite permitieron pronosticar el rendimiento de caña de azúcar (Zenteno-Cruz et al., 2012).

Programación en lenguaje R

Se estimaron los valores de ETc para una zona agrícola de 22,142 hectáreas, en el Distrito de Riego 075 Río Fuerte, al noreste de Los Mochis, Sinaloa, en el cultivo de caña de azúcar.

Se elaboró un banco de imágenes satelitales de la serie LANDSAT (5TM, 7ETM y 8OLI/TIRS), para el periodo 1995 - 2018, las cuales fueron corregidas mediante el software QGIS e incorporadas a un modelo de balance de energía superficial en tierra, mediante programación en lenguaje R.

Los resultados muestran valores de ETc entre 0.02 a 11.28 mm/día, promedios anuales entre 2.68 a 4.08 mm/día, al promedio mínimo en septiembre de 2000 con 1.47 mm/día y al promedio máximo en junio de 2008 con 7.36 mm/día. Un comportamiento mensual monomodal coincidente al periodo de siembra y cosecha en la región, de mínima en diciembre (2.24 mm/día) y máxima en junio (4.14 mm/día). Y un volumen anual medio requerido por los cultivos de 33.7 m³/día/ha, con mínima de 22.44 m³/día/ha en diciembre y máxima de 41.45 m³/día/ha] en junio (Vázquez-Rodríguez et al., 2018).

Índice de área foliar

Por otra parte, se ha calculado el índice de área foliar (LAI, siglas en inglés) en el cultivo de caña de azúcar en el Estado de Jalisco por medio de un modelo de transferencias radiativas aplicado a imágenes de satélite Sentinel 2. Se descargaron y procesaron las imágenes satelitales y el modelo ARTMO fue aplicado sobre las reflectancias para generar los valores de LAI durante el ciclo de cultivo (Rodríguez- Ramírez, 2019).

Drones

Para el uso de drones, enfocados a las aplicaciones de dosis variables de insumos agrícolas es necesario contar con mapas de variabilidad espacial de las propiedades del suelo y cultivo. En este sentido, en el sureste de México, se han generado mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar. Pare ello, se realizó un muestreo de suelos cada 100 m sobre 100 ha de superficie. Con los resultados, se aplicaron técnicas geoestadísticas como el método de interpolación de kriging con el cual fue posible generar los mapas de variabilidad espacial para fines de agricultura de precisión (Salgado-Velázquez et al., 2020). Con esos mapas, fue posible establecer zonas de manejo homogéneas y generar recomendaciones de manejo específicas como aplicaciones variables de cal agrícola y nutrientes.

Aplicación para celulares denominada COMPASS

La creación de una aplicación para celulares denominada COMPASS permite visualizar el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI, siglas en inglés) durante todo el ciclo de crecimiento. Esta aplicación, se ha calibrado con el modelo AquaCrop para hacer estimaciones de rendimiento en caña de azúcar, dichas calibraciones se llevaron a cabo en campos cañeros del Sureste Mexicano. Además, permite la creación de polígonos para identificar las parcelas cañeras y gestionar actividades para ser programadas en las diferentes etapas de crecimiento el cultivo (Comunicación personal, Dr. Salgado, 2020).

¿Qué efecto ha tenido el uso de la agricultura de precisión en las mejoras (rendimiento en campo y fabrica) del cultivo de caña en México?

El principal efecto que ha tenido el uso de la agricultura de precisión en campos cañeros de México ha sido la mayor eficiencia en la administración de las labores agrícolas, el uso de índices de vegetación derivados de sensores remotos ha permitido que el productor sea capaz de monitorear el estado de salud de su cultivo en mayores frecuencias espaciales y temporales, de tal forma que al momento de presentar valores bajos en los índices se detecte problemas derivados de estrés por necesidades hídricas, ataque de plagas y/o deficiencias nutricionales.

La oportuna detección y corrección de algún problema en el cultivo, permite evitar pérdidas económicas al ser atendidas a tiempo y un mayor rendimiento en campo (Aranda-Bastida, 2021). Asimismo, es posible calcular parámetros agrícolas de cultivo como la altura de planta y detectar malezas dentro del cultivo. Lo anterior, permite obtener cañas más saludables que tendrán menores impurezas y de mayor calidad al momento de ingresar al ingenio aumentando la eficiencia de fábrica.

Por otra parte, cabe destacar que el uso de drones ha disminuido costos de producción y ha elevado la eficiencia en el proceso de producción como es la aplicación de insumos agrícola.

Por ejemplo, un dron con capacidad de 20 litros de agua puede fumigar con herbicida una hectárea en menos de 15 minutos y solo se necesita un operador (Comunicación personal con jefe de investigación de Impulsora Agrícola, 2023). Además, se disminuye la cantidad de agua y al mismo tiempo existe un desplazamiento de la mano de obra que se necesitaba para dicha labor (Aranda-Batista, 2021).

Recomendaciones para hacer agricultura de precisión en caña de azúcar en la Región Chontalpa

La recomendación principales concientizar a los actores principales en la producción de caña de azúcar que son los productores, asociaciones y al Ingenio azucarero, en que el uso de las tecnologías permite reducir costos, hacer más eficientes las labores agrícolas, mejorar la calidad de vida del agricultor, reducir la contaminación ambiental y elevar los rendimientos y calidad de la caña de azúcar. El futuro de la agricultura va encaminado a la automatización de los procesos productivos y en esta época se está empezando abrir el sendero para ello, con el uso de los sensores remotos, la robótica, la inteligencia artificial, etc. Entre más pronto se implemente la agricultura de precisión mejor será el desarrollo socioeconómico en la región de la Chontalpa.

La segunda recomendación es adquirir la tecnología necesaria para hacer agricultura de precisión. En primera instancia, los sensores remotos como el dron para desempeñar actividades de campo. Por mencionar, el dron Agra T40 permite fumigar 20 ha en una hora, es decir, en una jornada se pueden fumigar hasta 100 ha por día con un solo dron. El precio de dron es de \$ 505,00 pesos mexicanos. Con 10 drones se pueden fumigar 2000 ha por día, en total con 10 drones se puede fumigar 20,000 ha de caña de azúcar en 10 días. La inversión sería alrededor de \$5 millones de pesos mexicanos. Lo cual, se reflejaría en ganancias sustanciosas al reducir el tiempo y cantidad de insumos agrícolas a aplicar y mayores rendimientos. En segunda instancia, e necesario adquirir maquinaria agrícola de precisión como las fertilizadoras de dosis variables y cosechadores con GPS que registran el rendimiento al momento de corte para generar mapas de rendimiento.

Lo anterior implica, mejorar la organización para homogenizar las aplicaciones con drones en el área de abastecimiento del ingenio.

La tercera recomendación es la creación de una oficina de teledetección que tenga el objetivo de administrar, dirigir, analizar, procesar y presentar los datos adquiridos de los sensores remotos (drones y satélites) con la finalidad de generar productos entregables en físico y digital como son reportes semanales que sirvan para la toma de decisiones en el cultivo de la caña de azúcar y mapas temáticos. Algunos reportes interesantes serían el monitoreo de plagas y enfermedades, cálculo de láminas de riego, índices de vegetación para dar seguimiento al estado de salud del cultivo y generar mapas de la predicción del rendimiento y calidad de la caña de azúcar meses antes del corte para planificar la cosecha y elevar la eficiencia en el ingenio. Asimismo, esta oficina se encargaría de dar servicio y mantenimiento a la flotilla de drones.

La cuarta recomendación es la creación de programas educativos para la especialización en la agricultura de precisión. Las instituciones y centros educativos deben enfocar sus programas al uso de técnicas y tecnologías en la agricultura de precisión, debido a que se requerirá gente con las habilidades y aptitudes necesarias para utilizar toda la información de los campos agrícolas que se pueden obtener de las diversas fuentes como son las estaciones meteorológicas, los sensores remotos, el análisis estadístico de los datos, el uso de sistemas de información geográficas y de cómputo.

Referencias bibliográficas

- García, J. L. (2008). Aproximación epistemológica al concepto de ciencia: una propuesta básica a partir de Kuhn, Popper, Lakatos y Feyerabend. *Andamios* 4 (8): 185-212.
- Ruiz, R. (2007). El método científico y sus etapas. México. 79 p. disponible en: <http://www.index-f.com/lascasas/documentos/lc0256.pdf>.
- Aguilar Rivera, N., Olvera Vargas, L. A., & Galindo Mendoza, G. (2013). Evaluación de aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar en la Huasteca potosina, México, por técnicas geomáticas. *Revista de Geografía Norte Grande* (55): 141-156.
- Aranda-Bastida, B. (2021). Efectos del uso de drones en la agricultura mexicana: el caso del Valle del Mezquital, Hidalgo (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.). 145 p.
- Rodríguez-Ramírez, R. (2019). Cadena de procesado para obtener mapas LAI de la caña de azúcar en el estado de Jalisco utilizando imágenes Sentinel-2. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Jalisco, México. 85 p.

- Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Zavala Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L. D. C., Ortiz-García, C. F., Castelán-Estrada, M., Guerrero-Peña, A., Aranda-Ibáñez, E. M., Moreno Cáliz, E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2010). lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en ingenios de México. *Interciencia* 35(3): 183-190.
- Vázquez-Rodríguez, B., Ontiveros Capurata, R., Ojeda Bustamante, W., & González Sánchez, A. (2018). Análisis histórico de los valores de ETC de una zona de riego estimados mediante imágenes satelitales. IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018. Aguascalientes, Sinaloa; México.
- Zenteno Cruz, G. A., Palacios Vélez, E., Tijerina Chávez, L., & Flores Magdaleno, H. (2012). Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 8(7): 1575-1586.
- Arreola, E. J. A., D.J. Palma L., S. Salgado G., W. Camacho CH. y L. Pastrana A. (2004). Efecto de cachaza enriquecida sobre la producción y la calidad de la caña de azúcar. *TERRA* 22 (3): 351-357.
- Córdova, G. G., S. Salgado G., M. Castelán E., D.J. Palma L., E. García M., y S. Córdova S. (2010). Fertilización alternativa para el cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Presidente Benito Juárez. In: *Memorias del Simposio: Aportes del Colegio de Postgraduados a la Investigación en Caña de Azúcar*. Sergio Salgado García, Mepivoseth Castelán Estrada, Cesáreo Landeros Sánchez y Emilio Manuel Aranda Ibáñez (eds). Córdoba Veracruz. pp 65-73.
- Espinosa, S. J.O., S. Salgado G., S. Córdova S., M. Castelán E., N.J. Rodríguez V. y R.G. Santos A. (2016). Diagnóstico nutricional de once variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en el Ingenio Azsuremex Tenosique, Tabasco. *Agroproductividad* 9(3) 54-59.
- Hernández, M. G.I., S. Salgado G., D. J. Palma-López, L.C. Lagunes E., M. Castelán E. O. Ruiz R. (2008). Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un Gleysol Mólico de Chiapas, México. *Interciencia*. 33 (11):855-860.
- Izquierdo-Hernández, J., S. Salgado-García, L.C. Lagunes-Espinoza, D.J. Palma-Lopez, H. Ortiz-Laurel, S. Cordova-Sanchez and M. Castelan-Estrada. (2016). Nutritional and Physiological Response of Sugarcane Varieties to Nitrogen Fertilization in a Haplic Cambisol. *Sugar Tech*, 18(5):493-499.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., A. Trujillo N., J.J. Obrador O., L. C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M.A. Carrera M. (1995). Diagnóstico de la fertilidad de los suelos cañeros del área de abastecimiento del Ingenio Tenosique. *Campus Tabasco, CP-Servicios Agroquímicos PYC S.A de C.V. H. Cárdenas, Tabasco*. 50 p.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J.J. Obrador O., A. Trujillo N., L.C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M.A. Carrera M. (2002). Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra Latinoamericana* 20: 347-358.

- Salgado-García, S., D.J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L. del C. Lagunes-Espinoza, C. F. Ortiz-García y J. M. Ascencio-Rivera. (2005). Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México. *Interciencia* 30 (7): 395-403.
- Salgado, G. S., D.J. Palma L., L. del C. Lagunes E., M. Castelán E., G. I. Hernández M. y O. Ruiz R. (2007). Uso de vinaza y composta de cachaza como sustitutos de fertilizantes NPK en caña de azúcar: Ingenio Pujiltic. Informe final. Fundación PRODUCE Chiapas A. C. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 44 p.
- Salgado-García, S., D.J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L. del C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada, C. F. Ortiz-García, J. F. Juárez-López, J.A. Rincón-Ramírez y E. Hernández-Nataren. (2008). Programa sustentable de fertilización para el Ingenio Pujiltic, Chiapas, México. *TERRA LATINOAMERICANA* 26 (4): 361-373.
- Salgado-García, S., D.J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L. del C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada, C. F. Ortiz-García, J. F. Juárez-López, O. Ruiz-Rosado., L. Armida-Alcudia, J.A. Rincón-Ramírez. y S. Córdova-Sánchez. (2011). Un programa de fertilización sustentable para el Ingenio “Presidente Benito Juárez” en Tabasco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 15:45-65.
- Salgado-García, S., M. Castelán-Estrada, E. M. Aranda-Ibáñez, C. F. Ortiz-García, H. Ortiz-Laurel, L. C. Lagunes-Espinoza, J. H. R. Mendoza-Hernández, y S. Córdova-Sánchez. (2014). Validación de dosis generadas por el sistema de fertilización SIRDF para caña de azúcar (*Sacharum officinarum*). *AGROPRODUCTIVIDAD* 7 (2): 47-54.
- Salgado, G. S., J. Izquierdo H., L. del C. Lagunes E., D. J Palma-López., S. Córdoba S., H. Ortiz L., y M. Castelán E. (2017). Consumo de nitrógeno por cultivos de caña de azúcar en Tabasco, México. *Rev. FCA UNCUYO* 49(1):45-59.
- Arévalo, R. A., E. I. Bertoncini, N. Guirado, y S. Chaila. (2006). Los términos cultivar o variedad de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Rev. CHAPINGO serie horticultura* 12(1):5-9.
- Salgado G., S., L. del C. Lagunes E., R. Nuñez E., C.F. Ortiz G., L. Bucio A., y E. M. Aranda I. (2013). *Caña de Azúcar Producción Sustentable*. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. México. 524 p.
- Alonso, C. J. (2000). *La agonía del cientificismo. Una aproximación a la filosofía de la ciencia*. Editorial: Navarra: Eunsa.
- Salgado, G. S., R. Núñez E. y L. Bucio A. (2003). Determinación de la dosis óptima económica de fertilización en caña de azúcar. *Terra Latinoamericana*. 21:267-272.

- Cerezal, J. y Fiallo, J. 2005. *Cómo investigar en pedagogía*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Aguilar-Rivera, N., Mendoza, G. G., & Martínez, J. F. (2012). Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México. *Revista de la Facultad de Agronomía La Plata* 111(2) 64-74.
- Ramos, C. E. (2016). *Métodos y técnicas de investigación*. Disponible en: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/48130436/Metodos_y_tecnicas_de_investigacion__GestioPolis.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMet

CAPÍTULO 14

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE CHILE AMASHITO (*CAPSICUM ANNUUM* VAR. *GLABRIUSCULUM*)

Benigno Rivera Hernández¹, Vianey González Jiménez¹, Víctor Hugo Quej Chi², Edelia Claudina Villareal Ibarra³, Juan Manuel Villarreal Fuentes⁴, Francisco Limón Barahona⁵

Resumen

La demanda de chile amashito en México se satisface en su gran mayoría por la recolecta de frutos provenientes de plantas silvestres. Esta investigación bibliográfica se enmarca en la problemática agronómica actual sobre la baja germinación de la semilla, primer eslabón del sistema de producción agrícola. Se analizó la sustancia o fitoregulator que tiene la mayor influencia sobre la germinación de semilla y cual presenta menor variabilidad en el porcentaje de germinación. Se consideraron únicamente artículos científicos disponibles en el motor de búsqueda Google Scholar, para un periodo comprendido entre 2000 y 2022. Se evidencia la publicación de 22 artículos sobre germinación de semillas de chile amashito y se han estudiado 147 tratamientos para incrementar la germinación de las semillas; el más estudiado es el ácido giberélico (AG_3) con 70 tratamientos sólo y 27 estudios en combinación con otras sustancias [ácidos húmicos, cloruro de sodio ($NaCl$), peróxido de oxígeno (H_2O_2), ácido clorhídrico (HCl) y nitrato de potasio (KNO_3). En 43 tratamientos se estudió el AG_3 , en combinación con tratamientos térmicos, mecánicos, edad de la semilla, prueba de envejecimientos y color de fruto.

¹ Benigno Rivera-Hernández. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. benigno.rivera@upch.mx. ORCID: 0000-0003-1713-4710.

¹ Vianey González-Jiménez. Dra. en Ciencias Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. Autor correspondiente: vianey.gonzalez@upch.mx. ORCID: 0000-0003-2746.

² Víctor Hugo Quej Chi. Dr. en Ciencias. Colegio de Postgraduado Campus Campeche, Champotón, Campeche, México. quej@colpos.mx. ORCID:0000-0002-9356-6251.

³ Edelia Claudina Villareal Ibarra. Dra. en Ciencias. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. edelia.villareal@upch.mx. ORCID: 0000-0002-1574-9511.

⁴ Juan Manuel Villarreal Fuentes. Dr. en Ciencias. Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. jmfvy@unach.mx. ORCID: 0000-0003-2617-5303.

⁵ Francisco Limón Barahona. Tesisista. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. francisco.limoncito@hotmail.com.

La concentración de 400 ppm de AG_3 presenta el mayor porcentaje de germinación (97 %) con una desviación estándar aceptable (29.8 %); la concentración de 350 ppm de AG_3 presenta el segundo mejor porcentaje de germinación (91 %), pero con una desviación estándar muy alta (42.5 %). La evidencia presentada muestra que la germinación de la semilla de chile amashito puede incrementarse con el uso de hormonas vegetales y tratamientos térmicos.

Palabras claves. *Chile silvestre, chiltepine, chile amash, chile de montey bird pepper.*

Introducción

El consumo de “chile amashito” (*Capsicum annum* var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser y Pickersgill) se debe a sus características organolépticas; por lo que, es muy utilizado en la gastronomía. Además, es usado en la medicina tradicional ancestral y en rituales religiosos. Las poblaciones naturales de “chile amashito”, se encuentran distribuidas en casi todos los estados de la república mexicana. En Tabasco se distribuye en diferentes ecosistemas que se encuentran en las zonas costeras, llanuras aluviales y en las estribaciones de los cerros (Gutiérrez-Burón et al., 2020). Dentro de la var. *glabriusculum*, existen dos grandes grupos los “chiltepinos redondos u ovalados” que se encuentran en su mayoría en el norte del país, y los “piquines alargada”, los cuales se encuentran en el centro y sur de México. La forma natural de propagación del chile amashito ocurre cuando los frutos maduros son ingeridos por los pájaros y luego de pasar por el tracto digestivo, las semillas son distribuidas a través de las deposiciones (Araiza et al., 2011).

El chile amashito es una especie semi-domesticada y ampliamente consumido en el sureste de México, la demanda de fruto es casi cubierta en su totalidad por la recolecta de plantas silvestres. Sin embargo, las poblaciones naturales de chile amashito han disminuido, debido a que los recolectores cortan las plantas para facilitar la cosecha, otra causa es la reducción del hábitat natural en que se reproduce.

El cultivo de chile amashito como hortaliza es difícil debido a aspectos de manejo agronómico no definidos (Beltrán-Burboa et al., 2019).

La germinación de la semilla y la homogeneidad son dos características que influyen directamente en el éxito de establecimiento de plantaciones comerciales de cualquier hortaliza. La germinación de la semilla del chile amashito ha sido y sigue siendo objeto de estudio (Araiza et al., 2011, González-Cortés et al., 2015; Alcalá-Rico et al., 2019), dado que los porcentajes de germinación son bajos. Recientemente, se publicó un artículo sobre propagación de chile amashito mediante técnica de clonación; es decir, utilizando tecnologías avanzadas, en contraparte se tiene que es una tecnología especializada y poco probable que la utilice el productor local del estado de Tabasco.

Se ha demostrado que la limitante en la germinación no consiste en una barrera física a la absorción del agua y el porcentaje de germinación no está relacionado con el tamaño del fruto, la forma, ni su lugar de origen (Cano-Vázquez et al., 2015), por tanto, las bajas tasas de germinación del chile amashito son atribuibles a latencia de la semilla. El chile amashito debería producirse intensivamente para proteger la población silvestre y satisfacer la demanda; sin embargo, la baja germinación de las semillas es un problema para su establecimiento a nivel comercial (Cano-Vázquez et al., 2015).

Esta investigación bibliográfica se enmarca en la problemática agronómica que existe actualmente sobre la germinación de la semilla. Se han realizado numerosos estudios sobre escarificación química, física y biológica, como tecnología para incrementar la germinación de la semilla. Sin embargo, existe una variación en el porcentaje de germinación en los métodos de escarificación y concentración de sustancia utilizada. La variabilidad de los resultados sobre la germinación y emergencia de la semilla dificulta la aplicación del conocimiento generado; por lo que, es importante realizar un análisis de la información bibliográfica científica publicada en la web que permita conocer que método y que concentración de las sustancias promotoras de germinación de semilla son más efectivas.

Metodología

Se consideraron únicamente artículos científicos sobre germinación de semilla de chile amashito, disponibles en el motor de búsqueda Google Scholar, para un periodo de 22 años, comprendido entre 2000 y 2022.

La recopilación de los artículos se realizó entre octubre y noviembre del 2022. Se utilizó la técnica bola de nieve para obtener los artículos faltantes, a partir de la lista de referencias bibliográficas de los artículos encontrados inicialmente. En la búsqueda de información se aplicaron criterios en español e inglés. La selección de la información se logró utilizando veintidós palabras claves: 17 de nombre común: “chile amash”, “chile amashito”, “chiltepín”, “chiltepines”, “chile piquín”, “chiltepec”, “chiltepillo”, “chilpaya”, “chile de monte”, “chile parado”, “ají”, “chile pequin”, “chilipiquin”, “pepper pepper”, “bird pepper”, “american bird pepper”, “chiltepin pepper” y 5 de nombre científicos (*Capsicum annum* L. variedad *glabriusculum*, *C. annum* L. var. *minus*, *C. annum* L. var. *baccatum*, *C. annum* L. var. *minimum*, *C. annum* var. *aviculare*).

Lo anterior debido a que hasta el año 1999 el “chile amashito” recibía diferentes nombres científicos, por lo que se decidió incluir esos nombres e identificar dentro del artículo si los frutos eran descritos y parecidos morfológicamente a la variedad *glabriusculum*, en aquellos artículos donde no describían los frutos no se consideraron.

Se utilizó la técnica bola de nieve para obtenerlos artículos faltantes, a partir de la lista de referencias bibliográficas de los artículos encontrados inicialmente (Leipold, 2014). La razón por la cual se recurrió al motor de búsqueda Google Scholar se debe a que es el más usual en la búsqueda de textos científicos porque su cobertura es tres veces mayor que WoS (Web of Science) o Scopus (Camacho-Bercherlt et al., 2023).

Análisis estadísticos

Para los análisis estadísticos, se elaboró una base de datos para conocer el número de artículos, el método empleado, tipo de sustancia y la concentración.

Con esa información se realizó un análisis de varianza y desviación estándar, utilizando la versión del paquete estadístico Minitab-18.

Análisis y discusión de los resultados

Métodos utilizados en la germinación de semilla de chile amashito

En la búsqueda de información en la web se localizaron veintidós artículos científicos sobre germinación de semilla de chile amashito.

Los avances científicos en germinación indican que se han estudiado ciento cuarenta y siete tratamientos para mejorar la germinación de la semilla. La certidumbre de los resultados de los diferentes científicos tiene una relación de confiabilidad y validez de los tratamientos evaluados. Los tratamientos se pueden clasificar en cinco clases: i) concentración utilizada de la sustancia “fitorregulador”, ii) tratamiento térmico con diferente tiempo de inmersión, iii) concentración y tiempo de inmersión con ácido, iv) métodos mecánicos, y v) uso de bioactivos.

Los tratamientos fueron probados de manera individual y en combinación, evaluados en ambientes controlados como cámara de germinación y otros en ambiente natural “temperatura ambiente”.

La sustancia química más estudiada para incrementar la germinación de la semilla de chile amashito es el ácido giberélico (AG_3) con 70 tratamientos; 27 tratamientos se estudiaron en combinación con ácidos húmicos, cloruro de sodio (NaCl), peróxido de oxígeno (H_2O_2), ácido clorhídrico (HCl) y nitrato de potasio (KNO_3), en 43 tratamientos se estudió AG_3 en combinación con tratamientos térmicos, mecánicos, diferente edad de semilla, prueba de envejecimiento y color de fruto. La concentración más estudiada de AG_3 es 5000 ppm (Figura 1); sin embargo, el efecto positivo puede variar según el cultivar silvestre, lugar de recolección, edad de la semilla y el beneficiado de la semilla.

La combinación de agua caliente a 50 °C durante 5 minutos más 5000 ppm de AG_3 promueve la germinación de semilla hasta 98 % (Figura 2); la misma concentración de AG_3 cuando se utilizan semillas almacenadas durante cuatro meses, la germinación disminuye hasta 97.3 % (Figura 3). El color del fruto al momento de la cosecha parece ser otra fuente de variación que influye en el porcentaje de germinación de la semilla. La extracción de semillas de frutos color púrpura en combinación con 5000 ppm de AG_3 presenta una tasa de germinación del 94 %.

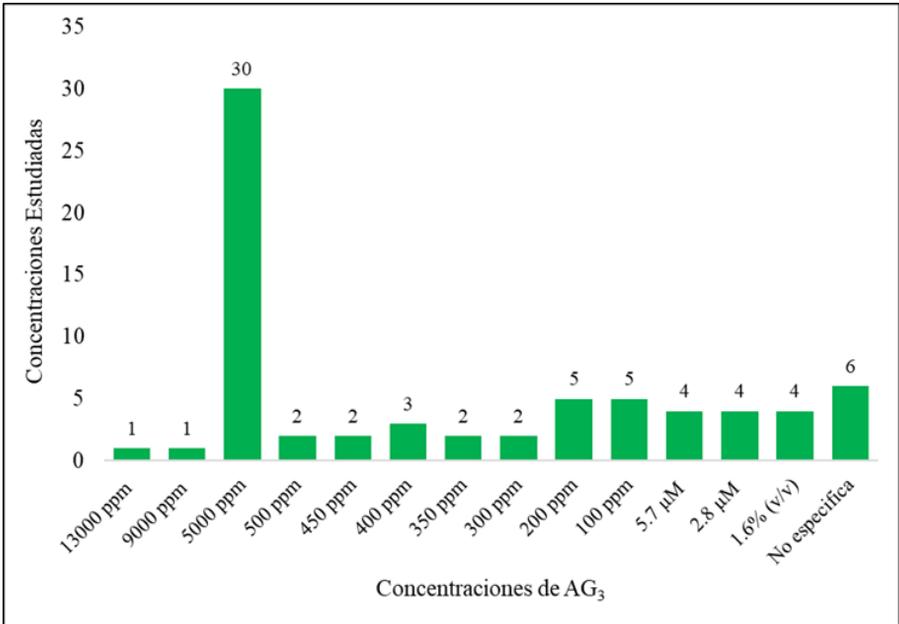


Figura 1. Concentraciones de ácido giberélico (AG₃) estudiadas.

Cuarenta y dos tratamientos de sustancias ácidas y sales se han estudiado en tratamientos separados y combinados con el objetivo de incrementar el porcentaje de germinación de las semillas de chile amashito. La sustancia ácida más estudiada es el ácido sulfúrico (H₂SO₄) con 18 concentraciones diferentes. La concentración de H₂SO₄ al 20 % durante 4 h de inmersión de semilla promueve el 80.2 % de la germinación. La inmersión de semilla en ácido clorhídrico (HCl) al 3 % durante 24 h promueve el 93.4 % de la germinación; mientras que, el hipoclorito de sodio (NaClO) al 3 % promueve el 80.1 % de la germinación (Figura 4).

En la Figura 5, se muestran treinta y cinco tratamientos con inmersión térmica en agua caliente solo y combinado con métodos mecánicos y con hongos. La inmersión de semillas en agua más hongo *Glomus intraradices* por 24 h a 30°C promueve más del 89.7 % de la germinación de semilla de chile amashito.

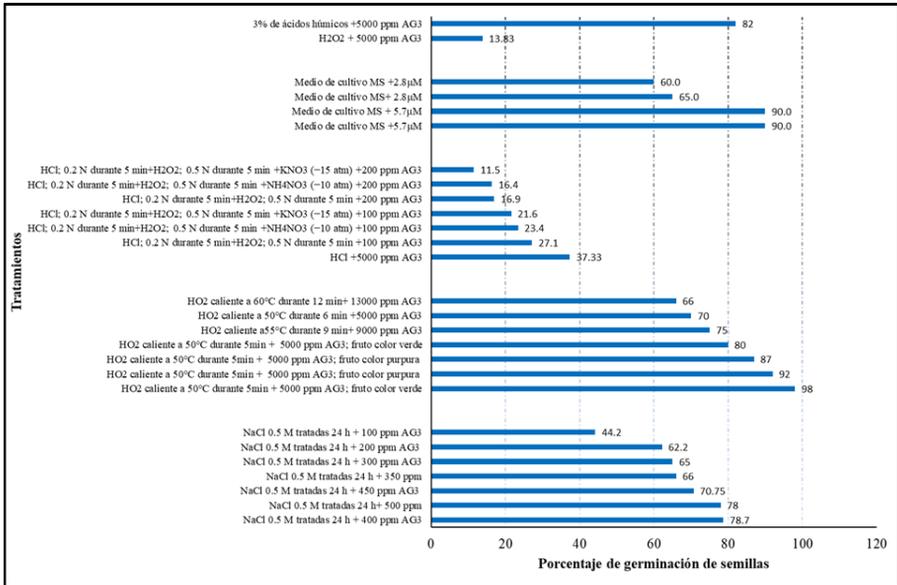


Figura 2. Concentraciones de ácido giberélico estudiadas en combinación con diferentes sustancias.

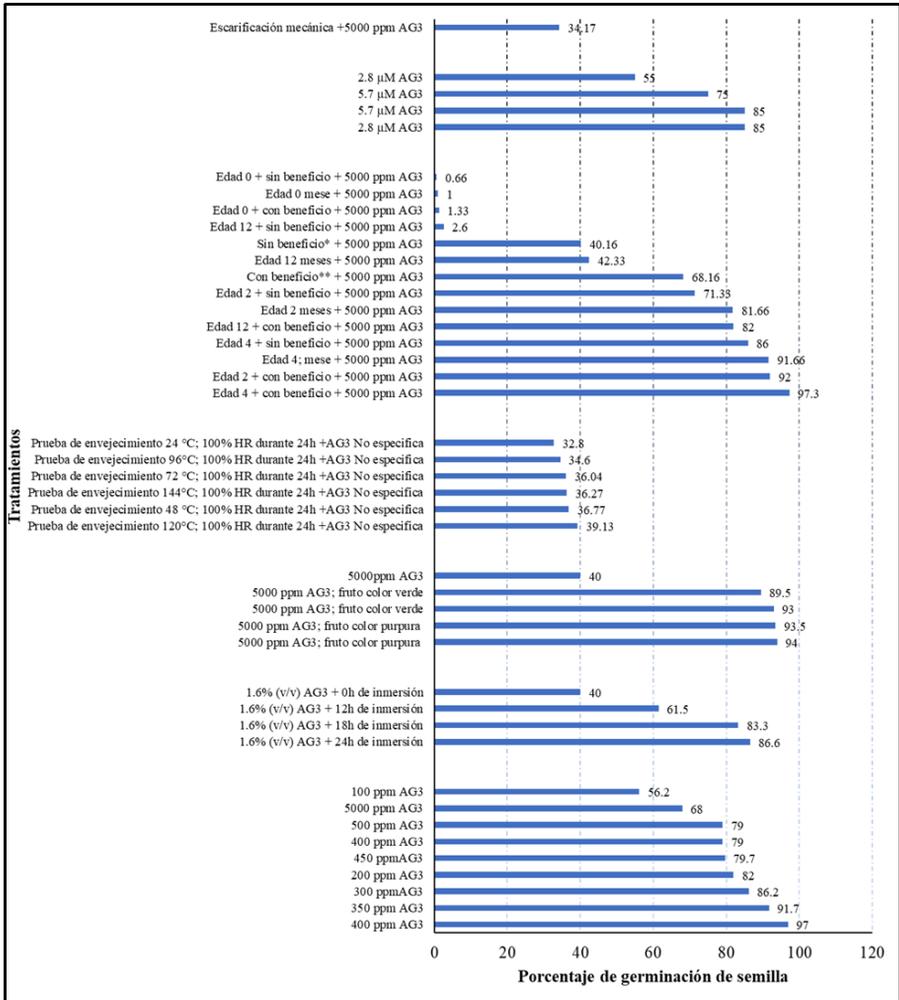


Figura 3. Concentraciones de ácido giberélico estudiadas en combinación con diferentes tratamientos.

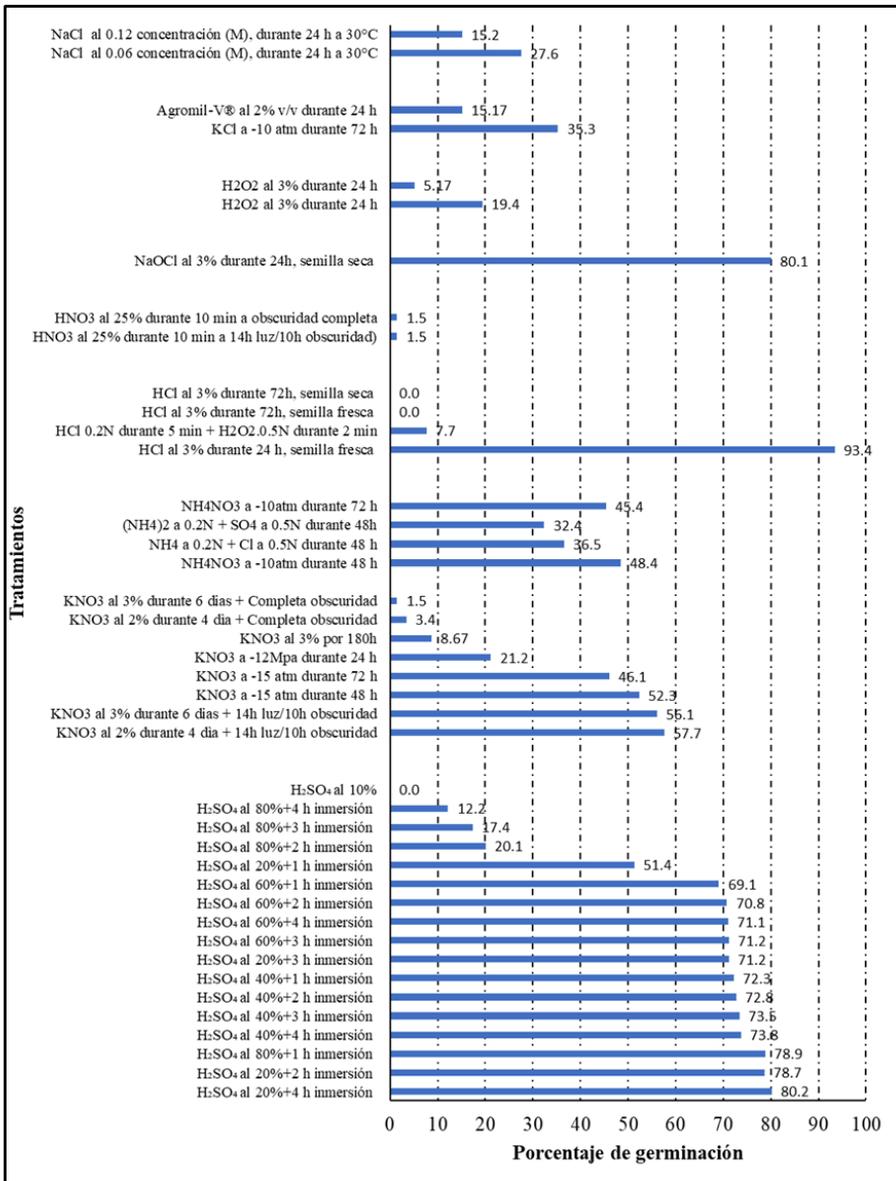


Figura 4. Sustancias ácidas y sales estudiadas solas y en combinación para incrementar el porcentaje de germinación de semillas de chile amashito.

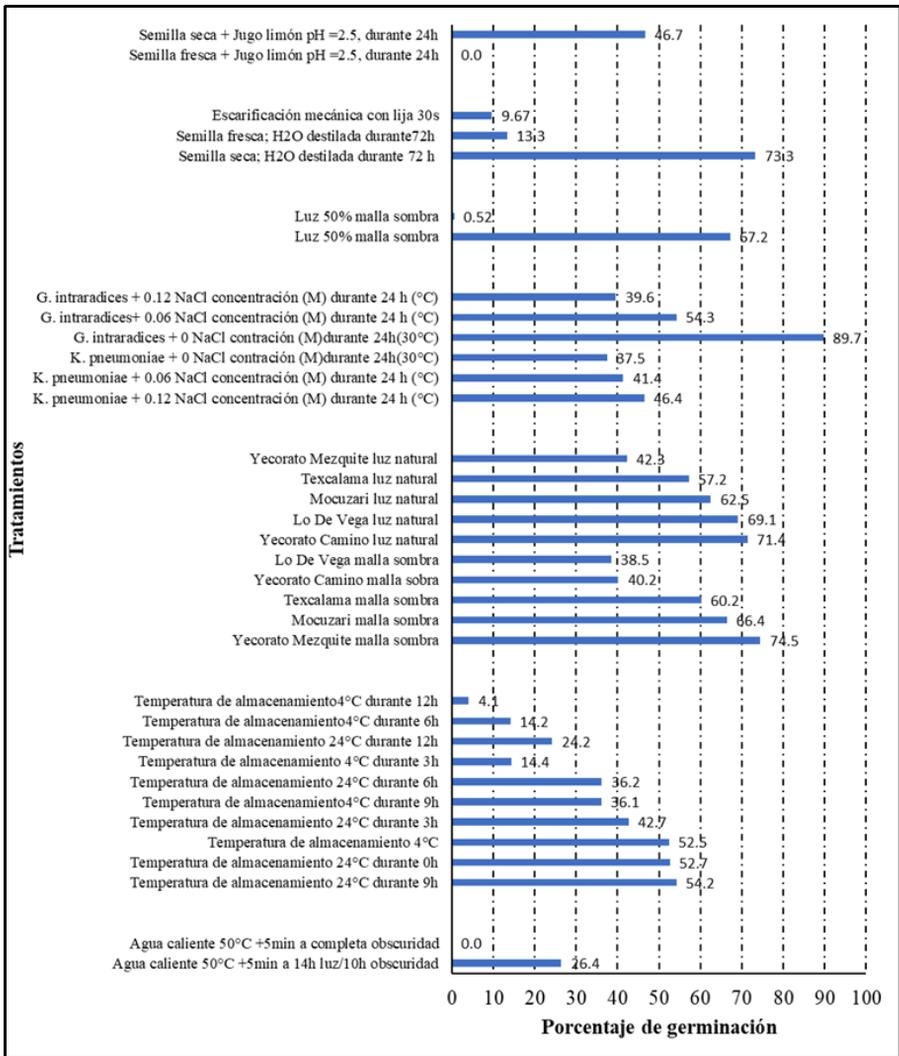


Figura 5. Tratamientos térmicos y en combinación con métodos para incrementar el porcentaje de germinación de semillas de chile amashito.

Sustancia con menor variabilidad en la germinación de la semilla

En la Figura 6, se muestra en el eje de las abscisas el nombre de la sustancia

con la concentración y en el eje de las ordenadas el porcentaje de germinación de cada sustancia, las barras muestran la desviación estándar en ambos sentidos de las concentraciones que representa la variación de los resultados obtenidos de los tratamientos analizados. La concentración de 400 ppm de AG_3 presenta el mayor porcentaje de germinación (97 %) con una desviación estándar aceptable (29.8 %).

La concentración de 350 ppm de AG_3 presenta el segundo mejor porcentaje de germinación (91%), pero con una desviación estándar muy alta (42.5 %), que está fuera del rango de confiabilidad. Otra concentración de AG_3 con potencial para ser utilizada es 5.7 μM de AG_3 que presenta menor porcentaje en comparación con las concentraciones anteriores, pero con un coeficiente de variación muy bajo (7.1 %). Esta concentración puede ser recomendada para la producción de plántulas debido a la menor variabilidad en el porcentaje de germinación. Otras sustancias como el NaCl al 0.5N tiene un porcentaje de germinación bajo (66.41 %) pero con una desviación estándar muy aceptable (11.7); el KNO_3 , HCl y H_2O_2 tienen coeficiente de desviación estándar muy aceptables (4.8, 22.09, 15.1), pero su porcentaje de germinación es muy bajo: 49.2 %, 8.5 % y 19.95%, respectivamente.

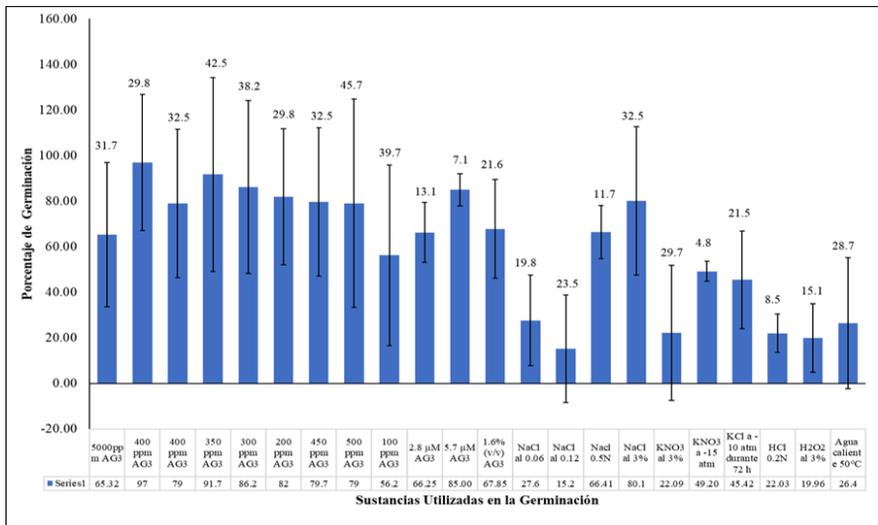


Figura 6. Sustancias utilizadas en la germinación de semillas de chile amashito y su desviación estándar.

Conclusiones

La evidencia presentada muestra que la germinación de la semilla de chile amashito puede incrementarse con el uso de fitohormonas, tratamientos térmicos e inclusive utilizando microorganismos. Existe una variación considerable entre los diferentes tratamientos, lo que provoca una incertidumbre al momento de recomendar un tratamiento específico. Sin embargo, consideramos que el tratamiento de 5.7 μm de AG_3 podría recomendarse por el momento a los productores de chile amashito, porque presenta un 87 % de germinación y una variación de 7.1 % en los resultados. Investigaciones futuras que involucren la nutrición de la planta son necesarios, porque podrían incrementar la homogeneidad de la germinación de la semilla, mejorando la planeación y la reducción de los costos de la producción de las plántulas.

Referencias bibliográficas

- Alcalá-Rico, J. S. G. J., López-Benítez, A., Vázquez-Badillo, M. E., Sánchez-Aspeytia, D., Rodríguez-Herrera, S. A., Pérez-Rodríguez, M. Á., & Ramírez-Godina, F. (2019). Seed physiological potential of *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* genotypes and their answers to pre-germination treatments. *Agronomy*, 9(6), 325. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060325>.
- Araiza, L. N., Lizarde, E. A., & Martínez, J. G. M. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de plántula de chiltepín (*Capsicum annuum* L variedad *glabriusculum*) en invernadero. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(2), 170-175.
- <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/28006/28258>.
- Beltrán-Burboa, J. N., López-Peralta, M. C. G., Hernández-Meneses, E., & Cruz-Huerta, N. (2019). Germinación in vitro de chile chiltepín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) y regeneración por organogénesis. *Agrociencia*, 54, 195-208. <https://www.agrociencia-olpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1901>.
- Cano-Vázquez, A., López-Peralta, M., Zavaleta-Mancera, H. A., Cruz-Huerta, N., Ramírez-Ramírez, I., Gardea-Béjar, A., & González-Hernández, V. A. (2015). Variación en grados de latencia en semillas entre colectas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*). *Botanical Sciences*, 93(1), 175-184. <https://doi.org/10.17129/botsci.138>.

- Camacho-Bercherlt, M., Rojas Herrera, J. J., & Santillán Fernández, A. (2023). Análisis bibliométrico de la producción científica sobre cooperativas agropecuarias en países hispanoparlantes. *Cooperativismo & Desarrollo*, 31(126), 1-24. <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2023.02.01>.
- González-Cortés, N., Jiménez, V. R., Guerra, B., Ericka, C., Silos, E. H., & Payro, C. E. (2015). Germinación del chile amashito (*Capsicum annum* L. var. *Glabriusculum*) en el sureste mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 2211-2218. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.800>.

CAPÍTULO 15

ALIMENTO BALANCEADO PARA PEZ TILAPIA, A BASE DE CÁSCARA DE HUEVO, CÁSCARA DE CAMARÓN Y PERICARPIO DE MAÍZ

Elizabeth Martínez Valera¹, Perla García Jiménez²

Resumen

La presente investigación se refiere a la creación de un alimento balanceado para pez tilapia a base de cascara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz. La cáscara de huevo y la cáscara de camarón son materiales que se encuentran presentes como desechos en todos los hogares de la región, y el pericarpio de maíz es el principal residuo de una fábrica, ubicada en la región, que se dedica a la elaboración de harina de maíz (Hari masa). Ambos alimentos combinados son una buena opción para satisfacer las necesidades nutricionales del pez tilapia. Al ser un alimento hecho a base de lo que se considera residuos, el costo de la materia prima es relativamente bajo. Se experimentó con 10 ejemplares de tilapia, para ver la respuesta que tienen al alimento, y de ser una respuesta favorable, se estarían reduciendo los costos de crianza de dichos peces de manera significativa. Se diseñó y elaboró un molino, que pudiera pulverizar completamente las materias primas que se utilizarían en la elaboración del alimento balanceado. Se determinó que la forma ideal para el alimento balanceado eran los pellets, por lo cual fue necesario diseñar y elaborar una maquina peletizadora, que fuera capaz de dar dicha forma a la materia prima anteriormente pulverizada.

Palabras claves. *Pez, cascara de camarón, cascara de huevo*

¹ Elizabeth Martínez Valera. elizab.mv@laventa.tecnm.mx. ORCID: [0000-0002-4036-7873](https://orcid.org/0000-0002-4036-7873). Instituto Tecnológico Superior de Villa la Venta, Tabasco.

² Perla García Jiménez. perla.gj@laventa.tecnm.mx. ORCID: [0009-0003-8718-8287](https://orcid.org/0009-0003-8718-8287). Instituto Tecnológico Superior de Villa la Venta, Tabasco.

Introducción

Las tilapias (*Oreochromis* sp. y *Tilapia* sp.), introducidas en México desde 1964, tienen gran importancia en la producción de proteína animal en aguas tropicales y subtropicales de todo el mundo, particularmente en los países en desarrollo. El cultivo de tilapia es uno de los más rentables dentro de la acuicultura, ya que es altamente productivo, debido a los atributos de la especie, como son: su rápido crecimiento, resistencia a enfermedades, elevada productividad, tolerancia a condiciones de alta densidad, capacidad para sobrevivir a bajas concentraciones de oxígeno y a diferentes salinidades, así como la aceptación de una amplia gama de alimentos naturales y artificiales. (INP, 2018).

Los peces constituyen una parte fundamental de la dieta de los seres humanos, ya que nos proporciona proteínas de excelente calidad y elevado valor biológico, es rico en ácidos grasos Omega-3 de cadena larga, provee una amplia variedad de minerales (calcio, fósforo, sodio, potasio, magnesio, hierro, zinc, iodo, etc.) vitaminas (A, D, E, K y el grupo B) y es una excelente fuente de otros micronutrientes. (Avdalov, 2014).

En nuestra región una parte de la cantidad de peces que se consumen provienen de la pesca directa en el mar, ríos o lagunas, otra parte importante proviene de los que son criados en viveros, es decir, en estanques especiales donde una persona se encarga de darles de comer con alimentos específicos. Uno de estos cultivos es el de tilapia, especie originaria del continente africano, que actualmente habita la mayor parte de las regiones tropicales del mundo donde las condiciones son favorables para su reproducción y crecimiento.

Debido a que, como se mencionó anteriormente, el pez tilapia forman parte fundamental de la dieta de los pobladores de nuestra región y la producción (crianza) de estos en estanques representa una importante actividad económica, se llevó a cabo la formulación ideal de un alimento para peces con materias primas locales propios de la región.

La cáscara de huevo está presente en todos los hogares de nuestra región, y es comúnmente desechada, sin embargo, está constituida principalmente por calcio (una cascara contiene entre 750 y 800 miligramos de calcio) además de

otras vitaminas (Varvel, 2005); en este proyecto se pretende aprovechar todos esos nutrientes y utilizarlos para crear un alimento para pez tilapia, con alto valor energético. Las cáscaras de huevos siempre se han considerado indebidamente como un desperdicio ó residuo sólido procedente, entre otros, de las plantas de incubación de huevos, de las industrias que procesan los huevos para otros fines, de las fábricas de repostería, mayonesas y salsas, por mencionar algunas, y de las cuales hay que librarse. ¿Cuál es la razón para ello? Es necesario recordar que los residuos y desperdicios sólidos son aquellas sustancias o desechos que se han generado por una actividad productiva o de consumo, de los que hay que desprenderse, por no ser de utilidad para la fábrica o establecimiento que los generó. Estos residuos pueden ser inertes, tóxicos o contaminantes, debido fundamentalmente por la presencia de sustancias orgánicas degradables y contagiosas que puedan afectar tanto la salud humana como el medio ambiente (Valdes, 2009).

Los camarones son los crustáceos de mayor interés económico, ya que se consideran como un alimento de alto consumo en el mercado alimenticio; sin embargo, la parte con utilidad comercial del camarón es su cola. La cabeza de camarón no tiene valor económico por lo que se desecha para evitar que se acelere el proceso de descomposición del producto, al separarlo de sus vísceras (Jones, 2002).

Los residuos de camarón son parte de la materia prima original y se desechan actualmente, al no existir procesos industriales eficientes de extracción de sus componentes utilizables. Este proceso podría representar un beneficio económico para las industrias camaroneras, ya que se comercializaría algo que ha sido considerado como un desecho (Carmona, 2004).

La cáscara de camarón tiene un alto contenido de proteína y otros minerales, los cuales pueden ser aprovechados para alimentar al pez tilapia. Este ingrediente es económico, ya que es el principal desecho de las coctelerías y restaurantes de la región (Salas-Durán, 2015).

El fruto del maíz es un cariósipide seco e indehiscente con pericarpio delgado y soldado al tegumento seminal, razón por la cual erróneamente se le nombra semilla.

El pericarpio es la estructura externa del fruto del maíz (sólo está recubierto por la cutícula), y es la barrera inicial para la invasión de patógenos o insectos, por lo cual su número de capas celulares y el grosor de estas influyen en la susceptibilidad a estos organismos (García et al., 2003).

El pericarpio es de origen materno, mide de 60 a 140 μ m de grosor y constituye el 5 % del peso del grano. Anatómicamente está conformado por epicarpio, mesocarpio, células cruzadas y células tubulares; químicamente está constituido por fibras de celulosa (23 %) y hemicelulosa (67 %), inmersas en una matriz de sacarosa y con una pequeña fracción de lignina, la cual le confiere resistencia, firmeza y rigidez (Gutiérrez et al., 2007).

El pericarpio por su parte es otro ingrediente que se utilizó en la elaboración de dicho alimento, contiene un elevado porcentaje de proteína y fibra, es el principal desecho de las fábricas que elaboran harina de maíz, en nuestra región se encuentra presente en la industria de Hari Masa.

La hipótesis propuesta para este proyecto fue: La elaboración de un alimento balanceado para el pez tilapia, a base de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz suple las necesidades nutricionales adecuadas para su desarrollo, logrando así la sustitución del alimento comercial.

Metodología

Este proyecto es mixto ya que se considera llevar investigación cuantitativa y cualitativa, debido a que se realizara la búsqueda del método para realizar el alimento balanceado para pez tilapia a base de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz, se llevará a la práctica y se comparan los resultados obtenidos con los alimentos para pez tilapia comerciales.

La técnica para recolección de datos que se utilizó en este proyecto fue la observación, para poder analizar la repuesta que tienen los peces al alimento balanceado que se le suministrará, la cual se podrá observar en la ganancia de peso, el grosor y la longitud que dichos peces tendrán.

Figura 1



Lavado de las cáscaras de huevo. Elaboración propia.

Figura 2



Cáscaras de camarón lavadas. Elaboración propia

Figura 3



Cáscara de camarón en el horno. Elaboración propia.

Figura 4



Pericarpio de Maíz. Elaboración propia

Materiales

Cáscara de huevo: Se obtuvo la cáscara de huevo diariamente en los hogares, panaderías, y restaurantes la cual fue necesario lavar para eliminar los residuos de la clara y yema como lo muestra la Figura 1, posteriormente se expuso al sol, para eliminar la humedad presente en estas. Una vez secas se procedió a almacenarlas en un recipiente hermético que no deja pasar la humedad. Después se procedió a molerlas para obtener un polvillo fino, que ayudará en la mezcla con la cáscara de camarón y el pericarpio de maíz.

Cáscara de camarón.

La cáscara de camarón se obtuvo de establecimientos dedicados a la elaboración y venta de platillos, cuyo ingrediente principal es el camarón, razón por la cual la cáscara de camarón es el principal desecho. Se procedió a lavar la cáscara de camarón con agua y jabón para evitar alguna descomposición en esta como se muestra en la Figura 2. Una vez limpia, se introdujo en un horno por alrededor de 30 minutos a 180° C para retirar toda la humedad presente en la materia prima ver Figura 3.

Recolección del Pericarpio de Maíz.

El pericarpio de maíz Figura 4. se obtuvo de la fábrica Hari Masa del Sureste SA de CV, la cual se dedica a la producción de harina de maíz, siendo su principal residuo el pericarpio. Posteriormente se expuso al sol para eliminar la humedad presente en este. Una vez seco se procedió a la molienda para obtener un polvillo fino que se mezclará con el polvo de la cáscara de huevo y la cáscara de camarón.

Maquinaria principal utilizada

Molino

Para la elaboración del alimento balanceado para el pez tilapia es necesario la obtención de un polvillo fino del pericarpio de maíz, la cáscara de huevo y la cáscara de camarón, para que dichos ingredientes se mezclen de manera homogénea. Por esta razón se elaboró un molino eléctrico que es capaz de pulverizar los ingredientes principales del alimento balanceado Figura 5.



Lavado de las cáscaras de huevo. Elaboración propia.

Figura 5

Peletizadora

Una vez obtenido la mezcla homogénea del pericarpio de maíz y la cascara de huevo, se procedió a darle la forma para que al pez tilapia se le facilite su consumo, se determinó que la forma óptima serían los pellets, por lo cual fue necesario el diseño y elaboración de una maquina peletizadora eléctrica. Figura 6.



Peletizadora

Figura 6

Molienda del pericarpio de maíz.

Para la elaboración del alimento balanceado es necesario moler el pericarpio de maíz, y que este se convierta en un polvo fino, Figura 7. Al moler dicho material en el molino, se observó que el pericarpio de maíz adquirió las características necesarias para poder elaborar el alimento balanceado, Figura 8



Molienda del pericarpio de maíz.

Figura 7

Figura 8



Pericarpio de maíz molido

Figura 9



Molienda de la cáscara

Figura 10



Cáscara de huevo molida

Figura 11



Molienda de la cáscara

Molienda de la cáscara de huevo.

Para la elaboración del alimento balanceado es necesario moler la cáscara de huevo, y que esta se convierta en un polvo fino, Figura 9. Al moler dicho material en el molino, se observó que la cáscara de huevo adquirió las características necesarias para poder elaborar el alimento balanceado, Figura 10.

Molienda de la cáscara de camarón.

Para la elaboración del alimento balanceado es necesario moler la cáscara de camarón, y que esta se convierta en un polvo fino, Figura 11. Al moler dicho material en el molino, se observó que la cáscara de camarón adquirió las características necesarias para poder elaborar el alimento balanceado, Figura 12.

Figura 11



Formulación del alimento.

Para poder lograr que el alimento funcione de manera óptima y cumpla las necesidades nutrimentales del pez tilapia, es necesario que dicho alimento contenga las cantidades adecuadas de cada una de las materias primas. Para esto, con ayuda de la academia de Ingeniería en Industrias alimentarias, se realizaron los siguientes cálculos, para determinar la cantidad que contendrá de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz.

Requerimientos nutricionales de la tilapia.

30 % Proteína/ 30 % Lípidos/ 40 % Carbohidratos.

Contenido nutricional de las materias primas.

Tabla 1. Contenido nutricional. Elaboración propia

Insumos	% Proteína	% Carbohidratos	% Lípidos
Pericarpio de maíz	40 %	1.5 %	2.7 %
Cascara de camarón	50.27 %	-	6.57 %
Cascara de huevo	1.4 %	2.5 %	-

Dosificación de la Mezcla

Una vez realizada la molienda del pericarpio de maíz, la cáscara de camarón y

la cáscara de huevo, se procedió a dosificar dicha materia prima. Se agregó % del pericarpio de maíz molido, % de la cascara de huevo molida y % de la cáscara de camarón, se le agregaron x ml de agua. Posteriormente se procedió a mezclar los ingredientes utilizando las manos hasta obtener una mezcla homogénea, Figura 13.



Figura 13. Mezcla de las materias primas. Elaboración propia.

Peletizado.

Una vez obtenida la mezcla homogénea se procederá a introducirla dentro de la maquina peletizadora, para que de esta salga el alimento de 1.5 mm de grosor, que es la mediana que se determinó como adecuada para que el pez tilapia pueda consumirlo de forma fácil, Figura 14.



Figura 14. Pellets. Elaboración propia.

Análisis y discusión de los resultados

Con el objetivo de saber si el alimento preparado a base de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz cumple con las características necesi-

rias para ser suministrado al pez tilapia, se realizaron estudios bromatológicos y microbiológicos en el laboratorio Becar ubicado en la ciudad de Zapopan Jalisco, así mismo se realizó una comparación con el alimento comercial Campi para tilapia, como se muestra en la Tabla 2. Se puede observar que el alimento preparado tiene un mayor contenido de ceniza, fibra cruda, humedad y proteína de consumo animal, esto hace que se prosiga a la experimentación.

Tabla 2. Contenido nutricional. Elaboración propia

Tipo de alimento	Cenizas	ELN	Fibra cruda	Grasa	Humedad	Proteína consume animal	Mohos	levaduras
Alimento comercial	9.74	12.72	13.02	1.66	12.02	23.5	<12	10,500.00
Alimento preparado por el autor	13.94	13.8	15.5	0.16	28.4	28.2	<10	12,000.00

Procedimiento experimental.

Para poder medir si el alimento balanceado suplir las necesidades nutricionales del pez tilapia, se realizó prueba experimental, la cual consistió en realizar una pileta de material con medidas de 1 metro de ancho por 2 metros de largo. Una vez lista la pileta, se realizó una división en esta, haciendo uso de la malla y el tubo.

Se colocó también una manguera la cual fue conectada al motor para brindar oxigenación. Se rellenó la pileta con agua a la mitad de su capacidad. En ambas partes de la pileta se colocaron 5 ejemplares de tilapia en etapa de engorde, todas con 200 g de peso inicial. Durante 4 semanas, 5 tilapias fueron alimentadas con el alimento balanceado preparado (150 g de alimento cada 6 horas), y los 5 restantes con un alimento comercial durante el mismo periodo de tiempo.

Factores de estudio.

Se evaluó el efecto del alimento comercial y el alimento preparado a base de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz, bajo las mismas condiciones de suministro, estudiando las siguientes variables:



Figura 15. Factores de estudio

Registros de crecimiento de tilapia alimentada con alimento preparado

Tabla 3. Semana 1 registro de crecimiento. Autoría propia

Semana 1			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	206 g	20.2 cm	17.5 cm
Tilapia 2	210 gr	20.6 cm	17.3cm
Tilapia 3	208 g	19.9 cm	17.8 cm

Tabla 4. Semana 2 registro de crecimiento. Autoría propia

Semana 2			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	253 g	21.1cm	18.5 cm
Tilapia 2	258 g	21.9 cm	18.6 cm
Tilapia 3	269 g	21.3 cm	18.9 cm

Tabla 5. Semana 3 registro de crecimiento. Autoría propia

Semana 3			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	280 g	22.9 cm	19 cm
Tilapia 2	285 g	23.1 cm	19.1 cm
Tilapia 3	291 g	23.3 cm	19.3 cm

Tabla 6. Semana 4 registro de crecimiento. Autoría propia

Semana 4			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	332 g	24.5 cm	19.5 cm
Tilapia 2	346 g	24.3 cm	19.7 cm
Tilapia 3	338 g	23.9 cm	19.4 cm

En las Tablas 3, 4, 5, 6 se observa el aumento tanto en peso como longitud y grosor de cada ejemplar, empezando en la semana 2.

Registros de crecimiento de tilapias alimentadas con alimento comercial.

Tabla 7. Semana 1 registro de crecimiento con alimento comercial. Autoría propia

Semana 1			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de alimento: Comercial			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	209 g	20.5 cm	17.5 cm
Tilapia 2	205 g	19.8 cm	17.4 cm
Tilapia 3	212 g	20.2 cm	17.6 cm

Tabla 8. Semana 2 registro de crecimiento con alimento comercial. Autoría propia

Semana 2			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	251 g	21.4 cm	18.2 cm
Tilapia 2	263 g	20.8 cm	18.5 cm
Tilapia 3	254 g	21.5 cm	18.7 cm

Tabla 9. Semana 3 registro de crecimiento con alimento comercial. Autoría propia

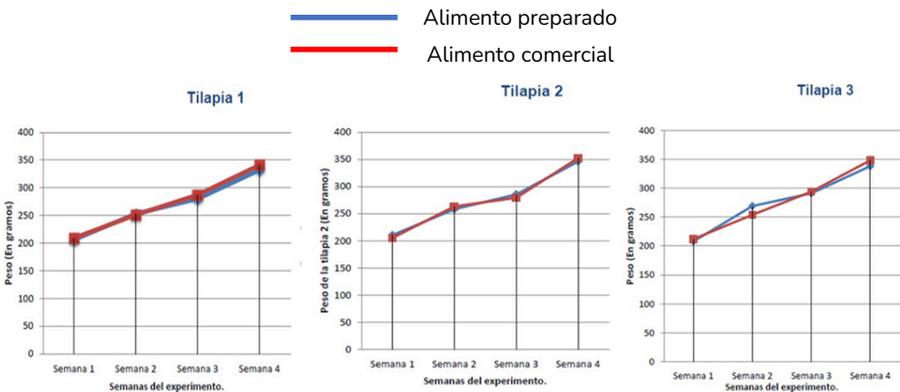
Semana 3			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	287 g	22.4 cm	19.1 cm
Tilapia 2	279 g	23.2 cm	19.1 cm
Tilapia 3	294 g	22.8 cm	19.4 cm

Tabla 10. Semana 3 registro de crecimiento con alimento comercial. Autoría propia

Semana 4			
Registro de peso, longitud y grosor			
Tipo de Alimento: de cáscara de huevo, cáscara de camarón y pericarpio de maíz			
Ejemplares de Tilapia	Peso	Longitud	Grosor
Tilapia 1	341 g	24.1 cm	19.4 cm
Tilapia 2	352 g	23.8 cm	19.5 cm
Tilapia 3	348 g	23.5 cm	19.5 cm

En las Tablas 7, 8, 9, 10, se registraron los pesos de los factores de estudio, con el alimento comercial en las tilapias. seguidamente se procedió a realizar los gráficos de comparación.

Gráficos comparativos del peso de las tilapias

**Figura 16.** Gráficas comparativas del peso de la tilapia

En las gráficas se compara el peso de las tilapias, se observa que hay ligero aumento de peso con el alimento que se elaboró.

Gráficos comparativos de la longitud de las tilapias.

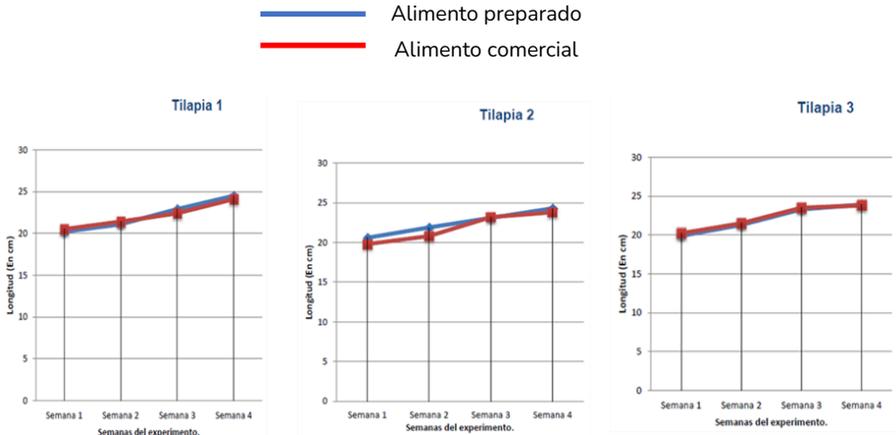


Figura 17. Gráficas comparativas de la longitud de la tilapia

En las gráficas se compara la longitud de las tilapias, se observa que hay ligero aumento en la semana 1 y 2, mientras que en la semana 3 no hay ninguna diferencia. Los cambios en las 3 muestras, durante 4 semanas.

Gráficos comparativos del grosor de las tilapias

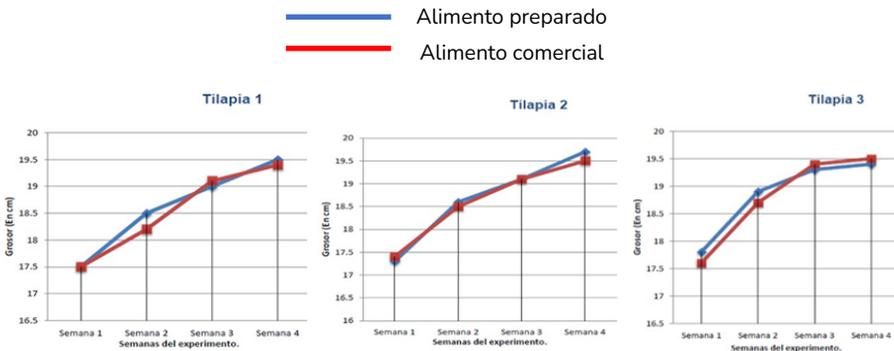


Figura 18. Grafica de grosor de tilapias

Conclusión

En el medio actual en que vivimos es necesario aprovechar los recursos que se consideran “desechos” y darles una segunda oportunidad, reutilizarlos en alternativas que ayuden a mejorar la calidad de vida de las personas o de los animales sin dañar la salud o el medio que nos rodea. En este proyecto se les da un valor agregado a los remanentes de la cáscara de huevo, la cáscara de camarón y el pericarpio de maíz, se aprovechan los nutrientes que dichos ingredientes poseen para aprovecharlos en un alimento balanceado para pez tilapia, en etapa de engorde, el cual es mucho más económico que los que actualmente se encuentran en el mercado, dando como consecuencia que los costos de crianza de dicho pez disminuyan significativamente.

Referencias bibliográficas

- Albarracín, V. G. (7 de julio de 2010). engormix. <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/soya-principal-fuente-proteina-t28541.htm>
- Avdalov, N. N. (2014). Beneficios del consumo de pescado. DINARA – INFOPECA. pg.12.
- Brondsted, P. N. (2011). Advances in wind turbine blade design and materials. Philadelphia: WOODHEAD PUBLISHING.
- Burton, T. S. (2001). WIND ENERGY HANDBOOK. England: WILEY.
- Carlos, F. (2016). Fundación fedna. Obtenido de Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/melazas-deca%C3%B1a
- Carlos, J. (23 de julio de 2015). Lavet. Obtenido de Sales minerales para ganado: La importancia de la suplementación mineral: : <http://www.lavet.com.mx/salesminerales-para-ganado-la-importancia-de-la-suplementacion-mineral/>
- Carmona, L. (2004). Evaluación técnica del proceso de extracción y cuantificación de diferentes compuestos (pigmentos carotenoides; proteínas; quitina/ quitosano; D-glucosamina) a partir del cefalotórax de camarón. Trabajo final de graduación para obtener el grado de Licenc. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Castañeda Castillo, N. (2021). DIAGNÓSTICO DEL ACEITE VEGETAL RESIDUAL GENERADO EN COMERCIOS DE ALIMENTOS EN TEPOZTLÁN, MORELOS. Cuernavaca, Morelos: UAEM.

- Cuevas, M. M. (21 de febrero de 2012). El productor. Obtenido de Una alternativa para temporadas de escasez de pastos: cáscara de naranja, opción alimentaria para ganado.: : <https://elproductor.com/articulos-tecnicos/articulos-tecnicos-salud-animal/una-alternativa-para-temporadasde-escasez-de-pastos-cascara-de-naranja-opcion-alimentaria-para-ganado/>
- Dickerson, & G. (2003). Specialty Corns". College of Agriculture and Home Economics. Las Cruces: New Mexico State University.
- Espinoza H., A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. Revista de Economía Institucional, 109-134.
- Garcia et al. (2003). Defensas naturales en el grano de maíz al ataque de. Revista de Educación Bioquímica, 22(3), 138 -145.
- Gomez, R. (2017). forrajes Gutierrez. <http://www.forrajesgutierrez.com>
- Gonzalez, U. (2009). El maíz y los productos de su industrialización. Mexico: Trillas.
- Gutiérrez et al. (2007). Mecanismos y bases de la resistencia a insectos. . CerealChemical, 84, 186-194.
- Hansen, M. (2008). Aerodynamics of Wind Turbines. London: EARTHSCAN.
- INATEC. (2016, p 20). NUTRICION ANIMAL.
- INATEC, M. D. (2016, p 10). NUTRICION ANIMAL.
- NP, I. N. (21 de MARZO de 2018). ACUACULTURA DE TILAPIA. <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tilapia>
- INTAGRI. (2021). REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN BOVINOS NUM.104. ARTICULOS TECNICOS ME INTAGRI: <https://www.intagri.com/articulos/ganaderia/requerimientos-nutricionales-en-bovinos?p=registro>
- Jadán S., M., Morejón F., M., García F., S., Burgos B., G., & García V., G. (2023). Obtención de Biodiésel a partir de la transesterificación de aceite vegetal residual. infoANALÍTICA, 31-51.
- Jones, J. E. (2002). Extracción, separación, identificación y cuantificación de los pigmentos carotenoides del exoesqueleto de diferentes especies de camarón del litoral pacífico de Costa Rica.Tesis sometida a la consideración del programa de Estudios de Posgrado en Química p. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Livas, C. F. (12 de enero de 2015). Estrategias de alimentación para ganado bovino en las regiones tropicales. <https://www.ganaderia.com/destacado/Estrategias-de-alimentaci%C3%B3n-para-ganado-bovino-en-las-regiones-tropicales>
- MANWELL, J. M. (2009). WIND ENERGY EXPLAINED. United Kingdom: WILEY.
- Ospina, J. (2001). Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos. BOGOTA: Universidad Nacional de Colombia.
- Salas-Durán, C. C.-V.-S. (2015). La harina de cefalotórax de camarón en raciones para gallinas ponedoras. Agronomía Mesoamericana, 26(2), 333-343.

- Salgado, J. (2018). Elaboración de jabones con aceite reciclado. Foro de Estudios sobre Guerrero, 699-703.
- Schlavo, B. C. (1989). Alternativas para el desarrollo ganadero en Tabasco. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del agua).
- Sheinbaum, C., Balam, M., Robles, G., Lelo de Larrea, S., & Mendoza, R. (2015). Biodiesel from waste cooking oil in Mexico City. *Waste Management & Research*, 730-739.
- Valdes, F. J. (2009). La cáscara del huevo: ¿desecho o valor agregado para la salud humana y la producción avícola? Una experiencia cubana. *Rev Cubana Aliment Nut*, 19, 84-102.
- Villabona Ortiz, Á., Iriarte Pico, R., & Tejada Tovar, C. (2017). Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos grasos de procesos de fritura. *Teknos Revista Científica*, 21-29.
- Weigel, J. L. (2004). Los coproductos alimenticios derivados del proceso de la molienda húmeda del maíz. Washington D.C.: Iowa Corn.

CAPÍTULO 16

APLICACIONES DE *APIUM GRAVEOLENS* L. (APIO): PANORAMA GENEREAL EN DÉCADAS

David Gilberto García-Hernández¹; Michel Stéphane Heya²,
David Mizaél Ortíz-Martínez³, Joel Horacio Elizondo-Luévano⁴,
Edelia Claudina Villarreal-Ibarra⁵

Resumen

Apium graveolens L. (apio) ha sido utilizado en la medicina tradicional en muchas culturas y como parte de la dieta general. El objetivo de este trabajo es aportar una revisión de las aplicaciones de esta planta en un período de 2 décadas que nos servirá para compararlo con los avances de la última década antes de la pandemia. Se realizó la revisión bibliográfica en los principales motores de búsqueda científicos EBSCO, SciFinder, PubMed, Google Scholar, entre otros, para realizar una revisión desde 1990 hasta la 2013, utilizando el idioma inglés, y palabras clave (MeSH) como: “*Apium graveolens* + biological activity”, “*Celery* + industrial implications”, “*Celery* + biological activity”. Se ha implementado en la industria farmacéutica, alimentaria, química y biotecnológica por su gran contenido de aceites esenciales, lo que lo hace un candidato para el desarrollo e innovación de muchos productos. Entre sus usos se destacan: como afrodisiaco, antihelmíntico, carminativo, emenagogo, antiespasmódico, laxante, sedante, estimulante, citotóxico y diurético. Estudios recientes nos muestran que posee propiedades anticarcinogénicas, antifúngicas, antibacterianas, antihipertensivas e hipolipémicas.

Palabras claves. *Apio, Apium graveolens, actividad biológica, Aceites esenciales*

¹ David Gilberto García Hernández, Profesor Asociado Tiempo Completo, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. Correspondencia: david.garciahrz@uanl.edu.mx.

² Michelle Stéphane Heya, Profesor de Asignatura, Facultad de Salud Pública y Nutrición, UANL.

³ David Mizaél Ortíz Martínez, Profesor Asociado Tiempo Completo, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL.

⁴ Joel Horacio Elizondo Luévano, Profesor de Asignatura, Facultad de Agronomía, UANL.

⁵ Edelia Claudina Villarreal Ibarra, Profesor Titular Tiempo Completo, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Popular de la Chontalpa.

Introducción

La medicina tradicional como alternativa de salud nos ha cubierto mucho en el tratamiento de diversas enfermedades y más aún en el desarrollo de nuevas fuentes de fármacos, pero sus aplicaciones industriales nos han dado el desarrollo de nuevos productos.

Durante las últimas dos décadas, se ha observado un creciente interés en las diversas aplicaciones de *Apium graveolens* L. (Figura1), comúnmente conocido como apio. Este interés ha sido impulsado por su riqueza nutricional y sus propiedades medicinales. En el presente capítulo, se explorará un panorama general de las diversas áreas en las que el apio ha encontrado aplicación, con reconocidos beneficios para la salud como un vegetal de consumo común, sino también por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y diuréticas. Además, su composición rica en nutrientes esenciales, como vitaminas, minerales y compuestos bioactivos especialmente aceites esenciales, lo que lo convierte en un ingrediente relevante en la dieta y en la medicina tradicional. Entre sus aplicaciones destacadas se encuentran su uso en la gastronomía, donde se emplea en una amplia gama de platos por su sabor distintivo y su capacidad para realzar el perfil de sabores. Además, se ha investigado su potencial en la prevención y tratamiento de diversas enfermedades, incluyendo su papel en la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares, la regulación de la presión arterial y su impacto positivo en la salud digestiva (Sowbhagya, 2014).

El estudio de las aplicaciones del apio ha experimentado un avance significativo en áreas como la nutrición, la medicina alternativa y la investigación farmacéutica. A medida que se profundiza en las propiedades y beneficios de este vegetal, se abren nuevas oportunidades para su utilización en campos diversos, desde la gastronomía hasta la salud. En resumen, las investigaciones y aplicaciones de *A. graveolens* L. han mostrado un amplio potencial durante las últimas dos décadas, revelando un panorama prometedor en la nutrición humana como en la medicina, lo que subraya su importancia como recurso multifacético en diversas áreas.

Metodología

Se realizó la revisión bibliográfica en los principales motores de búsqueda

científicos EBSCO, SciFinder, PubMed, Google Scholar, entre otros, para realizar una revisión desde 1990 hasta la 2013, utilizando el idioma inglés, y palabras clave como: “*Apium graveolens* + biological activity”, “*Celery* + industrial implications”, “*Celery* + biological activity”, esto con el fin de resumir los avances en dos décadas.

Análisis y discusión de resultados

El reto en la investigación de la Química de Productos Naturales realizada en diversos lugares del mundo será precisamente, el de evaluar y aislar de la planta o extractos las moléculas biológicamente activas. No sólo el campo de la medicina se beneficia con estos estudios ya que las plantas acumulan sustancias o metabolitos secundarios que pueden ser extraídas y utilizadas como material para aplicaciones científicas, tecnológicas y comerciales, especialmente aquellos compuestos con actividad farmacológica considerados de importancia biológica e industrial (OMS, Medicina Tradicional, 2016).

En este capítulo se presenta una revisión de *Apium graveolens* una planta reconocida por su uso alimenticio.

Apium graveolens

Figura 1



Descripción botánica de *Apium graveolens* e imagen.

Nombre común: Apio

Descripción botánica

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
Superdivisión	<i>Spermatophyta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Rosidae</i>
Orden	<i>Apiales</i>
Familia	<i>Apiaceae</i>
Género	<i>Apium L.</i>
Especie	<i>Apium graveolens L.</i>

Las semillas de apio son ricas en aceites esenciales de las cuales se han aislado 36 moléculas (Tabla 1), entre las principales se encuentran: limoneno, β -pineno, senkyunolido, β -terpineno y mirceno (Wassenhove , Dirinck , & Vulste, 1990).

Tabla 1. Contenido de compuestos del aceite esencial de semilla de apio.

Compuesto	Concentración expresada en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de material fresco	Compuesto	Concentración expresada en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de material fresco
3-metilbutanal	392.88	γ -terpineno	10362
2-metilbutanal	182.63	n-pentilciclohexadieno	234
2-metilhexano	111.13	terpinen-4-ol	39
Piridina	1239	β -cariofileno	633.75
Hexanal	255.63	α - humuleno	90.5
Furfural	471.63	β -selineno	434.25
3-metil-4-etilhexano	629.88	α -selineno	50.25
α -tujeno	72.5	butilhexahidrophtalido	70
α -pineno	803	Z-butilidenphtalido	143.25
Campeno	72.5	Cnidilido	29
Sabineno	271.5	Z-ligustilido	356.75
β -pineno	3271.75	Butilphtalido	734.5
Mirceno	888	<i>trans</i> - neocnidilido	1050.25
p-cimeno	454.5	cis-neocnidilido	232.5

Continuación de Tabla 1...

Limono	30643.25	senkyunolido	3065.25
ocimeno-x	4382.5	E-liguistilido	49
ocimeno-y	122		

ε-terpenos	52591.25
ε-phtalidos	5711

Los resultados son un promedio de los estudios realizados por Van Wassenhove et al., 1990 y Tang et al., 1990.

En cuanto a los usos y aplicaciones de actualidad se presentan en la Tabla 2, donde se resume la investigación científica derivada del estudio de *A. graveolens*.

Tabla 2. Actividad biológica reportada y metabolitos responsables.

Actividad biológica	Metabolito(s) Responsables	Referencia
Inhibición enzimática		
Ciclooxigenasa, Topoisomerasa I y II	<ul style="list-style-type: none"> • Sedanolido • Senkyunolido-N • Senkyunolido-J • 3-hidroximetil-6-metoxi-2,3-dihidro-1H-indol-2-ol • 7-[3-(3,4-dihidroxi-4-hidroximetil-tetrahidro-furan-2-iloxi)-4-5-dihidroxi-6-hidroximetil-tetrahidropiran-2-iloxi]-5-hidroxi-2-(4hidroxi-3-metoxi-fenil)-cromen-4-ona 	(Momin & Nair, 2002)
Enzima convertidora de angiotensina (ACE)	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto metanólico 	(Umamaheswari et al., 2012)

Continuación de Tabla 2...

Inhibidor de la Xantina Oxidasa	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto etanólico 	(Dyah Darusman, & Trivadila, 2012)
Abortiva		
Aborto	<ul style="list-style-type: none"> • Formulado herbal 	(Hamta, 2004)
Antiproliferativo		
Línea celular BGC-823 (cáncer gástrico humano)	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto metanólico 	(Gao, 2011)
Hepatoprotectora		
Hepatoprotectora Wistar ratas	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto metanólico 	(Singh, 1995) (Sultana et al., 2005)
Hepatoprotectora Wistar ratas	<ul style="list-style-type: none"> • Formulación Poliherbal 	(Arsul & Mayee, 2011)
Citoprotectora		
Ratas albinas Wistar	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto etanólico 	(Syed, 2010)
Industria Alimentaria		
Curador de carnes	<ul style="list-style-type: none"> • Planta pulverizada 	(Sebranek, 2012)
Bactericida		
<i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>S. typhy</i> , <i>E. aerogene</i> , <i>Proteus vulgaris</i> .	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites esenciales • Extracto acuoso de la parte aérea del apio 	(Rani, 2004) (Edziri et al., 2012) (Sahadeo & Vilas, 2011) (Baananoua et al., 2013)

Continuación de Tabla 2...

<i>Helicobacter pilory</i> , Aislados clínicos de <i>Salmonella typhi</i> B-330.	<ul style="list-style-type: none"> • Extractos metanólicos y etanólicos 	(Rani & Khullar, 2004) (Zhou et al., 2009)
Larvícida y Mosquitocida		
Géneros: <i>Aedes</i> y <i>Anopheles</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aceite esencial de semilla de apio • Extractos etanólicos y metanólicos • Compuestos aislados de extractos hexánicos de la semilla de apio (ptalidos) 	Warikoo, Wahab & Kumar, 2011) (Choochote, 2001) (Momin & Nair, 2001) (Shaalan & Canyon, 2008) (Nagella, 2012) (Pitasawat et al., 2007)
<i>Lucilia sericata</i> (Diptera: Calliphoridae)	<ul style="list-style-type: none"> • Aceite esencial de la semilla de apio 	(Khater, 2009)
Repelente		
<i>Aedes</i> spp, <i>Armigeres</i> spp, <i>Culex</i> spp y <i>Mansonia</i> spp	<ul style="list-style-type: none"> • Semillas de apio 	(Tuetun et al., 2009)
Fungicida		
<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp <i>vasinfectum</i> , <i>Alternaria alternata</i> y <i>Rhizoctonia solani</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto etéreo de semilla 	(Liu et al., 2012)
<i>Uromyces appendiculatus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto Acuoso 	(Arslan, Ilhan, kharabulum, 2009).
Géneros <i>Candida</i> , <i>Trichophyton</i> , <i>Microsporium</i> , <i>Epidermophyton</i> y <i>Aspergillus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sedanólido • Neocnidilio • Neofitadio 	(Moronjiu et al., 2013)
Antioxidante		
Radical ABTS·	<ul style="list-style-type: none"> • Péptidos 	(Yili, 2012)

Continuación de Tabla 2...

<i>Papel protector a la actividad de superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidada (GPx), Catalasa (CAT), Glutatión-S-transferasa (GST) en hígado de ratas Wistar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Flavonoides 	Kao et al., 2012) (Bor, Chen , & Yen, 2006)
<i>Radicales DPPH y ABTS</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ácido caféico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico, apigenina, luteolina y kamferol. 	(Yao et al., 2010)
<i>Actividad anti y pro oxidante</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Jugo de Apio 	Papetti, Daglia, & Gazzani, 2002).
Antiinflamatoria		
<i>En ratones</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extractos acuoso y hexánico de semillas 	(Popov , Ovodova , Golovchenko, & Popova, 2009) (Mencherin et al., 2007) (Ramezani et al., 2009) (Powanda & Rainsford, 2011)
<i>Cistitis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Semilla 	(Abascal & Yarnell, 2008)
Anti trastornos lipémicos		
<i>Estimulante del nivel de HDL e inhibidor del incremento del colesterol total y triglicéridos</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fracciones del extracto etanólico de semilla 	(Iyer & Patil, 2011) (Mansi et al., 2009)
Anti Prostaglandina		
<i>Inhibición en la producción de PGE₂</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción supercrítica de semilla 	(Whitehouse et al., 2001)
Hipoglicémiante		
<i>Similar a la insulina</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracto acuoso parte aérea 	(Broadhurst, 2000)

Nota: La revisión bibliográfica se realizó mediante los motores de búsqueda siguientes: SciFinder, PubMed y EBSCO.

Se destaca su actividad enzimática, al inhibir la acción de una enzima para evitar el paso del sustrato al producto, en muchas enfermedades este bloqueo es el fundamento de los tratamientos farmacológicos empleados a nivel mundial. Momin & Nair (2002), aislaron de la semilla de apio compuestos con actividad inhibitoria de ciclooxigenasa tales como: sedanolido, senkyunolido-N, senkyunolido-J, 3-hidroximetil-6-metoxi-2,3-dihidro-1H-indol-2-ol, 7-[3-(3,4-dihidroxi-4-hidroximetil-tetrahidro-furan-2-iloxi)-4-5-dihidroxi-6-hidroximetil-tetrahidropiran-2-iloxi]-5-hidroxi-2-(4hidroxi-3-metoxi-fenil)-cromen-4-ona a 250 µg/ml, éste último compuesto con una actividad antioxidante (oxidación de liposoma) de 250 µg/ml. Por otro lado, el compuesto sedanolido presentó actividad inhibitoria de la topoisomerasa I a 100 µg/ml; los compuestos senkyunolido-N y senkyunolido-J a concentraciones de 200 µg/ml poseen actividad inhibitoria de la topoisomerasa II; también se reportan estudios con actividad inhibitoria sobre la enzima convertidora de angiotensina (ACE) del extracto de metanólico de semilla de apio ($IC_{50} = 666.26 \pm 1.32 \mu\text{g/ml}$) (Umamaheswari et al., 2012). Por otra parte, la capacidad abortiva de cualquier planta tiene un impacto en los animales que la consumen y el ser humano es uno de ellos, esto es la pérdida de la gestación en un momento en el que no es viable para el feto o embrión desarrollarse fuera del útero. Madari y Jacobs (2004), reportan actividad abortiva de las semillas de *A. graveolens* en un formulado de plantas utilizado en la medicina tradicional Persa.

La actividad antitumoral recibe particular atención ya que puede detener y/o inhibir el crecimiento o propagación de las células cancerígenas. Se ha demostrado el efecto anti-proliferativo en la línea celular BGC-823 (cáncer gástrico humano) del extracto de semillas de apio por el método de extracción supercrítica (Gao et al., 2011), y actividad hepatoprotectora en ratas Wistar de los extractos metanólicos de semillas de apio mostraron un efecto antihepatotóxico (Sultana et al., 2005; Singh & Handa, 1995), además formulaciones poliherbales con familias como: Andrographolide, Apiaceae (Umbelliferae), Berberidaceae, entre otras poseen actividad hepatoprotectora (Arsul, Wagh, & Maye, 2011).

Aquellas moléculas que protegen la mucosa del tracto gastro-intestinal se les llama citoprotectores ya sea del ataque de los H^+ o de las enzimas digestivas. Al-Howiriny y colaboradores (2010), demostraron que el extracto etanólico de la parte aérea de la planta de apio mostró una alta actividad citoprotectora, antiúlcera gástrica y antisecretoria en dosis de 250 y 500 mg/Kg de peso en ratas albinas Wistar. El uso de antibióticos para combatir agentes bacterianos es cada vez más difícil ya que los medicamentos llamados de patente por muchos años se han utilizado y han dejado de ser sensibles a muchos microorganismos, dentro de los componentes de las plantas tenemos metabolitos secundarios que poseen dicha actividad, diversas investigaciones se han referido a que los aceites esenciales y el extracto acuoso de la parte aérea del apio poseen actividad bactericida contra especies de *Escherichia coli*.

Pseudomonas aeruginosa, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *Streptococcus pyogenes*, *S. typhi*, *E. aerogene*, *Proteus vulgaris*, así como también los extractos metanólicos y etanólicos son activos contra *Helicobacter pylori*, Aislados clínicos de *Salmonella typhi* B-330 (Baananoua et al., 2013; Rani & Kullar, 2014; Sahadeo & Kamble, 2011; Zhou et al., 2009; Edziri et al., 2018). Los géneros de importancia entomológica como *Aedes* y *Anopheles* que son vectores transmisores de enfermedades de importancia clínica como el paludismo (*Plasmodium spp*) y el dengue (*Flaviviridae*) han sido estudiados para su control biológico, así las investigaciones sobre la interrupción de su ciclo sobre la oviposición y efecto larvicida han sido reportados utilizando el aceite esencial de semilla de apio, extractos etanólicos y metanólicos y compuestos aislados de extractos hexánicos de la semilla de apio (ptalidos) (Warikoo, Wahab & Kumar, 2011; Choochote et al., 2001; Shaalan & Canyon, 2008; Nagella et al., 2012; Momin & Nair, 2001; Momin, Ramsewak, & Nair, 2000; Pitasawat et al., 2007). Otro género de importancia por su participación en la transmisión de enfermedades por micobacterias y por causar miasis es *Lucilia sericata* (Diptera: *Calliphoridae*) en su estadio larvario III, se estudió el efecto insecticida del aceite esencial de la semilla de apio, así como también el rango de pupación y la emergencia de adultos. Otra aplicación de alta importancia es la actividad repelente contra vectores de los géneros *Aedes spp*, *Armigeres spp*, *Culex spp* y *Mansonia spp*. (Tuetun, et al., 2004).

Existen múltiples géneros de hongos que son considerados fitopatógenos y que tienen un alto impacto en la economía agrícola, tales como *Fusarium oxysporum* sp *vasinfectum*, *Alternariaalternata* y *Rhizoctonia solani*, los cuales han sido considerados en estudios inhibitorios de extracto de semillas de apio con éter de petróleo (Liu et al., 2012). Existe también el estudio sobre el extracto acuoso del apio en la inhibición de *Uromyces appendiculatus* (roya del frijol) (Arslan, Ilhan, & Karabulut, 2009). En cuestión clínica, la extracción supercrítica con CO₂ y la hidrodestilación han sido utilizadas para el aislamiento de compuestos con actividad antifúngica de la semilla de apio, compuestos como el sedanólido, neocnidilio y neofitadieo han mostrado actividad contra los géneros *Candida*, *Trichophyton*, *Microsporium*, *Epidermophyton* y *Aspergillus* (Baananoua et al., 2013).

Los compuestos con capacidad antioxidante son de los más importantes ya que tienen la propiedad de captarlos radicales libres que se generan debido al estrés oxidativo, se han aislado péptidos de la semilla del apio con esta actividad frente al radical ABTS (Yili et al., 2012); por otra parte, el extracto metanólico de la parte aérea ha mostrado gran capacidad antioxidante ante el radical DPPH debido al alto contenido de ácidos fenólicos y flavonoides (Pandey et al., 2012). La extracción de flavonoides aislados del apio han mostrado también un papel protector a la actividad de superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidada (GPx), Catalasa (CAT), Glutatión-S-transferasa (GST) en hígado de ratas Wistar (Born et al., 2006; Cao et al., 2012) del extracto etanólico acidificado de la parte aérea del apio se aislaron compuestos con capacidad antioxidante contra los radicales DPPH y ABTS, los compuestos fueron identificados como: ácido caféico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico, apigenina, luteolina y kamferol (Yao et al., 2010). Existen reportes donde el jugo de apio a diferentes temperaturas de extracción 2, 25 y 102°C muestran actividad anti y pro oxidante (Gazzani, Papetti, & Massol, 1998). La inflamación es una respuesta ante un agente extraño en nuestro cuerpo como el lipopolisacárido presente en la pared celular de bacterias, además surge de la estimulación debido a un traumatismo o por un desorden autoinmune, por lo cual, la búsqueda de moléculas que inhiban la secreción de moléculas pro-inflamatorias son blanco importante para el tratamiento y control de dichas condiciones o enfermedades. La actividad antiinflamatoria de extracto de semillas de apio y sus fracciones mostraron ser efectivas a dosis de 5000 mg/kg por día en ratones, también el extracto acuoso y hexánico de semillas

presentan efectos antiinflamatorios. Se han obtenido también un polisacárido péctico llamado apiuman del extracto acuoso con oxalato de amonio que muestra una alta capacidad antiinflamatoria (Ramezani et al., 2009; Ovodova et al., 2009; Mencherini et al., 2007). Las enfermedades relacionadas con el transporte de grasas y su metabolismo implican a las lipoproteínas de transporte, así mismo estas enfermedades son causantes de aterosclerosis y de problemas cardiovasculares como los infartos al miocardio. Se han evaluado las fracciones del extracto etanólico de semilla de apio en dosis de 200 y 400 mg/kg en ratas estimulando el nivel de HDL y la inhibición del incremento del colesterol total y triglicéridos, por otro lado, el extracto etanólico en dosis de 213 y 425 mg/kg por 60 días desarrolló un decremento significativo en los niveles de colesterol, triglicéridos, LDL-c y un incremento en HDL (Iyer & Patil, 2011; Mansi et al., 2009).

Entre otros efectos el extracto alcohólico de semilla de apio, así como su extracción supercrítica muestran un efecto inhibitorio en la producción de PGE₂ (Whitehouse et al., 2004). Además, se ha utilizado en el tratamiento de la Cistitis (Abascal & Yarnell, 2008), así como el en el tratamiento de la enfermedad de la gota como inhibidor de la Xantina Oxidasa (Iswantini et al., 2012); como una actividad coadyuvante de la insulina (Broadhurst et al., 2000).

Entre otros efectos, la semilla de apio en extracción supercrítica muestra un efecto inhibitorio en la producción de PGE₂ (Whitehouse et al., 2001); el extracto etanólico se emplea en el tratamiento de la Cistitis (Abascal & Yarnell, 2008) y en el tratamiento de la enfermedad de la gota como inhibidor de la xantina oxidasa (Iswantini et al., 2012); como una actividad coadyuvante de la insulina (Broadhurst et al., 2000). Esta especie representa una nueva alternativa en enfermedades tropicales para el control de vectores de Arbovirus, en menor grado vectores del tipo *A. albopictu* y el dengue que se transmite por mosquitos hembra principalmente de la especie *Aedes aegyptii*, se estima una producción de 390 millones de infecciones por dengue cada año (intervalo creíble del 95 %: 284 a 528 millones), de los cuales 96 millones (67 a 136 millones) se manifiestan clínicamente (OMS, 2015). Sin embargo, se ha detectado que el número real de casos de dengue no es notificado y muchos casos están mal clasificados.

Conclusión

Se confirma la importancia de *A. graveolens* (apio) como alimento por ser una verdadera fuente con nuevos usos y aplicaciones que las recientes investigaciones han demostrado para esta planta. La presencia de compuestos de naturaleza no polar tales como los terpenos, han tenido un alto impacto, debido a que la mayoría de las moléculas biológicamente activas del apio son derivados de ellos (Ptálicos), dentro de las actividades que se muestran destacan la bactericida, fungicida, mosquitocida principalmente. Por lo tanto, el estudio extensivo de los componentes del apio se incremento indudablemente en los últimos años, dado que se ha demostrado la actividad de las moléculas descritas o se han aislado nuevas con un prometedor potencial de actividad biológica.

Referencias bibliográficas

- Abascal, K. Y., Yarnel, E. (2008). Botanical Medicine for Cystitis. *Alternative & Complementary Therapies*, 69-77.
- Mohan, M., Vijayakumar, M., Rastogi, S., Kumar, A. (2012). Phenolic content and antioxidant properties of selected indian spices of Apiaceae. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 246-256.
- Al-Howiriny, T., Alsheikh, A., Alqasoumi, S., Al-Yahya, M., ElTahir, K., & Rafatullah, S. (2010). Gastric antiulcer, antisecretory and cytoprotective properties of celery (*Apium graveolens*) in rats. *Pharmaceutical Biology*, 786-793.
- Arslan, U., Ilhan, K., & Karabulut, O. (2009). Antifungal activity of aqueous extracts of spices against bean rust (*Uromyces appendiculatus*). *Allelopathy Journal*, 207-13.
- Arsul, V., Wagh, S., & Maye, R. (2011). Hepatoprotective activity of livergen, a polyherbal formulation against carbon tetrachloride induced hepatotoxicity in rats. *International Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 228-231.
- Baananou, S., Bouftira, I., Mahmoud, A., Boukef, K., Marongiu, B., & Boughattas, N. A. (2013). Antiulcerogenic and antibacterial activities of *Apium graveolens* essential oil and extract. *Natural product research*, 27(12), 1075-1083.
- Bor, J. Y., Chen, H. Y., & Yen, G. C. (2006). Evaluation of antioxidant activity and inhibitory effect on nitric oxide production of some common vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(5), 1680-1686.

- Broadhurst, C. L., Polansky, M. M., & Anderson, R. A. (2000). Insulin-like biological activity of culinary and medicinal plant aqueous extracts in vitro. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(3), 849–852.
- Cao, J., Zhang, X., Wang, Q., Jia, L., Zhang, Y., & Zhao, X. (2012). Influence of flavonoid extracts from celery on oxidative stress induced by dichlorvos in rats. *Human & experimental toxicology*, 31(6), 617–625. <https://doi.org/10.1177/0960327111426585>
- Choochote, W., Tuetun, B., Kanjanapothi, D., Rattanachanpichai, E., Chaithong, U., Chaiwong, P., Jitpakdi, A., Tippawangkosol, P., Riyong, D., & Pitasawat, B. (2004). Potential of crude seed extract of celery, *Apium graveolens* L., against the mosquito *Aedes aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae). *Journal of vector ecology : journal of the Society for Vector Ecology*, 29(2), 340–346.
- Dyah, I., Darusman, L., & Trivadila, R. (2012). Inhibition Kinetic of *Apium graveolens* L. Ethanol Extract and its Fraction on the Activity of Xanthine Oxidase and its Active Compound. *Journal of Biological Sciences*, 51-56.
- Edziri, H., Ammar, S., Souad, L., Mahjoub, M., Mastouri, M., Aouni, M., & Mighri, Z. (2018). In vitro evaluation of antimicrobial and antioxidant activities of some Tunisian vegetables. *South African Journal of Botany*, 252-256.
- Gao, L. L., Feng, L., Yao, S. T., Jiao, P., Qin, S. C., Zhang, W., Zhang, Y. B., & Li, F. R. (2011). Molecular mechanisms of celery seed extract induced apoptosis via s phase cell cycle arrest in the BGC-823 human stomach cancer cell line. *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP*, 12(10), 2601–2606.
- Gazzani, G., Papetti, A., & Massol, G. (1998). Anti- and Prooxidant Activity of Water Soluble Components of Some Common Diet Vegetables and the Effect of Thermal Treatment. *J Agric Food Chem*, 4118–22.
- Iyer, D., & Patil, U. K. (2011). Effect of chloroform and aqueous basic fraction of ethanolic extract from *Apium graveolens* L. in experimentally-induced hyperlipidemia in rats. *Journal of complementary & integrative medicine*, 8, /j/jcim.2011.8.issue-1/1553-3840.1529/1553-3840.1529.xml.
- Iswantini, D., Latifah, N., Darusman, K and Trivadila, (2012). Inhibition Kinetic of *Apium graveolens* L. Ethanol Extract and its Fraction on the Activity of Xanthine Oxidase and its Active Compound. *Journal of Biological Sciences*, 12: 51-56.
- Kamal, M. A. (2009). Hypolipidemic effects of seed extract of celery (*Apium graveolens*) in rats. *Pharmacognosy Magazine*, 301-305.
- Khater, H. F., & Khater, D. F. (2009). The insecticidal activity of four medicinal plants against the blowfly *Lucilia sericata* (Diptera: Calliphoridae). *International journal of dermatology*, 48(5), 492–497.

- Liu, T., Liu, F. G., Xie, H. Q., & Mu, Q. (2012). Phytopathogenic fungal inhibitors from celery seeds. *Natural product communications*, 7(7), 889–890.
- Madari, H., & Jacobs, R. S. (2004). An analysis of cytotoxic botanical formulations used in the traditional medicine of ancient Persia as abortifacients. *Journal of natural products*, 67(8), 1204–1210.
- Mansi, K.M., Abushoffa, A.M., Disi, A.M., & Aburjai, T. (2009). Hypolipidemic Effects of Seed Extract of Celery (*Apium graveolens*) in Rats. *Pharmacognosy Magazine*, 5, 301.
- Mencherini, T., Cau, A., Bianco, G., Della Loggia, R., Aquino, R. P., & Autore, G. (2007). An extract of *Apium graveolens* var. dulce leaves: structure of the major constituent, apiin, and its anti-inflammatory properties. *The Journal of pharmacy and pharmacology*, 59(6), 891–897.
- Momin, R. A., & Nair, M. G. (2002). Antioxidant, cyclooxygenase and topoisomerase inhibitory compounds from *Apium graveolens* Linn. seeds. *Phytomedicine: international journal of phytotherapy and phytopharmacology*, 9(4), 312–318.
- Momin, R. A., Ramsewak, R. S., & Nair, M. G. (2000). Bioactive compounds and 1,3-Di[(cis)-9-octadecenoyl]-2-[(cis,cis)-9, 12-octadecadienoyl]glycerol from *Apium graveolens* L. seeds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(9), 3785–3788. <https://doi.org/10.1021/jf991383r>
- Momin, R., & Nair, M. (2001). Mosquitocidal, nematicidal, and antifungal compounds from *Apium graveolens* L. seeds. *J Agric Food Chem*, 142-145.
- Marongiu, B., Piras, A., Porcedda, S., Falconieri, D., Maxia, A., Frau, M. A., Gonçalves, M. J., Cavaleiro, C., & Salgueiro, L. (2013). Isolation of the volatile fraction from *Apium graveolens* L. (Apiaceae) by supercritical carbon dioxide extraction and hydrodistillation: chemical composition and antifungal activity. *Natural product research*, 27(17), 1521–1527.
- Nagella, P., Ahmad, A., Kim, S. J., & Chung, I. M. (2012). Chemical composition, antioxidant activity and larvicidal effects of essential oil from leaves of *Apium graveolens*. *Immunopharmacology and immunotoxicology*, 34(2), 205–209.
- OMS. (2015). Dengue y dengue grave. Obtenido de Nota descriptiva N° 117. (12 de 01 de 2015). <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/es/>
- OMS. (2016). Medicina Tradicional. Obtenido de ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD: http://www.who.int/topics/traditional_medicine/definitions/es/
- Ovodova, R.G., Golovchenko, V.V., Popov, S.V., Popova, G.Y., Paderin, N.M., Shashkov, A.S., Ovodov, Y.S. (2009). Chemical composition and anti-inflammatory activity of pectic polysaccharide isolated from celery stalks. *Food Chem*, 114, 610.
- Ovodov, a. R. (2009.). Chemical composition and anti-inflammatory activity of pectic polysaccharide isolated from celery stalks. *Food Chemistry*, 610-5.

- Pandey, M.M., Vijayakumar, M., Rastogi, S., & Rawat, A.K. (2012). Phenolic Content and Antioxidant Properties of Selected Indian Spices of Apiaceae. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 18, 246 - 256.
- Papetti, A., Daglia, M., & Gazzani, G. (2002). Anti- and pro-oxidant activity of water soluble compounds in *Cichorium intybus* var. *silvestre* (Treviso red chicory). *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 30(4), 939-945.
- Pitasawat, B., Champakaew, D., Choochote, W., Jitpakdi, A., Chaithong, U., Kanjanapothi, D., Chaiyasit, D. (2007). Aromatic plant-derived essential oil: An alternative larvicide for mosquito control. *Fitoterapia.*, 205-210.
- Popov, S., Ovodova, R., Golovchenko, V., & Popova, G. (2009). Chemical composition and anti-inflammatory activity of pectic polysaccharide isolated from celery stalks. *Food Chemistry*, 610-615.
- Powanda, M. C., & Rainsford, K. D. (2011). A toxicological investigation of a celery seed extract having anti-inflammatory activity. *Inflammopharmacology*, 19(4), 227-233.
- Ramezani, M., Nasri, S. & Yassa, N. (2009). Antinociceptive and anti-inflammatory effects of isolated fractions from *Apium graveolens* seeds in mice, *Pharmaceutical Biology*, 47:8, 740-743
- Rani, P., & Khullar, N. (2004). Antimicrobial evaluation of some medicinal plants for their anti-enteric potential against multi-drug resistant *Salmonella typhi*. *Phytotherapy research: PTR*, 18(8), 670-673.
- Sahadeo, D., & Kamble, V. (2011). Antibacterial activity of some essential oils against food borne pathogen and food spoilage bacteria. *International Journal of Pharma & Bio Sciences*, 143-150.
- Sebranek, J. A.-D. (2012). Beyond celery and starter culture: Advances in natural/organic curing processes in the United States. *Meat Science*, 267-27.
- Shaalan, E., & Canyon, D. (2008). Inconsequential Study on Larvicidal Efficacy of Anise and Celery Seed Extracts Indicates that Standards in Bioinsecticide Screening are Necessary. *Current Bioactive Compounds*, 33-35.
- Singh, A., & Handa, S. S. (1995). Hepatoprotective activity of *Apium graveolens* and *Hygrophila auriculata* against paracetamol and thioacetamide intoxication in rats. *Journal of ethnopharmacology*, 49(3), 119-126.
- Sowbhagya, H. B. (2014). Chemistry, Technology, and Nutraceutical Functions of Celery (*Apium graveolens* L.): An Overview. *Food Science and Nutrition*, 389.398.
- Sultana, S., Ahmed, S., Jahangir, T., & Sharma, S. (2005). Inhibitory effect of celery seeds extract on chemically induced hepatocarcinogenesis: modulation of cell proliferation, metabolism and altered hepatic foci development. *Cancer letters*, 221(1), 11-20.

- Syed, A.-H.-Y. (2010). Gastric antiulcer, antisecretory and cytoprotective properties of celery (*Apium graveolens*) in rats. *Pharmaceutical Biology*, 786-793.
- Tang, J. Y.-T. (1990). Free and glycosidically bound volatile compounds in fresh celery (*Apium graveolens* L.). *J. Agric. Food Chem.*, 1937-1940.
- Tuetun, B., Choochote, W., Rattanachanpichai, E., Chaithong, U., Jitpakdi, A., Tippawangkosol, P., Riyong, D., & Pitasawat, B. (2004). Mosquito repellency of the seeds of celery (*Apium graveolens* L.). *Annals of tropical medicine and parasitology*, 98(4), 407-417.
- Tuetun, B., Choochote, W., Pongpaibul, Y., Junkum, A., Kanjanapothi, D., Chaithong, U., Jitpakdi, A., Riyong, D., Wannasan, A., & Pitasawat, B. (2009). Field evaluation of G10, a celery (*Apium graveolens*)-based topical repellent, against mosquitoes (Diptera: Culicidae) in Chiang Mai province, northern Thailand. *Parasitology research*, 104(3), 515-521. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-1224-9>
- Umamaheswari, M., Puthenpurackal, M., Asokkumar, K., Sivashanmugam, T., Subhad, V., & Jagannath, P. (2012). In vitro angiotensin converting enzyme inhibitory and antioxidant activities of seed extract of *Apium graveolens* Linn. *Annals of Biological Research*, 1274-1278.
- Warikoo, R., Wahab, N., & Kumar, S. (2011). Oviposition-altering and ovicidal potentials of five essential oils against female adults of the dengue vector, *Aedes aegypti* L. *Parasitology research*, 109(4), 1125-1131.
- Wassenhove, F., Dirinck, P., Vulsteke, G., & Schamp, N. (1990). Aromatic Volatile Composition of Celery and Celeriac Cultivars. *HortScience HortSci*, 25(5), 556-559.
- Whitehouse MW BD, Clarke ML, Rainsford KD. . NSAID gastropathy: prevention by celery seed extracts in disease-stressed rats. . *Inflammopharmacology*. 2001. ;9((1/2)):201-9.
- Yang, Y. W. (2010). Phenolic Composition and Antioxidant Activities of 11 Celery Cultivars. *Journal of Food Science*, 9-13.
- Yao, Y., Sang, W., Zhou, M., & Ren, G. (2010). Phenolic composition and antioxidant activities of 11 celery cultivars. *Journal of food science*, 75(1), C9-C13.
- Yili, A. M. (2012). Isolation of two antioxidant peptides from seeds of *Apium graveolens* indigenous to China. *Chemistry of Natural Compounds*, 719-720.
- Zhou, Y., Taylor, B., Smith, T. J., Liu, Z. P., Clench, M., Davies, N. W., & Rainsford, K. D. (2009). A novel compound from celery seed with a bactericidal effect against *Helicobacter pylori*. *The Journal of pharmacy and pharmacology*, 61(8), 1067-1077.

CAPÍTULO 17

CARACTERIZACIÓN DE FIBRA DE PLÁTANO PERA (*MUSA PARADISIACA*) DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES

Heidy Janeth Trujillo Acosta¹, Gloria Ivette Bolio López²,
Lucien Veleva³, Miguel Ángel Velázquez Carmona², Manuel
Mateo Hernández Villegas², Damianys Almenares López²

Resumen

La relevancia de los nanocristales actualmente provenientes de recursos verdes (residuos agroindustriales), entre otros, contribuyen a la economía circular, buscando consolidar a las proyecciones, encausamiento y manufactura de bionanocompuestos, en las tecnologías de la información, biomédicas, farmacéuticas, alimenticia y en la producción de polímeros. Por otra parte, Tabasco es el segundo productor a nivel nacional del cultivo de plátano, del cual se aprovecha solo el 30 % de su biomasa, y un 70 % son residuos de la planta. El objetivo fue de este trabajo, fue caracterizar el pseudotallo de plátano antes de procesar, con la finalidad de determinar su calidad para la obtención de nanocristales. La metodología consistió en la colecta, lavado, seccionado a 5 cm, secado y triturado del material vegetal, este se almacenó en

¹ Ing. Heidy Janeth Trujillo Acosta. Estudiante de Posgrado Maestría en Química Sustentable. Universidad Popular de la Chontalpa Col. Paso y playa km 2 s/n Carretera Cárdenas-Huimanguillo, Tabasco, México.

C.P. 86529. heidy27trujillo@gmail.com (autor correspondiente)

² Dra. Gloria Ivette Bolio-López, Dr. Miguel Ángel Velázquez Carmona, Dr. Manuel Mateo Hernández Villegas, Dra. Damianys Almenares López, Profesores-Investigadores y miembro del Cuerpo Académico Química Verde y Desarrollo Sostenible; Universidad Popular de la Chontalpa Col. Paso y Playa km 2 s/n Carretera Cárdenas – Huimanguillo, Tabasco, México. C.P. 86529

³ Dra. Lucien Veleva. Investigador de Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV)- Unidad Mérida, Física Aplicada, Carr. Ant. a Progreso, Km.6, Cordemex, 97310 Mérida, Yucatán, México. Agradezco al CONAHCYT por la Beca No. 2022-000018-02NACF-16456.

"Los análisis fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN; financiado por los proyectos FOMIX-Yucatán 2008-108160, CONACYT LAB-2009-01-123913, 292692, 294643, 188345 y 204822. Se agradece a la Dra. Patricia Quintana por el acceso a LANNBIO, al M.C. Daniel Aguilar por la obtención de los difractogramas, y al M.C. Mario Herrera Salvador por labores de mantenimiento correctivo del difractómetro" Así como al Dr. Antonio Azamar -Barrios por los Interferogramas.

bolsas herméticas para su posterior análisis. Se realizó la caracterización fisicoquímica con las técnicas de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR); la Difracción de Rayos-X (XRD) y Microscopía Electrónica de Barrido acoplado al análisis elemental (SEM-EDX). Los resultados mostraron los grupos funcionales característicos del material lignocelulósico en el análisis de FTIR, mostrando un índice de cristalinidad de 42.17 % según lo indicado en la Difracción de rayos-X. El SEM determinó como elementos mayoritarios carbono (C) y oxígeno (O), y trazas de potasio (K) y cloro (Cl). Con los análisis preliminares concluimos que es factible seguir con el tratamiento para la obtención de la celulosa y en un paso posterior al aislamiento de los nanocristales.

Palabras Claves. *Plátano, nanocristales, residuos agroindustriales, pseudotallo, análisis fisicoquímicos.*

Introducción

Los residuos agroindustriales se han tornado como preocupación a nivel mundial debido a su reacción adversa en el medio ambiente y la salud humana. Cada año se desechan mundialmente grandes cantidades (billones de toneladas) de residuos agroindustriales ricos en biomasa, pero la mayoría de ellos son tirados o quemados (Hafeman et al., 2019), los cuales suman a la crisis climática del efecto invernadero (Hemida et al., 2023; Zainundin et al., 2022; UNDP 2023). Se han buscado alternativas verdes, como modelo de la economía circular y que dan lugar a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), a través del uso de la biomasa agregando valor a los residuos agroindustriales. (Romero 2022; Alzate et al., 2021, Ilyas et al., 2019). La mayor parte de la biomasa vegetal de bajo valor se denomina lignocelulósica y se refiere a los principales biopolímeros constituyentes, que son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. La celulosa, en particular, es el recurso renovable más abundante y disponible hoy en día, con una producción mundial que alcanza aproximadamente entre 75 y 100 mil millones de toneladas por año (Mujtaba et al., 2023). Los recursos renovables de biomasa y residuos agroindustriales son de interés por la posibilidad de no toxicidad, renovabilidad y biodegradabilidad y sostenibilidad (Ilyas et al., 2019; Ilyas et al., 2017).

Dentro de la biomasa de residuos, la celulosa se describe por ser un homopolímero de alto peso molecular, natural con mayor abundancia en el mundo, se encuentra en la pared celular de las plantas (Hemida et al., 2023;

Rana et al., 2023; Herrera et al., 2019), es una molécula lineal con anillos de glucosa ($C_6H_{10}O_5$) ligada al C1 de un anillo de glucosa y al C4 del anillo adyacente a través de un enlace covalente de oxígeno (Presenda, 2020). Posee propiedades químicas y físicas únicas, tales como una gran superficie, alta resistencia, grupos hidroxilo ricos para modificación, rigidez y estabilidad (Pérez et al., 2023), se distingue por áreas amorfas (región sin orden) y cristalinas (regiones ordenadas) (Herrera et al., 2019). Las áreas cristalinas de la celulosa se conocen como nanocristales de celulosa (NCC) (Rana et al., 2023), son más robustos, biocompatibles, sostenibles, más rígidos, renovables, ópticamente transparentes, no tóxicos, livianos, impermeables a los gases, y biodegradables (Kaur et al., 2018; Trache et al., 2017; Peng et al., 2011). Estas propiedades poseen una vasta aplicación del NCC en numerosos campos, como la industria farmacéutica, la industria alimentaria, la industria de polímeros, la industria papelería, la catálisis, el sector energético y electrónico, el sector medioambiental, etc. (Rana et al., 2023; Oyeoka et al., 2021; Yang et al., 2019; Xie et al., 2018; Grishkewich et al., 2017; George y Sabapathi, 2015).

En México el cultivo de plátano es una de las principales fuentes de fibras vegetales (SADER, 2020). En Tabasco, México, la producción anual del plátano ocupa una extensión de 11, 687.42 hectáreas anuales, produciendo 622,175.14 Toneladas (SIAP, 2022). Cuando este se cosecha, solo se utiliza del 20 al 30 % de su biomasa quedando de un 70 a 80 % en gran parte de la planta sin utilizar (Holguín y Serrano, 2021).

Es por ello que el presente trabajo está enfocado en el estudio de las propiedades fisicoquímicas de residuos agroindustriales (pseudotallo), que se generan en la producción del plátano como fuente potencial para la obtención de los nanocristales de celulosa y así determinar la calidad para su uso nanobiotecnológico.

Metodología

El recurso biológico utilizado son residuos pertenecientes al plátano pera (*Musa paradisiaca* var. *Reticulata*) específicamente el pseudotallo, procedentes de las plantaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH), ubicado en la Col. Paso y playa, carretera Cárdenas – Huimanguillo km. 2 s/n Tabasco, México, entre las coordenadas 17°57'35.1"N y 93°21'57.8"W.

La recolección de los pseudotallos de plátano se realizó de forma manual, posteriormente se deshojaron y cortaron en secciones de 5 cm, se lavaron con agua corriente, y fueron secados bajo sol antes de iniciar el proceso de pulpeo. El secado se realizó a cielo abierto como se muestra en la Figura 1.

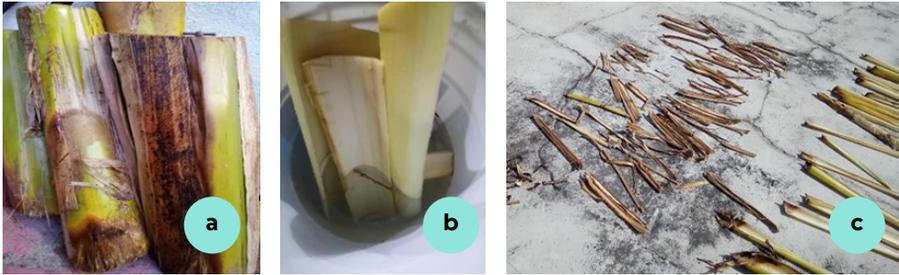


Figura 1. a) Recolección de pseudotallos de plátano pera (*Musa paradisiaca*), b) Deshojado y lavado de los residuos y c) secado a temperatura ambiente.

Los análisis de caracterización fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN, Unidad Mérida, Carr. Ant. a Progreso, Km.6, Cordemex, 97310 Mérida, Yucatán, México. La caracterización fisicoquímica de las muestras se llevó a cabo utilizando la técnica de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR). Se utilizó un Espectrómetro de infrarrojo FTIR Nicolet Magna Protege 460 en el modo de absorbancia, con una resolución de 4 cm^{-1} y 100 barridos y así determinar los grupos funcionales presentes en la muestra. El uso de Difracción de Rayos X (XRD) bajo el método de polvos, es por el cual se obtienen la cristalinidad de las muestras de celulosa a través de los difractogramas. Se utilizó un equipo Disfractometer Difractometro Bruker D-8 Advance, espectro Cu K α ($\alpha = 1.5418\text{ \AA}$ y de energía 40 Kv 30ma), tiempo de paso de 0.5 segundos y tamaño de paso 0.2 segundos. El porcentaje de cristalinidad de las muestras se calculó en el análisis de rayos-X por el método desarrollado por Segal et al., (1959) Ec. (1):

$$X_c \% = 100[1 - (I_{am}/I_{002})] \quad (1)$$

Donde: I_{am} es la intensidad del pico mínimo y I_{002} es la intensidad máxima del pico cristalino, respectivamente. La morfología de la muestra de los residuos de plátano sin procesar se analizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido con un analizador elemental acoplado (SEM-EDX) Marca Bruker D8 Advance.

Análisis y discusión de los resultados

Las muestras se evaluaron a través del FTIR y en la Figura 2 se muestra el interferograma de los residuos de plátano sin tratar. Se manifiesta una extensa banda de absorción en la región 3360 cm^{-1} correspondiente a la vibración de estiramiento del OH en las moléculas de celulosa (Hishikawa 2017; Hinterstoisser, 1999). Los picos de 2918 cm^{-1} es atribuida a vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H (Nandiyanto et al., 2022); el intervalo de $1730\text{--}1740\text{ cm}^{-1}$ se relaciona con los enlaces C=O de cetona (pectinas y gomas) presentes en la hemicelulosa (Bolio et al., 2018; López et al., 2016), los enlaces alrededor de 1603 cm^{-1} son característicos de los enlaces O-H simple de agua absorbida (Gonzalez et al., 2019). Los picos 1318 cm^{-1} (Kaur et al., 2018) atribuye a las vibraciones de flexión en el plano, del enlace C-H correspondiente a celulosa y hemicelulosa. López et al. (2016) y Bolio et al. (2018) atribuyen en los 1036 cm^{-1} a vibraciones de flexión de enlaces C-H de los anillos aromáticos y finalmente 777 cm^{-1} corresponde al enlace C-H de los grupos aromáticos de la lignina (Nandiyanto et al., 2022).

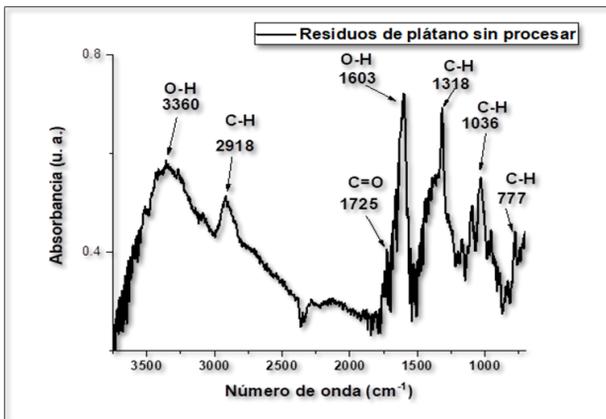


Figura 2. El espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales representativos de celulosa.

Se efectuaron estudios de rayos X para investigar la cristalinidad presente en las muestras de los residuos de plátano sin tratar, en la Figura 3, se aprecia el difractograma obtenido del pseudotallo, con picos cercanos a $2\theta=16^\circ$, 22° y 35° . De acuerdo con Kaur et al., (2018) presentan similitud $2\theta=16^\circ, 22^\circ$ y 35°

que conciernen a acomodos cristalinos ordenados debido a la formación de puentes de hidrógeno inter e intramoleculares. Presenda et al., (2020) reportan picos cercanos $2\theta=15.8^\circ$, 23° y 35° donde Pérez et al., (2023) y González et al., (2019) retribuyen que esta estructura es de celulosa tipo I, encontradas comúnmente en vegetales naturales en variedad de organismos (árboles, plantas, tunicados, algas y bacterias), que a veces se denomina celulosa “natural”.

El índice de cristalinidad que se reporta en la muestra de pseudotallo de *Musa paradisiaca* variedad *Reticulata* sin procesar, fue del 42.2 %, comparado con Flores et al., (2023) que reportaron una menor cristalinidad 30 % a partir de la *Typha dominguensis* Pers, y sobre el mismo método similar González et al., (2019), reportaron el 43.4 % a partir de *E. crassipes*. López et al., (2016) reportaron a partir de bagazo de caña del 41 % y Bolio et al., (2018) a partir de corona de piñas con el 39.6 %, valores similares a los encontrados en este estudio. Por lo que se infiere que, este es un factor para determinar que esta variedad puede ser buena fuente para la obtención de nanocristales.

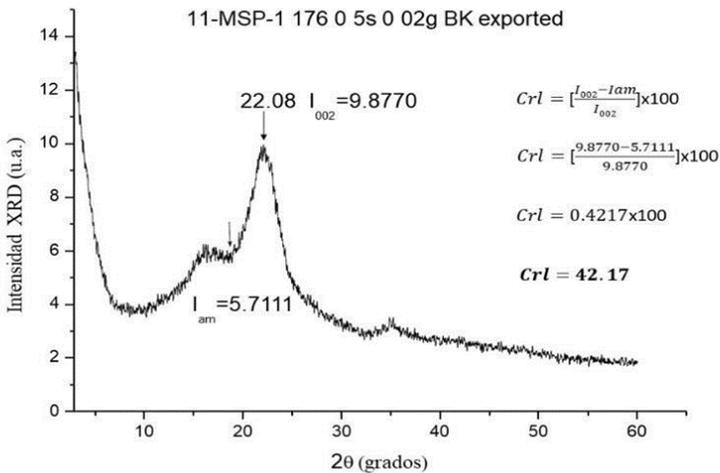


Figura 3. El espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales representativos de celulosa.

En la Figura 4, podemos observar el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) del residuo de plátano de la variedad reticulata a más de 500 aumentos a 15 Kv enfocada a 15 micras de profundidad. No se observan poros, su superficie parece gruesa, se denotan venas en toda la muestra, denota rigidez, y se observa algunas áreas lisas de la muestra. En su composición, en el análisis elemental se muestran los principales elementos constituyentes de la celulosa, carbono y oxígeno: 1. Carbono (C) con 67.13 % masa y 73.29 % molar; 2. Oxígeno (O) con una composición de 32.37 % masa y 26.53 % molar. Se detectaron trazas de potasio (K) 0.25 % masa y 0.09 % molar el cual es un porcentaje característico del macronutriente presente en la planta (Murgeitio et al., 2019) y el cloro (Cl) 0.25 % masa y 0.08 molar es debido a que este elemento proviene de la transpiración absorbidos por las raíces, o por el agua de lluvia, el polvo, la contaminación industrial y agrícola (Rosales et al., 2020).

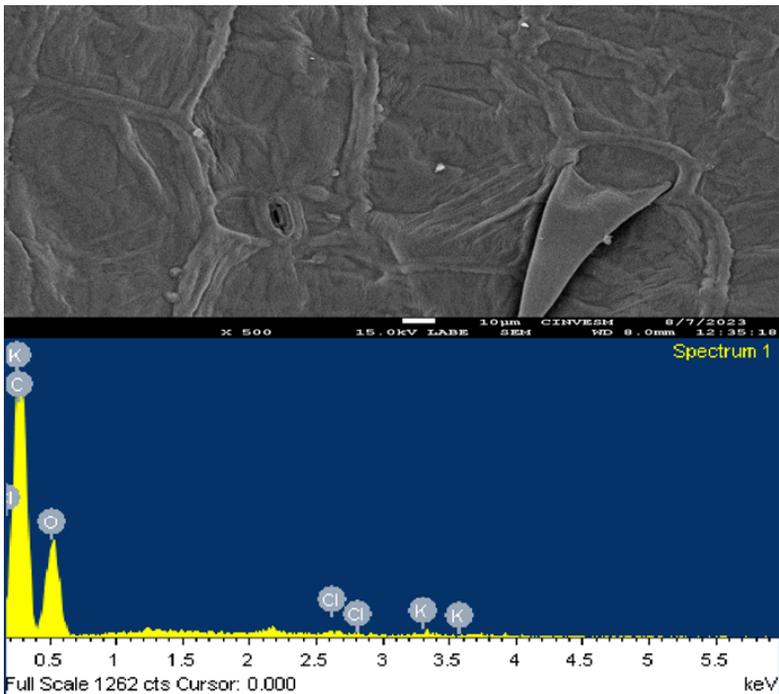


Figura 4. a) La morfología de la muestra y b) el análisis de los elementos presentes en ella.

Conclusiones

Los residuos de plátano de pseudotallo de la variedad reticulata (*Musa paradisiaca*) manifestó patrones de difracción de rayos X que mostraron una mayor intensidad de los picos de la celulosa, las zonas desordenadas y ordenadas del residuo permitieron analizar el índice de cristalinidad y con esa probabilidad se infiere que posterior a tratamientos ácidos se podría obtener nanocristales de buena calidad.

En el análisis infrarrojo (FTIR) se asocian las bandas típicas de celulosa, hemicelulosas y lignina presentes. Se podría considerar que la celulosa es correspondiente a patrones de rayos X de celulosa de tipo I, que se encuentran comúnmente en tejidos vegetales (Pérez et al., 2023; González et al., 2019).

Las imágenes SEM-EDX mostraron los elementos presentes mayoritarios en esta variedad de plátano siendo el carbono y el oxígeno. Los resultados de este estudio podrían considerarse prometedores para el uso de estos residuos vegetal agroindustriales, como fuente potencial para la obtención de nanocristales de celulosa, y con ello estaríamos contribuyendo a las industrias biotecnológicas, sociales y ambientales.

Referencias bibliográficas

- Alzate, A. S., Díaz, A. J., López, E. y Tovar, C. (2021). Recuperación de pérdidas de residuos de producción y procesamiento de plátano: una contribución a una economía circular. *Moléculas* 26, no. 17: 5282.
- <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>
- López, A., Bolio, G., Veleza, L., Solórzano, M., Acosta, G., Hernández, M., Salgado S., Córdova, S. (2018). Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agro Productividad*, 9(7), pp: 77-82 Recuperado a partir de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/784>
- Cheng, M., Qin, Z., Chen, Y., Hu, S., Ren, Z. y Zhu, M. (2017). Extracción eficiente de nanocristales de celulosa mediante hidrólisis de ácido clorhídrico catalizada por cloruros inorgánicos en condiciones hidrotermales. *ACS Química e Ingeniería Sostenible*, 5 (6), 4656-4664.
- Flores DT. (2023). Caracterización de celulosa extraída a partir de la planta acuática *Typha domingensis* pers. [Tesis de licenciatura] Universidad Popular de la Chontalpa.

- George, J., & Sabapathi, S. N. (2015). Cellulose nanocrystals: synthesis, functional properties, and applications. *Nanotechnology, science and applications*, 45-54.
- Grishkewich, N., Mohammed, N., Tang, J., & Tam, K. C. (2017). Recent advances in the application of cellulose nanocrystals. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 29, 32–45.
- González, P., Bolio, G., Veleza, L., Hernández, M., Valerio, C., Falconi, R., Ojeda, M. E. (2019). Estudio de la estructura química de la celulosa extraída del peciolo de la *Eichhornia crassipes* by Xray Powder difracctiòn. *Investigaciones Científicas y Agrotecnológicas para la Seguridad Alimentaria*. INIFAP, Tab., México. 369-376.
- Hafeman, E., Battisti, R., Marangoni, C., & Machado, R. a. F. (2019). Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 218, 188–198.
- Hemida, M. H., Moustafa, H., Mehanny, S., Morsy, M., Dufresne, A., Abd EL Rahman, E. N., & Ibrahim, M. (2023). Cellulose nanocrystals from agricultural residues (*Eichhornia crassipes*): Extraction and characterization. *Heliyon*, Vol. 9, Num 6, e16436. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16436>
- Herrera, M.; Sinche, L.; Bonilla, O. (2019) "Obtención de Nanocelulosa a partir de Celulosa de Puntas de Abacá". *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, Vol. 76, Num. 586, 123-131. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/359059/451084/0>
- Hinterstoisser, B., Salmén, L. (1999). FTIR de escaneo por pasos bidimensional: una herramienta para desentrañar el rango de valencia OH del espectro de celulosa I. *Cellulose* 6, 251–263.
- Hishikawa, Y., Togawa, E., & Kondo, T. (2017). Characterization of individual hydrogen bonds in crystalline regenerated cellulose using resolved polarized FTIR spectra. *ACS omega*, 2(4), 1469-1476.
- Holguín, W. E. P., y Serrano, C. A. M. (2021). El Papel de los Residuos Agrícolas en la Extracción de Nanocristales de Celulosa. *Revista Bases de la Ciencia*, 6(2), 57-74.
- Ilyas, R., Sapuan, S.M., Ibrahim, R., Atikah, M.N., Atiqah, A., Ansari, M.N., & Norraahim, M.N. (2019). Production, Processes and Modification of Nanocrystalline Cellulose from Agro-Waste: A Review. Movahedi, B. *Nanocrystalline Materials*. pp(1-30) IntechOpen.
- <https://www.intechopen.com/chapters/68817>
- Ilyas, R.A., Sapuan, S. M., Sanyang, M.L., Ishak, M.R., Zainudin, E.S., (2017). Nanocrystalline Cellulose as Reinforcement for Polymeric Matrix Nanocomposites and its Potential Applications: A Review, *Current Analytical Chemistry*, volume 14, issue 3, pages 203-225, issn 1573-4110/1875-672. <https://dx.doi.org/10.2174/1573411013666171003155624>

- Kaur, M., Kumari, S., & Sharma, P. (2018). Chemically Modified Nanocellulose from Rice Husk: Synthesis and Characterisation. *Advances in Research*, 13(3), 1–11.
- López, A., Bolio, G., Veleza, L., Solórzano, M., Acosta, G., Hernandez, M., Salgado, S., Cordova, Samuel. (2016). Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*), *Agroproductividad*.(Revista CONACYT, ISSN-0188-7394), 9. 41-45.
- <https://revistaagroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/784>
- Mujtaba, M., Fraceto, L. F., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., De Medeiros, G. A., Pereira, A. D. E. S., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136815.
- Murgueitio, ME., Campo, M., Nirchio, M., Cuesta, O., y Tocto, J. (2019). Composición química y actividad biológica del pseudotallo de *Musa x paradisiaca* L (BANANO). *CIENCIA UNEMI*, 12(31), 19-29.
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2022). Interpretation of fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): a practical approach in the Polymer/Plastic thermal decomposition. *Indonesian journal of science and technology*, 8(1), 113-126.
- Oyeoka, H. C., Ewulonu, C. M., Nwuzor, I. C., Obele, C. M., & Nwabanne, J. T. (2021). Packaging and degradability properties of polyvinyl alcohol/gelatin nanocomposite films filled water hyacinth cellulose nanocrystals. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2), 168–185.
- Pérez, R., Álvarez Castillo, A., Olarte Paredes, A., & Salgado Delgado, A. (2021). Obtención de nanocelulosa a partir de residuos postcosecha. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, 16(30), 1e-47e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69662>
- Peng, B. L., Dhar, N., Liu, H. L., & Tam, K. C. (2011). Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: a nanotechnology perspective. *The Canadian Journal of chemical engineering*, 89(5), 1191-1206.
- Presenda, G. A., Bolio, G. I., Azamar, V. L., Ramírez, J. A., Sarracino, O., Hernández, M. M., y De la Cruz, P. (2020). Obtención de celulosa a partir de residuos de piña (*Ananas Comosus* L. Merrill): Isolation of cellulose from pineapple waste (*Ananas Comosus* L.). *Agro Productividad*, 13(2), 77-82.
- Rana, M. S., Rahim, M. A., Mosharraf, M. P., Tipu, M. F. K., Chowdhury, J. A., Haque, M. R., Kabir, S., Amran, M. S., & Chowdhury, A. A. (2023). Morphological, Spectroscopic and Thermal Analysis of Cellulose Nanocrystals Extracted from Waste Jute Fiber by Acid Hydrolysis. *Polymers*, 15(6), 1530.

- Rojas, A.F., Flórez, C. y López, F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química*, 31(1), 31-52. Recuperado en 16 de septiembre de 2023.
- Romero, S. M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *Tecnológicas*, 25(54), e100. Epub October 03, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2505>
- Rosales, M. Á., Franco, J. D., Moreno, F. J., y Colmenero, J. M. (2020). Beneficios de una fertilización rica en cloruro para la agricultura y sus efectos en la salud humana. <https://digital.csic.es/handle/10261/219663>
- SADER (2020, 21 Enero). Plátano: la fruta tropical más cultivada en México. Secretaría De Agricultura Y Desarrollo Rural. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/hoy-dia-del-platano?idiom=es>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022, 13 junio). Producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap>. [Consultado 30 de Agosto del 2023].
- Segal, L., Creely, J., Martin, A. y Conrad, C. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the Xraydi_ractometer. *Textile Research Journal* 29,786-794.
- Trache, D., Hussin, M. H., Haafiz, M. M., & Thakur, V. K. (2017). Recent progress in cellulose nanocrystals: sources and production. *Nanoscale*, 9(5), 1763-1786.
- UNDP [Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo]. (2023). Forests, land and nature. UNDP Climate Promise. Recuperado 25 de agosto de 2023, de <https://climatepromise.undp.org/what-we-do/areas-of-work/forests-land-and-nature>
- Xie, S., Zhang, X., Walcott, M. P., & Lin, H. (2018). Applications of cellulose nanocrystals: a review. *Engineered Science*, 2(16), 4-16.
- Yang, Y., Chen, Z., Zhang, J., Wang, G., Zhang, R., & Suo, D. (2019). Preparation and applications of the cellulose nanocrystal. *International Journal of Polymer Science*, 2019, 1-10.
- Zainudin, MHM, Zulkarnain, A., Azmi, AS, Muniandy, S., Sakai, K., Shirai, Y. y Hassan, MA (2022). Mejora del proceso de compostaje de residuos agroindustriales mediante la inoculación microbiana: una breve revisión. *Agronomía*, 12 (1), 198.

CAPÍTULO 18

ANÁLISIS DE CORROSIÓN PARA TUBERÍAS EN AMBIENTE MARINO

Vivian P. López¹, Gloria Ivette Bolio López²

Resumen

La corrosión es definida como la transformación de la masa de un material principalmente en óxidos; consiste en la reacción electroquímica de un metal con el medio donde se encuentre ocasionando el deterioro del material y por consiguiente la pérdida de sus propiedades. La corrosión marina es un tipo de fenómeno de falla de materiales provocado por la interacción entre la estructura metálica y el ambiente marino. El agua de mar es un medio muy agresivo para los metales. El acero en la infraestructura marina es un problema global grave y creciente, causa riesgos ambientales, seguridad para la ingeniería, el transporte y genera pérdidas económicas debido al aumento de los costos de mantenimiento. Este artículo de revisión se enfoca en el análisis del proceso de la corrosión marina, sus parámetros fisicoquímicos, los diferentes tipos de este fenómeno, factores que lo causan y ciertos métodos para su control y la protección de materiales ante esta problemática, los resultados obtenidos fueron consultados en las siguientes fuentes: Pubmed, Elsevier, Redalyc y SciELO. Para reducir este efecto, es necesario ejercer un control de los factores que influyen en dicho proceso, donde la adecuada selección del material de la tubería y la aplicación de los recubrimientos son los primeros medios utilizados para evitar dicho daño.

Palabras clave. *Corrosión marina, acero, fenómeno fisicoquímico, inhibidores de corrosión.*

¹ Vivian P. López. Estudiante de Posgrado Maestría en Química Sustentable. Universidad Popular de la Chontalpa Col. Paso y playa km 2 s/n Carretera Cárdenas – Huimanguillo, Tabasco, México. C.P. 86529. 001nns22@upch.mx (autor correspondiente)

² Dra. Gloria Ivette Bolio-López. Profesor-Investigador y miembro del Cuerpo Académico Química Verde y Desarrollo Sostenible; Universidad Popular de la Chontalpa Col. Paso y Playa km 2 s/n Carretera Cárdenas – Huimanguillo, Tabasco, México. C.P. 86529

Introducción

La corrosión es definida como la transformación de la masa de un material principalmente en óxidos; consiste en la reacción electroquímica de un metal con el medio donde se encuentre ocasionando el deterioro del material y por consiguiente la pérdida de sus propiedades (Herradda y Aguilar, 2021).

Es la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación). En este mecanismo una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química cede y se trasladan electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción (Martínez, 2023). Los contaminantes que se involucran en el deterioro de los materiales por la corrosión atmosférica son los cloruros (Cl^-), cuyo origen se relaciona con la salinidad de los océanos, el dióxido de azufre (SO_2), que puede tener un origen diverso (Jiménez, 2023). Actualmente, los costos de la corrosión para los países industrializados se estiman en un aproximado del 3,5 % del producto interno bruto (Biezmay Linhard, 2020). Uno de los principales problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, debido a la toxicidad que presentan estos en el agua, elevando los efectos potencialmente nocivos sobre los distintos sistemas ecológicos en el ambiente, los cuales son el soporte de la vida humana (Pabón et al., 2020). Hoy en día, al construir nuevas instalaciones o infraestructuras expuestas a ambientes agresivos, los metales que operan en el medio marino suelen sufrir procesos de corrosión por picaduras, corrosión por grietas, entre otros (Arroyo et al., 2023). Actualmente, existen muchas formas de retardar la corrosión del metal, como la adición de inhibidores de corrosión, siendo la más económica y comúnmente utilizada (Chen et al., 2022).

Metales en la corrosión marina

Los metales pesados son considerados según la tabla periódica: elementos químicos de alta densidad (mayor a 4 g/cm^3), masa y peso atómico por encima de 20 y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), entre otros (Pabón et al., 2020). Es sabido que los aceros son conocidos por su excelente resistencia a la corrosión

y buenas propiedades mecánicas, también que no están libres de problemas de corrosión, como el acero inoxidable (Arroyo et al., 2023). La Tabla 1 resume las características y limitaciones de los metales y aceros en la corrosión.

Tabla 1. Características de los metales y aceros

Metales y aceros	Características	Aplicaciones	Limitaciones	Referencias
Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> Estructura liviana 	Industrias automotriz y aeroespacial.	Muy baja resistencia a la corrosión.	(Buzolin et al., 2020).
Acero inoxidable (SS)	<ul style="list-style-type: none"> Buena estabilidad estructural. Resistencia en condiciones ambientales extremas. 	Desalinización del agua.	<ul style="list-style-type: none"> Degradación del material. Corrosión localizada y formación de biopelículas. Lixiviación de iones tóxicos. 	(Kovendhana et al., 2019). (Perumal et al., 2020).
Zinc	Sus ventajas biológicas cumplen con requerimientos básicos de los metales biodegradables.	Capa protectora para materiales	Propiedades mecánicas bajas	(Liang et al., 2023). (Menga et al., 2018). (Li et al., 2021).
Hierro	<ul style="list-style-type: none"> Aleaciones importantes. Son reductores (por su naturaleza y mecanismo). 	<ul style="list-style-type: none"> Barcos, rieles, puentes, tuberías, y acero de refuerzo. Protección catódica. 	<ul style="list-style-type: none"> Bajo contenido de carbono. Baja resistencia a la oxidación y a la corrosión. 	(Martínez, 2023). (Ayman et al., 2021). (Teng et al., 2020)

Continuación Tabla 1..

Metales y aceros	Características	Aplicaciones	Limitaciones	Referencias
Cobre	Buena resistencia a la corrosión en un ambiente habitual.	Tuberías industriales, intercambiadores de calor y estructuras para entornos marinos.	<ul style="list-style-type: none"> Corrosión severa en altas temperaturas y humedad. Uso y rendimiento debilitado en exposiciones de O/W (agua en aceite). 	(Martínez,2023). (Amendola y Acharjee, 2022).
Acero al carbono	<ul style="list-style-type: none"> Buena solubilidad en agua Excelente estabilidad química. Bajo costo. Características no tóxicas. 	Estructuras (edificios y puentes).	Aleaciones afectadas por la corrosión atmosférica y condiciones ambientales.	(Jiménez et al., 2023). (Ren et al., 2022).

En la Figura 1 se muestra la clasificación de la corrosión y los factores que afectan a los materiales según su exposición al ambiente.

Corrosión Atmosférica: Es la destrucción de metales en el aire con parámetros físicos y químicos inherentes a la atmósfera real (Petrunin et al., 2022). Se caracteriza por la presencia de agua líquida, temperaturas por debajo del punto de rocío y ocurre tras la formación de pilas electroquímicas, o pilas de corrosión (Ribeiro et al., 2020).

Corrosión Marina: Es un tipo de fenómeno de falla de materiales provocado por la interacción entre la estructura metálica y el ambiente marino (Wang et al., 2022). El agua de mar es un medio muy agresivo para los metales. Los productos generados en este entorno contaminan el medio ambiente (Jauregui et al., 2013).



Figura 1. Clasificación de la corrosión (Muñoz y Uruchurtu, 2002).

Tipos de corrosión

Los tipos de corrosión comúnmente se clasifican conforme a las siguientes categorías: corrosión por pitting, fisuras, erosión y otros tipos:

En la Figura 2 podemos observar algunas de las características que conforman a los tipos de corrosión.



Figura 2. Tipos de corrosión (Sánchez et al., 1994).

Parámetros fisicoquímicos en el ambiente marino

En las atmósferas marinas, el depósito de partículas salinas sobre la superficie de los metales acelera el proceso de corrosión metálica (Chico et al., 1998). El agua de mar es rica en electrolitos, formados por iones de sales disueltas, que crean un ambiente agresivo para los metales (López et al., 2013). Esta agresividad se debe a factores como; concentración de oxígeno, salinidad, temperatura, pH, contaminación, etc. (Möller, 2007). Al mismo tiempo, los Parámetros fisicoquímicos (PFQ) dependen de factores estacionales y geográficos (Shirodkar et al., 2009).

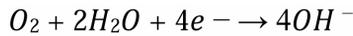
Temperatura: La velocidad de corrosión incrementa la temperatura, acelera la difusión del oxígeno del medio hacia el material afectado, mediante capas de pasivación volviéndolo frágil. Experimentos realizados demuestran que un aumento en la temperatura de 2 °C incrementa al doble la tasa de corrosión (Salazar, 2015). Estudios realizados en temperatura por Segura et al. (2021) demostraron que las categorías de agresividad, basadas en los contaminantes corrosivos SOL, son muy bajas y los cloruros presentan categorías de agresividad alta (S_2), de acuerdo con la norma ISO 9223. No obstante, el acero galvanizado presenta pérdidas de masa por corrosión anuales de 14 g/m². Al clima marino costero de Paraíso, Tabasco, se le puede asignar la categoría de agresividad C4₂ (alta), de acuerdo con la norma ISO 9223.

Salinidad: La incursión de agua salada incluye cambios en las características del suelo: mayores niveles iónicos, contenido de cloruro y mayor movilidad iónica (Tansel et al, 2022). Un estudio por Macías et al. (2023) notificó que la salinidad del agua fue variada en sectores y semanas consideradas y dada en cantidades de sales y minerales disueltas en el agua, considerando un promedio aceptable que rodea los 35 g/L. El TDS (Total Dissolved Solids) se midió durante 4 semanas, pero solo se obtuvo resultados de la primera semana (74 ppm); las otras semanas el nivel se excedió, sin obtener un valor específico, puesto que esto debe estar en un promedio de 50 a 45 ppm, según la OMS. Alcalinidad: El grado de corrosión y solubilización de los metales dependen de la alcalinidad, expresa la capacidad que tiene el agua de mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina su principal efecto es su reacción con ciertos cationes en el agua, formando precipitados (Pérez, 2016). Estudios realizados por Carstensen y Duarte (2019) mencionan que la alcalinidad total (TA) en ecosistemas costeros permitieron clasificarlos como débiles o fuertemente amortiguados, informando en 47 de los ecosistemas costeros, que las series temporales disponibles, fueron por debajo o por encima de 1,2 mmol kg⁻¹, (medio océano TA) respectivamente.

pH: El pH puede obtenerse cuando el dióxido de carbono, en forma de gas como ácido carbónico y los iones carbonato o bicarbonato alcanzan el equilibrio con el CO₂ atmosférico (Hernández et al., 2003). Un diagnóstico de corrosión realizado por Lobato et al, (2019) en un sistema de 4 ductos que inicio en la superficie y termino en la zona de playa del Golfo de México dio resultado la evaluación de pH del kilómetro 00+000 al 5+000 realizado de manera aleatoria, el cual representa un muestreo en toda la longitud, marcó a una ten-

dencia de cercanía a un pH neutro cercano a 6, sin embargo, debido a las sales minerales disueltas en terreno, se presentan variaciones de 4 a 8.5 en potencial hidrógeno así que el pH del suelo es independiente de la velocidad de corrosión presente en el electrolito.

Oxígeno disuelto: El oxígeno disuelto aumenta la actividad corrosiva del agua. Su nivel óptimo para el control de la corrosión es de 0,5 a 2,0 partes por millón. Facilita la formación de películas pasivas sobre tuberías de hierro no revestidas, su pérdida promueve la formación de hierro ferroso (Souza et al., 2020). Mediante un estudio realizado en un acero inoxidable por Carreón et al, (2020) durante la disolución anódica en condiciones neutras y alcalinas en un ambiente marino, está bien establecido que se presenta un proceso donde se consume el oxígeno disuelto generando los iones hidroxilo, de acuerdo con la siguiente reacción:



Con la producción de iones hidroxilo se presenta un aumento en el pH del electrolito cercano a la superficie del recubrimiento. De este modo, el aumento del pH en el agua de mar resultará en la precipitación de sales insolubles; tales como, $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$.

El acero al carbón

El acero al carbono es un material recomendado para aplicarse en oleoductos y gasoductos, donde la mitigación de la corrosión mediante formulaciones inhibitoras de la corrosión formadoras de películas es un método ampliamente aceptado en ambiente marino (Dwivedi et al, 2017). Mediante estudios realizados en los parámetros fisicoquímicos se obtuvo información de los siguientes autores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores meteorológicos y contaminantes reportados en ambiente marino en el acero al carbón

Material	Factores	Resultados	Referencias
Acero al carbón	Temperatura	Temperatura del sulfolano a 180 °C y cerca de 230 °C	(Kubisztal et al., 2020)

Continuación Tabla 2..

Material	Factores	Resultados	Referencias
Acero al carbón	Salinidad	Película silano TESPT (pH \approx 7) rendimiento de 99,6 % Baja resistencia (ionescloruro)	(BinSabt et al., 2023)
	Alcalinidad	Método de solución de fenolftaleína no es útil.	(Koenig et al., 2020)
	pH	pH independiente. Limitación (utilizar dentro de los rangos experimentales).	(Chung et al., 2021)
	Oxígeno disuelto	DOC de 0,0 a 5,0 ppm, de 0,0 ppm a 3,0 ppm y 5,0 ppm. Aumento y disminución de pérdida de peso del acero. Biopelículas distribuidas provocaron corrosión uniforme.	(Qian et al., 2019)

Por otra parte, en consecuencia, de los problemas causados por la corrosión marina se busca al menos reducir este efecto y para ello agregar un inhibidor de corrosión a un sistema corrosivo ha sido generalmente el método más actual para minimizar este fenómeno y proteger los metales (Mobin et al., 2022).

Inhibidores de corrosión:

Los inhibidores de corrosión son aditivos que reducen la velocidad a la que el metal se corroe cuando se añaden en cantidades mínimas, su acción se puede alterar o mejorar mediante un aumento en el grado de adsorción del inhibidor en la superficie del metal a través del mecanismo de fisiorción o quimisorción (Eddy et al., 2022). Son compuestos químicos que se incorporan, en bajas concentraciones, al ambiente en que se encuentran las piezas metálicas a proteger (Godínez et al., 2003).

El efecto de inhibición puede ser anódico, catódico o mixto. Algunos inhibidores son estrictamente específicos del metal o aleación y del entorno, y es posible que no muestren ningún fenómeno de inhibición con otros (Marzorati et al., 2018). En la Figura 3 se muestran los mecanismos de la inhibición.

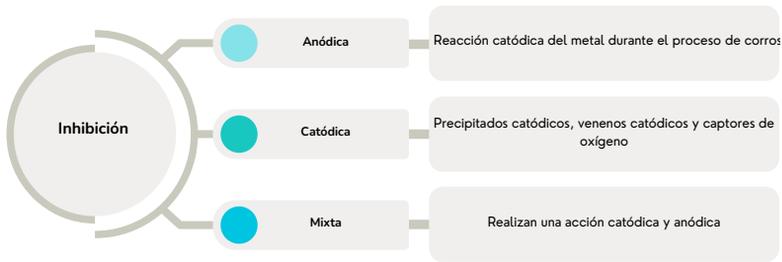


Figura 3. Mecanismos de inhibición (Goni et al., 2021).

Inhibidores verdes

Los inhibidores verdes limitan la corrosión eliminando las moléculas de agua de la superficie del contacto metal/solución, lo que da como resultado la creación de una capa de barrera compacta (Golshani et al., 2023). Se sintetizan de formas respetuosas con el medio ambiente, mediante irradiación ultrasónica, por microondas, mezcla mecanoquímica, reacciones de estado sólido, hidrotermales y multicomponentes (Berdimurodov et al., 2022). La aplicación de recubrimientos orgánicos es un enfoque común para proteger los metales de la corrosión en el agua de mar. Los tipos de materiales de revestimiento utilizados en ambientes marinos se muestran afectados por el cambio de las condiciones ambientales y sufren varios defectos después de una exposición prolongada al ambiente marino, lo que resulta en una disminución de la resistencia a la corrosión (Shen et al., 2019).

Conclusión

El estudio de la corrosión es un enfoque que integra distintas áreas de la ciencia y la ingeniería. Es imposible evitar que se produzca corrosión; sin embargo, se puede prevenir que cause las pérdidas en el ambiente marino. De todos los métodos de prevención de la corrosión disponibles, la inhibición de la corrosión se ha considerado en los últimos años eficiente en aplicaciones y en economía. En conclusión, al examinar las tendencias actuales en la investigación de la corrosión marina, los autores de esta revisión notaron que se pueden identificar áreas de estudio en los tipos de corrosión generadas por este fenómeno, el impacto que tiene en el ambiente, comparaciones aplicadas en aceros, uno de ellos el acero al carbón el más utilizado para tuberías en la

industria marina y el uso de inhibidores como protección para la corrosión que sigue creciendo como beneficio para el medio ambiente.

Referencias bibliográficas

- Amendola R y Acharjee A. (2022). Microbiologically Influenced Corrosion of Copper and Its Alloys in Anaerobic Aqueous Environments: A Review. *Front Microbiol.* Vol. 13, 1-10. doi: 10.3389/fmicb.2022.806688
- Arroyo Martínez, B., Lacalle-Calderón, R., Álvarez-Laso, J. A., Cicero-González, S. y Moreno-Ventas, B. (2023). Análisis de fallo por corrosión inducida microbiológicamente de un sistema de tubería soldada de acero inoxidable en una zona portuaria. *Revista de Mecánica de la Fractura.* (6), 279-284. <https://hdl.handle.net/10902/31155>
- Ayman H.A., El-Sayed M.S., Hany S.A. y Ehab S.G. (2021). Ethanedihydrazide as a Corrosion Inhibitor for Iron in 3.5% NaCl Solutions. *ACS Omega.* 6 (22), 14525-14532. DOI: 10.1021/acsomega.1c01422
- Berdimurodov, E., Eliboyev, I., Berdimuradov, K., Kholikov, A., Akbarov, K., Dagdag, O., Rbaa, M., El Ibrahim, B., Verma, D. K., Haldhar, R., y Arrousse, N. (2022). Green β -cyclodextrin-based corrosion inhibitors: Recent developments, innovations and future opportunities. *Carbohydrate polymers,* 292, 119719. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119719>
- BinSabt, M. H., Azeez, F. A., y Suleiman, N. (2023). Eco-friendly Silane-Based Coating for Mitigation of Carbon Steel Corrosion in Marine Environments. *ACS omega.* 8(14), 12886–12898. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00013>
- Biezma-Moraleda, M.V. y Linhardt, P. (2020). ¿Por qué no se presta suficiente atención a la corrosión? ¿Por qué aún no prestamos suficiente atención a la corrosión? *Material-ES* 4(3),44-47 www.sociemat.es/Material-ES
- Buzolin, R.H., Mohedano, M., Blawert, C., Mendis, C.L., Pinto, H. y Hort,N. (2020). Corrosion resistance of zk40 magnesium alloys modified with individual rare earth elements and calcium oxide addition. *Material-ES.* 4(3),48-51. www.sociemat.es/Material-ES
- Carreón-Garcidueñas, H.G., Medina-Flores, A., Huape-Padilla, E. y Béjar-Gómez, L. (2019). Efecto del aporte térmico en la resistencia a la corrosión de un recubrimiento de acero inoxidable 414-N depositado por soldadura FCAW. *Superficies y vacío.* 32, 6-13.
- http://www.scielo.org.mx/scielo.phpscript=sci_arttext&pid=S16653521201900010006&lng=es&tlng=es
- Carstensen, J., y Duarte, C. M. (2019). Drivers of pH Variability in Coastal Ecosystems. *Environmental science & technology.* 53(8), 4020–4029. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03655>

- Chen, L., Lu, D., y Zhang, Y. (2022). Organic Compounds as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in HCl Solution: A Comprehensive Review. *Materials*. 15(6), 1-59. <https://doi.org/10.3390/ma15062023>
- Chico, B., Otero, E., Mariaca, L. y Morcillo, M. (1998). Corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa. *Revista De Metalurgia*, 34 (Extra), 71-74. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.711>
- Chung, N. T., So, Y. S., Kim, W. C., y Kim, J. G. (2021). Evaluation of the Influence of the Combination of pH, Chloride, and Sulfate on the Corrosion Behavior of Pipeline Steel in Soil Using Response Surface Methodology. *Materials (Basel, Switzerland)*. 14(21), 6596. <https://doi.org/10.3390/ma14216596>
- Dwivedi, D., Lepkova, K. y Becker, T. (2017). Emerging surface characterization techniques for carbon steel corrosion: a critical brief review. *Proceedings. Mathematical, physical, and engineering sciences*. 473 (2199), 20160852. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0852>
- Eddy, N. O., Ibok, U. J., Garg, R., Garg, R., Iqbal, A., Amin, M., Mustafa, F., Egilmez, M., y Galal, A. M. (2022). A Brief Review on Fruit and Vegetable Extracts as Corrosion Inhibitors in Acidic Environments. *Molecules*. 27(9), 1-18. <https://doi.org/10.3390/molecules27092991>
- Godínez, L.A. Meas, Y., Ortega-Borges, R. y Corona A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Rev. Metal. Vol. 39*, 140-158. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i2.325>
- Golshani, Z., Arjmand, F., Amiri, M., Mohammad-Ali S.H. y Jamiladin-Fatemi, S. (2023). Investigation of Dracocephalum extract based on bulk and nanometer size as green corrosion inhibitor for mild steel in different corrosive media. *Scientific Reports*. 13(193), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27891>
- Goni, L. K. M. O., Jafar-Mazumder, M. A., Quraishi, M. A., y Mizanur-Rahman, M. (2021). Bioinspired Heterocyclic Compounds as Corrosion Inhibitors: A Comprehensive Review. *Chemistry, an Asian journal*. 16(11), 1324-1364. <https://doi.org/10.1002/asia.202100201>
- Hernández-Ayón, J.M., Zirino, A., Marinone, S.G., Canino-Herrera, R. y Galindo-Bect, M.S. (2003). Relación pH-densidad en el agua de mar. *Ciencias marinas*. 29(4), 497-508. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018538802003000400012&lng=es&tlng=es
- Herradda-Villanueva, J., Aguilar-Marín, P. (2021). Niveles de protección anticorrosiva en atmósfera marina proporcionada por recubrimientos de bajo impacto ambiental. *Rev. Cienc. Tecnol.* 17(2),83-96. <http://dx.doi.org/10.17268/rev.cyt.2021.02.07>
- Jauregui-Coto, K., Veleva, L., Bolio-López, G.I. y López-Sauri, D.A. (2013). Primeras etapas de corrosión de metales en agua de mar artificial: II. Acero inoxidable AISI 304. *Rev. Cienc. Tecnol.*9(4),9-17.

- https://www.researchgate.net/publication/305721545_Primeras_etapas_de_corrosion_de_metales_en_agua_de_mar_AISI
- Jiménez-Salas, R., Brenes-Brenes, R., Rodríguez-Yañez, J. y Sanabria-Chinchilla, J. (2023). Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical. *Tecnología en Marcha*.36(1),76-88. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5845>
- Koenig, A., Mahmoud, H., Baehre, O., y Dehn, F. (2020). Alkalinity and Its Consequences for the Performance of Steel-Reinforced Geopolymer Materials. *Molecules* (Basel, Switzerland). 25(10), 2359. <https://doi.org/10.3390/molecules25102359>
- Kovendhana, M., Kanga, H., Jeonga,S., Jong-Sang Y.,Oha,I., Young-Kwon, P. y Ki-Joon,J. (2019).Study of stainless steel electrodes after electrochemical analysis in sea water condition.*Environmental Research*. 173,549–555 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.069>
- Kubisztal, J., Łosiewicz, B., Dybał, P., Kozik, V., y Bak, A. (2020). Temperature-Related Corrosion Resistance of AISI 1010 Carbon Steel in Sulfolane. *Materials* (Basel, Switzerland). 13(11), 2563. <https://doi.org/10.3390/ma13112563>
- Li, H., Wang, P., Lin, G., y Huang, J. (2021). The role of rare earth elements in biodegradable metals: A review. *Acta biomaterialia*, 129, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.05.014>
- Li, L., Qiao, Y., Zhang, L., Ma, A., Ma, R. y Zheng, Y. (2023). Understanding the Corrosion Behavior of Nickel–Aluminum Bronze Induced by Cavitation Corrosion Using Electrochemical Noise: Selective Phase Corrosion and Uniform Corrosion. *Materials*.16, 669, 1-15. <https://doi.org/10.3390/ma16020669>
- Li, T., Huang, G., Feng, Y., Yang, M., Wang, L., Cui, D. y Zhang, X. (2020). Effects of Different Ions and Temperature on Corrosion Behavior of Pure Iron in Anoxic Simulated Groundwater. *Materials*.13 (12), 1-18. <https://doi.org/10.3390/ma13122713>
- Liang, Y., He, B.,Fu, G.,Wu,S. y Fan, B. (2023).Effects of Ambient Temperature and State of Galvanized Layer on Corrosion of Galvanized Steel in High-Humidity Neutral Atmosphere. *Materials*.16, 3656,1-11. <https://doi.org/10.3390/ma16103656>
- Lobato-Castañeda, M., Sánchez-Campos, D., Ramos-López, C., Reyes-Valderrama, M. I., Cerecedo-Saenz, E. y Rodriguez-Lugo, V. (2019). Evaluación de la Corrosión en un Sistema Híbrido de Protección catódica. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*. 7(Especial-2), 30-38. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7iEspecial-2.4855>
- López-García, J.A., Veleva, L., Bolio-López, G.I. y López-Sauri, D.A. (2013). Primeras etapas de corrosión de metales en agua de mar artificial: I. cobre. *Rev. Cienc. Technol*. 9(3), 35-43. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/343>

- Ma, Y., Zhang, Y., Zhang, R., Guan, F., Hou, B. y Duan, J. (2019) Microbiologically influenced corrosion of marine steels within the interaction between steel and biofilms: a brief view. *Appl Microbiol Biotechnol* 104, 515–525. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10184-8>
- Macías, J., Zevallos, A. y García, S. (2023). Caracterización físico-química de aguas de mar contaminadas por evacuación de residuos de empresas en Tarqui. *MQR Investigar*. 7(1), 1860-1877. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.1860-1877>
- Martínez-Pérez, F. (2023) Corrosión. Tipos. Prevención. <https://cutid.com/2177/v32n2e10>
- Marzorati, S., Verotta, L. y Trasatti, S. (2018). Inhibidores de corrosión verdes de fuentes naturales y desechos de biomasa. *Moléculas*. 24 (1), 1-24. <https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
- Meng, Y., Liu, L., Zhang, D., Dong, C., Yan, Y., Volinsky, A.A., y Wang, L.N. (2018). Initial formation of corrosion products on pure zinc in saline solution. *Bioactive Materials*. Vol. 4, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.08.003>
- Mobin, M., Aslam, R., Salim, R., y Kaya, S. (2022). An investigation on the synthesis, characterization and anti-corrosion properties of choline based ionic liquids as novel and environmentally friendly inhibitors for mild steel corrosion in 5% HCl. *Journal of colloid and interface science*. 620, 293–312. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.04.036>
- Möller, H. (2007). The influence of Mg²⁺ on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater, *Corrosion Science*, Volume 49 (4), 1992-2001. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.10.011>
- Muñoz-Ledo, R., y Uruchurtu-Chavarrín, J. (2002). Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18 (1), 27-32. <https://www.redalyc.org/pdf/370/37018103.pdf>
- Pabón, S.E., Benítez, R., Sarria-Villa, R.A. y Gallo J.A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción, Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 14 (27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 29(3), 3-14. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>
- Perumal G., Grewal HS, Arora HS. (2020) Enhanced Durability, Bio-activity and Corrosion Resistance of Stainless Steel through Severe Surface Deformation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. Vol.194, 1-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111197>

- Petrunin, M., Rybkina, A., Yurasova, T. y Maksaeva, L. (2022). Effect of Organosilicon Self-Assembled Polymeric Nanolayers Formed during Surface Modification by Compositions Based on Organosilanes on the Atmospheric Corrosion of Metals. *Polymers*. 14(4428), 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym14204428>
- Qian, H., Ju, P., Zhang, D., Ma, L., Hu, Y., Li, Z., Huang, L., Lou, Y., y Du, C. (2019). Effect of Dissolved Oxygen Concentration on the Microbiologically Influenced Corrosion of Q235 Carbon Steel by Halophilic Archaeon *Natronorubrum tibetense*. *Frontiers in microbiology*. 10, 844. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00844>
- Ren, S., Cui, M., Chen, X., Mei, S., y Qiang, Y. (2022). Comparative study on corrosion inhibition of N doped and N, S codoped carbon dots for carbon steel in strong acidic solution. *Journal of colloid and interface science*, 628(PtB),384-397. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.070>
- Ribeiro-Filho, GL., Ribas, R., y Donizetti de Paula, G. (2020). La importancia de la corrosión de la pintura base causada por daños en la pintura de estructuras de acero. *Revista ALCONPAT*, 10 (3), 2 86 - 299. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.357>
- Salazar-Jiménez, J. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*. 28(3),127-136. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Sánchez-Nácher, L., Pérez-Salinas, M. M. y Eguía-Baracaldo, V. M. (1994). La corrosión por picaduras: apGlicación a aceros AISI 420.Técnica Industrial.N.214. 64-67.
- Segura-Domínguez, A., Del Angel-Meraz, E. y Cruz-Pérez, A. E. (2021). La corrosión del acero galvanizado en una atmósfera marina-costera de Tabasco, México.: corrosion of galvanized steel in a marine-coastal atmosphere of tabasco, Mexico. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*. 5(2), 147-162. <https://doi.org/10.19136/jeeos.a5n2.4710>
- Shen, Y., Dong, Y., Yang, Y., Li, O., Zhu, H., Zhang, W., Dong, L. y Yin, Y. (2019). Study of pitting corrosion inhibition effect on aluminum alloy in seawater by biomaterialized film. *Bioelectrochemistry*. Vol.132,1-26. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.107408>.
- Shirodkar, P.V., Mesquita, A., Pradhan, U.K., Verlekar, X.N., Babu, M.T. y Vethamony, P. (2009). Factors controlling physico-chemical characteristics in the coastal waters off Mangalore—A multivariate approach. *Environmental Research*. 109 (3), 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.11.011>.

- Sousa, C., Correia, A. y Colmenares, M.C. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. 50(2), 187-196. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482010000200003&lng=es&tlng=es
- Souza, J.C.M., Apaza-Bedoya, K., Benfatti, C.A.M., Silva, F.S. y Henriques, B. (2020). Una revisión completa sobre las vías de corrosión de los implantes dentales de titanio y sus efectos biológicos adversos. *Metales*. 10 (9), 1-14. <https://doi.org/10.3390/met10091272>
- Tansel, B. y Zhang, K. (2022). Effects of saltwater intrusion and sea level rise on aging and corrosion rates of iron pipes in water distribution and wastewater collection systems in coastal areas. *Journal of environmental management*. 315, 115153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115153>
- Wang, X., Ren, J., Li, Z., y Li, Y. (2022). Research progress of vapor phase corrosion inhibitors in marine environment. *Environmental science and pollution research international*. 29(59), 88432–88439. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23400-2>
- Yan, X. y Sun, J. (2021). Pitting Corrosion Behavior and Surface Microstructure of Copper Strips When Rolled with Oil-in-Water Emulsions. *Materials*. 14, 7911,1-18. <https://doi.org/10.3390/ma14247911>

CAPÍTULO 19

DISPOSICIÓN FINAL DE LOS MEDICAMENTOS DE USO DOMICILIARIO. CASO DE ESTUDIO: SINGREM

Edelia Claudina Villarreal Ibarra¹, Damianys Almenares López²

Resumen

Los medicamentos caducos o no utilizados en el hogar deberían ser eliminados de una manera que garantice la seguridad de la población, y que tenga un impacto negativo mínimo en el medio ambiente. Desde esta perspectiva se desarrolló el presente estudio documental cuyo objetivo fue conocer las vías de disposición final de medicamentos y se analiza el caso de estudio del Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos (SINGREM).

Palabras claves. *Medicamentos caducados, SINGREM, disposición final.*

Introducción

La Ley General de Salud define un medicamento como toda sustancia o mezcla de sustancias de origen natural o sintético que tenga efecto terapéutico, preventivo o de diagnóstico, que se presente en forma farmacéutica y se identifique como tal por su actividad farmacológica, características físicas, químicas y biológicas (LGS, 2012). Mientras que un medicamento caducado es aquel medicamento con fecha de caducidad expirada, el cual no debe administrarse en tratamientos médicos, debido a que, posterior a la fecha de caducidad ya no se garantiza la estabilidad del producto para ser consumido.

Es conocido que, los botiquines en los hogares brindan productos necesarios para tratar dolencias leves, mientras se acude con el doctor.

¹ Edelia Claudina Villarreal Ibarra. Dra. en Ciencias. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. edelia.villareal@upch.mx. ORCID: 0000-0002-1574-9511.

² Damianys Almenares López. Dra. en Ciencias. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, Tabasco, México. Autor correspondiente: damianys.almenares@upch.mx.

Sin embargo, es frecuente que contenga medicamentos sobrantes de tratamientos previos o sencillamente otros medicamentos adquiridos. Además, en los adultos mayores y cuando algún miembro de la familia padece alguna enfermedad crónica esta problemática se acentúa. Es necesario señalar que en muchas ocasiones en dichos botiquines los medicamentos se encuentran almacenados en condiciones no adecuadas, además sin tener en cuenta la fecha de vencimiento; promoviendo la generación de residuos, sin proceso de destrucción óptimo debido a que aún no existe una legislación o normatividad específica para su disposición final. En este sentido, los medicamentos caducos además de su falta de eficacia, pueden generar problemas tanto a la salud como al medio ambiente; por lo tanto, la disposición de estos residuos de medicamentos debe llevarse bajo la supervisión de la autoridad competente en materia de salud, también involucra a las autoridades del medio ambiente y del manejo de desechos en todos los niveles gubernamentales; sin embargo, estas actividades no son suficientes para satisfacer las necesidades del país y particularmente en los hogares tema objeto del presente estudio.

El propósito de este trabajo fue identificar la normatividad por la que se rige la distribución y disposición final de fármacos, así como describirlos métodos y técnicas de disposición final de medicamentos; se establece como caso de estudio el Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos (SINGREM).

Desarrollo

El marco legal en México aplicable a la industria Farmacéutica considera la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General de Salud, la Ley Federal de Procedimientos Administrativos, la Ley Federal de Derechos, el Reglamento de la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios, el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, el Reglamento de Insumos para la Salud y la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos 9ª Edición. Además, la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establecen las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos; los medicamentos considerados residuos peligrosos para la salud y el medio ambiente están señalados en el listado 5 (Otros residuos; Clasificación por tipo de residuos sujeto a condiciones particulares de

manejo).

En este sentido, la Comisión Federal para la prevención de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) se encarga del ejercicio de las atribuciones en materia de regulación, control y fomento sanitarios en los términos de la Ley General de Salud y demás disposiciones jurídicas aplicables, considera peligroso todo residuo que pueda causar daño directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general. En concordancia con la legislación mexicana, los residuos de la industria farmacéutica y los medicamentos caducos deben manejarse de acuerdo con el Reglamento de la Ley General de equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos. Sin embargo, la normativa excluye del alcance a los residuos domiciliarios, los que se regirán por leyes especiales y convenios internacionales. Es necesario resaltar que, los medicamentos caducos no deben depositarse en la basura o el drenaje, sino que deben colocarse en contenedores especiales (SSA, 2017). Adicionalmente los medicamentos desechados sin ningún tipo de control representan un riesgo ante la posibilidad de ser comercializados ilegalmente.

En 2012, la COFEPRIS publicó los Lineamientos para la Reducción del Riesgo Sanitario de Medicamentos Caducos en el Mercado Mexicano, con el objetivo de prevenir riesgos a la salud por el uso de sustancias que hayan alcanzado su fecha de caducidad.

Situación actual del mercado de medicamentos

La industria Farmacéutica se posiciona prioritariamente como un sector primario para México debido a su influencia en el desarrollo económico del país y la estrecha relación que guarda con la salud. La misma se enfoca a la investigación, desarrollo, producción y comercialización de productos químicos o biofármacos utilizados para la prevención o el tratamiento de enfermedades. Los productos farmacéuticos se clasifican por su origen, prescripción médica o derechos de explotación (Figura 1).

- Convencionales: Origen sintético o químico.
- Biofármacos: Sustancia activa de origen biológico o biotecnológico.
- Controlados: Recetados necesariamente por un médico.
- Libres: Para su venta sin receta médica.

- Patente: Incluyen la molécula utilizada, la formulación y el mecanismo de producción.
- Genérico: Garantiza que tengan el principio activo, pureza y efectos que los de patente.

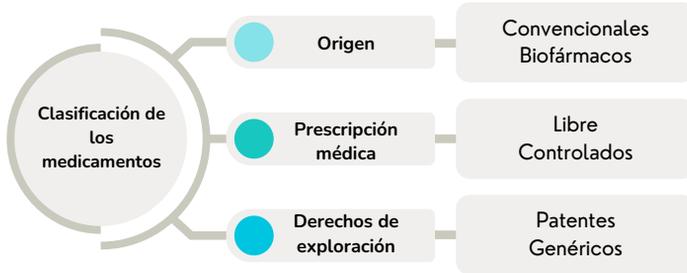


Figura 1. Clasificación de los medicamentos

La industria farmacéutica en México es considerada la séptima actividad económica en el país, de las empresas que conforman la misma emplearon 83,336 personas, lo cual representa el 1.6 % de la ocupación en las industrias manufactureras (Censo económico 2014, INEGI), con una notable participación de la mujer. En México se encuentran las 10 principales empresas farmacéuticas del mundo, así como 837 unidades económicas en Fabricación de Productos Farmacéuticos. La producción bruta total en el año 2019 fue de \$189,260M MX, referida principalmente a la Ciudad de México y Estado de México como los de mayor producción. En el año 2020, las exportaciones alcanzaron 1,760 mdd, mientras que, las importaciones leegaron a 5,773 mdd. Los productos farmacológicos que más se producen son los antibióticos seguidos de los de sistema digestivo y el metabolismo. Los medicamentos de patente representan el 4.4 % del volumen de los medicamentos consumidos, que equivalen a 20.4 % de las ventas de mercado.

De acuerdo a la COFEPRIS, en el 2021; alrededor de 12 millones de medicamentos caducos no son recuperados por las autoridades sanitarias, de los cuales el 30 % se desvía al mercado ilegal, es decir, a lugares no autorizados para la venta de medicamentos, como tianguis y mercados, donde se vende aproximadamente el 6 % de los medicamentos que se expenden en el país y de ellos, el 30 % son medicamentos caducos, con un valor total de 13 a 30 mil millones, en contraste con lo reportado por la Organización Mundial de

la Salud, donde la falsificación de medicamentos alcanza los 10 mil 200 millones al año a la Unión Europea; en más del 50 % de los casos se ha comprobado que los medicamentos adquiridos a través de sitios web sin domicilio social declarado, son productos falsificados (REDEAMI, 2022). Ante la creciente venta de medicamentos vencidos en el mercado ilegal, la industria farmacéutica y las autoridades de salud crearon el Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos (SINGREM), cuyo objetivo es recolectar todos aquellos medicamentos que han expirado o los residuos de medicamentos que ya no se utilizan. Para la eliminación de medicamentos no deseados es necesario seguir una serie de directrices las cuales son particularmente útiles en países en transición donde todavía no se han desarrollado reglamentos oficiales. En este sentido, se entiende por tratamiento al conjunto de técnicas y métodos de procesamiento físico, químico y biológico que se aplican a los residuos con la finalidad de modificar sus características y con el objetivo de mejorar su eficiencia en el manejo, recuperación el material utilizable, conversión de productos y energía y el control de la contaminación ambiental. Para poder determinar el tratamiento que puedan tener estos residuos, es necesario efectuar primeramente una caracterización CRETIB (corrosivos, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico-infeccioso) de los residuos que son considerados peligrosos y altamente contaminantes, estudios de generación, composición físico-química, a fin de determinar la opción más viable para su disposición final, reutilización, reciclamiento, aprovechamiento, recuperación de energía o confinamiento.

En la Ciudad de México y Área Metropolitana, el sistema más utilizado para los residuos especiales en general es el relleno sanitario. Por otra parte, en las empresas farmacéuticas los productos rechazados por control de calidad y los medicamentos caducos se manejan en forma diferente según las operaciones propias de cada industria. Los productos rechazados por control de calidad que no pueden ser reciclados en el tren de producción normal, son triturados y moldeados en una especie de torta de filtración que se envía a relleno sanitario para su disposición final. Puede ser que sean incinerados in situ, o si se muelen y se disuelven en agua pueden ser tratados junto con las aguas residuales de la planta industrial a través de procesos biológicos.

Posteriormente pasan a la clasificación, es decir separación en categorías para las cuales se requieren diferentes métodos de desechos y finalmente se procede a su eliminación. Idealmente, los productos farmacéuticos deberán eliminarse por incineración a alta temperatura ($> 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), pero en general, sólo en los países industrializados se cuenta con equipo de incineración con control adecuado de emisiones.

Identificación de impactos del desecho inadecuado de los medicamentos caducos Impactos ambientales

Los medicamentos entran dentro de la categoría de “contaminantes emergentes”, debido a la preocupación reciente por las posibles consecuencias de las mismas. Además, se caracterizan por estar presentes en concentraciones bajas, pero de manera regular y continua, de modo que concentraciones consideradas inocuas pueden tener efectos negativos en el ambiente debido a su acumulación, dependiendo del tipo de metabolito, y la vida media de los compuestos desechados.

Se han detectado residuos de medicamentos en casi todo tipo de aguas continentales, además de su acumulación en suelos, agua subterránea y agua potable. Por lo anterior, se han desarrollado metodologías analíticas nuevas para la determinación de los compuestos activos de los medicamentos (Manzollilo et al., 2019).

En Latinoamérica existen estudios donde fueron evaluados los conocimientos, actitudes y prácticas sobre descarte de medicamentos mediante encuestas a pacientes de un hospital en Bogotá, resultando que un 90 % de los usuarios los desecha junto con los residuos domiciliarios y el 92 % desconoce los sitios de acopio de medicamentos caducos disponibles en la ciudad (Quijano-Prieto et al., 2016). Mientras que, en Venezuela mediante la aplicación de encuestas se reveló que el 88 % desecha los medicamentos sobrantes o caducos junto con los residuos domiciliarios, y el 12 % los desecha en el drenaje (Correia & Marcano, 2016).

En México, existe amplia literatura científica publicada acerca de los impactos ecotóxicos de los principios activos de los medicamentos y sus metabolitos, con énfasis en la toxicidad aguda y crónica, empleando métodos estandarizados. En este sentido, existen varios estudios enfocados en los impactos ambientales

ocasionados por medicamentos de varias fuentes como son; efluentes hospitalarios, industria farmacéutica, ecosistemas acuáticos y suelos de cultivos. Sin embargo, la ruta de ingreso de los medicamentos desde los hogares aún ha sido poco abordada. Las consecuencias de una eliminación inadecuada de los medicamentos domiciliarios se evidencian en los cursos de agua subterránea, lagos, ríos y en la misma agua potable que utilizan las personas.

Un estudio reciente en Serbia demostró que los principios activos de las tabletas anticonceptivas causaron la feminización de diversas variedades de peces mientras que, la presencia de antibióticos en el agua se ha asociado al desarrollo de resistencia a los mismos por parte de los seres vivos que habitan el medio acuático (Paut Kusturica et al., 2016). Además, la fauna acuática consume los medicamentos diluidos que se bioacumulan en sus tejidos grasos y el índice de toxicidad se biomagnifica. Mientras que, los antineoplásicos en las vías de agua pueden perjudicar la vida acuática o contaminar el agua potable. En el caso de los desinfectantes no se deben desechar en las vías del agua a menos que se diluyan adecuadamente. Es necesario señalar que, cuando se queman medicamentos a baja temperatura o en recipientes abiertos pueden liberarse contaminantes tóxicos a la atmósfera.

Impactos sociales

El incorrecto almacenado de los medicamentos eleva los riesgos de toxicidad y envenenamientos accidentales de niños y mascotas, como también las posibilidades de reducción en la potencia de los productos (Paut Kusturica et al., 2016). El acopio de remedios sin sus cajas o blisters originales puede también ocasionar que las personas ingieran el producto incorrecto.

Cuando la eliminación de los medicamentos vencidos en el ámbito domiciliario se produce de modo incorrecto puede conducir a que productos vencidos o en mal estado sean objeto de prácticas para comercializar en el mercado informal con potencial riesgo para los consumidores al desconocer su procedencia, constituyendo un verdadero peligro en algunos países, las personas que se dedican a buscar en los basureros.

En cuanto a la eliminación inadecuada en abastecimientos de agua o fuentes locales que utilizan las comunidades o la fauna silvestre de las cercanías se corre el riesgo de contaminación de residuos de medicamentos con fecha vencida o prácticas inadecuadas de desecho que conllevan un riesgo de salud pública, como son: los antibióticos, antineoplásicos y desinfectantes no biodegradables en el sistema de alcantarillado pueden matar las bacterias necesarias para el tratamiento de las aguas residuales.

Al no contar con lugares adecuados de desecho y personal capacitado para supervisar la eliminación, las preparaciones farmacéuticas no deseadas no presentan peligros si se almacenan en lugares secos. Sin embargo, si se guardan en su envase original existe el riesgo de que se revendan. La mejor solución es almacenarlas en tambores e inmovilizarlas.

Descripción de tratamiento y disposición final

Los procesos de tratamiento para los residuos provenientes de la industria farmacéutica y medicamentos caducos van encaminados a reducir el volumen, separar componentes, disminuir la toxicidad y recuperar tanto material como sea posible. Los métodos de tratamiento y disposición recomendados por la Environmental Protection Agency (EPA) de los E.U.A. y la Environmental Protection Authority de Victoria Australia, para los residuos farmacéuticos, en apego a sus propiedades tóxicas son los Tratamientos físicos y químicos, la Solidificación, la Disposición en relleno sanitario normal, el Confinamiento e Incineración (Figura 2). Es necesario señalar que, actualmente no existe una tecnología para estabilizar completamente todo tipo de residuo peligroso. Por lo que, se debe considerar la naturaleza física y química de la sustancia a procesar, así como los productos que se pueden generar como resultado del tratamiento.

Para la selección de algún tratamiento se involucra la naturaleza del residuo, las características que se desean de los productos de tratamiento, la adecuación de las alternativas, consideraciones económicas, financieras y ambientales, requerimientos de energía, operación y mantenimiento, los cuales deben evaluarse en forma global y particular.



Figura 2. Tipos de disposición de fármacos

La devolución al fabricante se puede realizar a todas las preparaciones farmacéuticas, especialmente los antineoplásicos. En este caso, si existen grandes cantidades de desechos farmacéuticos del mismo laboratorio y es costeable la devolución debe considerarse como primera opción, por lo que se debe dar aviso a las autoridades competentes para seguir los procedimientos establecidos. En el caso de la Incineración a altas temperaturas (por encima de los 1200°C), se recomienda para sólidos, semisólidos, polvos y antineoplásicos. Como desventajas tiene que es un método costoso, especialmente si se debe construir el incinerador.

Para la inertización, los productos se separan de sus envases originales, los medicamentos se trituran y se mezclan con agua, cemento y cal. La mezcla luego se transporta al relleno sanitario y se deposita junto con los residuos sólidos urbanos. Se puede realizar a sólidos, semisólidos, polvos, líquidos, antineoplásicos y sustancias controladas.

En el sistema de alcantarillado, no es recomendable la incorporación de productos farmacéuticos. En casos excepcionales se puede aplicar en preparaciones líquidas, jarabes y pequeñas cantidades de desinfectantes diluidos bajo supervisión.

En el caso del relleno sanitario existen varios tipos; aquellos diseñados con tecnología adecuada para desechos farmacéuticos, los controlados y los que no tienen tecnología ni control. Los últimos no son recomendables para la incorporación de productos farmacéuticos.

La quema en sitios abiertos, se emplea como último recurso para eliminar envases y blíster; mientras que, no es aceptable para fármacos. La descomposición química no es aceptable para fármacos y resulta poco práctico para cantidades superiores a los 50 kg.

Los métodos de tratamiento se han dividido en:

Tratamientos físicos: Se aplican a residuos líquidos, sólidos y gaseosos, siendo más factible en los líquidos, ya que su función primordial es la de separación y reducción de volumen. De acuerdo a sus bases físicas se clasifican en: separación por gravedad, cambio de fase, disolución y características de tamaño/adsorción/fuerza iónica. De acuerdo a las características que presentan las formas farmacéuticas, las tecnologías que más se aplican son; el encapsulamiento, filtración, floculación/sedimentación, coagulación, separación aceite/agua y el ajuste de temperatura. Su aplicación está en función del volumen del residuo (medicamento o fármaco) que se tenga para disposición.

Tratamientos químicos: Implican el uso de reacciones químicas para transformar los residuos peligrosos en sustancias menos peligrosas o inertes, así como tratamientos físicos para facilitar su separación. Tienen mejor eficiencia de estabilización de los residuos peligrosos con bajo contenido de materia orgánica. Con ellos se puede presentar la reducción de volumen, la reducción de toxicidad y la separación de contaminantes. Incluyen tecnologías como: calcinación, neutralización, oxidación, precipitación, reducción, quelación, hidrólisis y ozonización.

Mientras que, los **tratamientos biológicos** pueden ser una forma eficiente de tratamiento de sustancias peligrosas de aguas residuales provenientes de la

industria farmacéutica a bajo costo. Se utilizan para tratar los residuos que contienen una carga orgánica alta, pudiendo ser materiales orgánicos con o sin metales pesados y materiales de origen biológico, siempre y cuando no sean tóxicos para los microorganismos responsables de la degradación. También pueden emplearse una vez que los residuos farmacéuticos han sido inactivados mediante procesos físicos y/o químicos y han sido acondicionados para sujetarse a una transformación biológica. Dentro de estas tecnologías se tienen: lodos activados, lagunas de aireación, digestión anaerobia, filtros anaerobios, filtros de escurrimiento, lagunas de estabilización, biodiscos rotatorios, siembra biológica, composta y métodos enzimáticos.

Tratamientos térmicos: Constituyen uno de los medios más efectivos para disminuir el peligro potencial de muchos residuos, convirtiéndolos en una forma útil de energía. Consiste básicamente en una oxidación controlada a alta temperatura de los compuestos orgánicos para producir CO_2 y agua. También se producen sustancias inorgánicas como ácidos, sales y compuestos metálicos que se derivan del mismo residuo. La función principal de estas tecnologías de tratamiento es la disminución del volumen y la reducción de la toxicidad, aumentando las eficiencias de combustión cuando se emplean para sustancias peligrosas de bajo contenido de humedad. La industria farmacéutica de Estados Unidos y gran cantidad de países europeos emplean como tratamiento convencional la incineración de sus residuos y medicamentos caducos.

Las tecnologías que más se utilizan son la incineración con inyección de líquidos, la incineración con horno rotatorio y el de hogar múltiple. En México este tipo de tratamientos tiene poca aplicación, aún y cuando los únicos incineradores de residuos sólidos industriales que tienen autorización para operar corresponden a empresas farmacéuticas.

Las tecnologías de estabilización/solidificación, emplean aditivos para reducir la movilidad de los contaminantes, haciendo al residuo aceptable a los requerimientos de disposición en el suelo. Los residuos que se estabilizan mediante este método son líquidos y sólidos. Las principales tecnologías con que se cuenta son: encapsulamiento, solidificación en cemento, solidificación en cal, microencapsulamiento termoplástico, uso de polímeros orgánicos, autoaglutinación, vitrificación, sorbentes e inyección profunda.

Caso de estudio (SINGREMMéxico)

El Sistema Nacional de Gestión de Residuos de Envases y Medicamentos (SINGREM) es una Asociación Civil (sin fines de lucro), fundada en 2008, creada por la industria farmacéutica y apoyada por las autoridades de salud y medio ambiente para el manejo y disposición final de los medicamentos caducos y sus sobrantes, en los hogares del público usuario. El propósito de su fundación fue establecer un mecanismo incluyente, para el manejo y disposición final de los residuos de medicamentos y sus envases en manos del público, sencillo, integral y de bajo costo para el Sector (deducible de impuestos). De acuerdo a las estadísticas la devolución de medicinas caducas por las farmacias a los distribuidores aumentó de un 15 a un 80 % en el 2012; mientras que en los hogares el aumento fue de 8.8 toneladas a 157 toneladas en abril del 2013. SINGREM es financiado íntegramente por la Industria Farmacéutica, y por lo tanto, su programa de Operación y Expansión anual depende de los Recursos obtenidos de las Empresas que se adhieren a través de una cuota fijada por su Consejo.

En los contenedores SINGREM se pueden depositar: medicamentos caducos, sobrantes de tratamientos, cajas de medicamentos y envases de medicamentos, vacíos o con restos de los mismos. Actualmente, hay 4,600 contenedores especializados en 27 estados: Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Jalisco, Aguascalientes, Estado de México, Distrito Federal, Yucatán, Campeche, Michoacán, Quintana Roo, Zacatecas, Veracruz, Guerrero, San Luis Potosí, Oaxaca, Sinaloa, Colima, Coahuila, Nuevo León, Baja California, Durango, Nayarit y Chiapas.

La recolección se lleva acabo por medio de contenedores, que se ubican preferentemente en farmacias que cumplen con el programa del SINGREM. Son diseñados específicamente para garantizar que los medicamentos caducos y sus envases no se desvíen al mercado ilegal.

Los establecimientos participantes se caracterizan por contar con el distintivo de Farmacia Adherida al Plan de Manejo. Cuenta con un plan de recolección periódica de los residuos, y asegura su destrucción final a través de terceros autorizados, de la forma más ambientalmente adecuada cumpliendo con la regulación aplicable por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

(SEMARNAT). Los residuos recolectados, son sometidos a procesos físicos de trituración y más tarde enviados a destino final por coprocesamiento en Horno Cementero. El concepto de coprocesamiento consiste en la destrucción térmica con ganancia de energía, esto es, que a la par que el material es destruido, la energía contenida en el mismo es aprovechada para otro fin. En el caso del Plan de Manejo de SINGREM, se busca que los residuos recolectados, sirvan como “combustible alterno” a los diferentes hornos cementeros, autorizados para este fin.

SINGREM es una organización creada como reflejo del compromiso social y medio ambiental de la Industria Farmacéutica establecida en México, y es por ello que todas las actividades de la organización están sujetas al marco de un Plan de Manejo registrado ante SEMARNAT con el No. 09-PMR-VI-0008-2008, siendo el primer Plan de Manejo Sectorial Registrado, y teniendo como características reglamentarias las de ser un Plan de Manejo privado, colectivo y nacional. En la Figura 3 se observa la secuencia de operación desde la selección de los medicamentos, su depósito en los contenedores hasta su destino final.



Figura 3. Secuencia de operación desde el depósito de residuos de medicamentos en el contenedor hasta su destino final

Es de considerar que un gran porcentaje de la población desconoce cuál debe ser la disposición final correcta de los medicamentos caducos, por lo que éstos son tirados a la basura o bien son desechados en el drenaje, lo que ocasiona, de acuerdo a diversos estudios, una grave contaminación al suelo, al agua y al aire. De ahí la relevancia de hacer una mayor difusión de lo que se debe hacer con este tipo de medicamentos.

Dentro de los beneficios del SINGREM para los usuarios de medicamentos, se encuentra el hecho de que les brinda una opción práctica para una disposición final, ambientalmente adecuada, de sus residuos de medicamentos. Mientras que para los actores de la cadena de valor del medicamento; les permite cumplir con la Ley Vigente, refrendo del Compromiso de Responsabilidad Social y Ambiental y, en el mediano plazo será una opción ambientalmente adecuada para la gestión integral de todos los residuos de medicamentos que se generen a lo largo de la cadena de valor.

Conclusiones

El presente capítulo muestra el daño potencial de los medicamentos caducos tanto en la salud humana y animal, como en el agua y en el ecosistema en general. Además, el número de medicamentos desechados fomentan el mercado ilegal de los mismos. La correcta disposición y eliminación de medicamentos vencidos de uso domiciliario protege tanto a los integrantes de la familia como a los ecosistemas. En México SINGREM es una empresa socialmente responsable que se encarga de la recolección de los medicamentos caducos de los hogares para su posterior tratamiento mediante la cogeneración.

Es necesario señalar que, en las condiciones actuales de México los tratamientos fisicoquímicos son los más adecuados, debido a que, provocan inactivación de residuos, disminuyen su peligrosidad y los dejan aptos para para disponerlos en un relleno sanitario, bajo las especificaciones que marca la autoridad. Existe una disponibilidad limitada de planes de manejo, debido a que no ha sido publicada la Norma Oficial Mexicana que confiere la obligatoriedad al trámite de registro de los mismos, cuestión que impide contar con una visión amplia del manejo actual de los residuos de medicamentos y fármacos en México (Arce Palacios et al., 2013).

Referencias Bibliográficas

- Arce Palacios C, Ordaz Guillen MYL, Flores Martínez F. (2013). Situación actual de los planes de manejo de residuos relacionados con farmacias y medicamentos registrados ante la SEMARNAT. [tesis de maestría en Internet] [México]. Instituto Politécnico Nacional.
- Arriola-Peñalosa, M. A. (2015). El papel de la regulación sanitaria en el uso racional de medicamentos. *Gaceta Médica de México*, 151(5), 690-698.
- Atencion.usuarios@inegi.org.mx Estadísticas a propósito de la industria farmacéutica Impreso en México Printed in México
- Avalos-Ruvalcaba, T. M., Becerra-Verdín, E. M., Castañeda-Martínez, A., & Figueroa-Morales, J. R. (2017). Implicaciones, acceso y costo de medicamentos en México Paradigma económico pendiente. *Atención Familiar*, 24(2), 87-90.
- <https://www.paho.org/es/emergencias-salud/directrices-seguridad-para-desecho-productos-farmaceuticos>
- Manzollillo B. González M. (2019). Disposición inadecuada de medicamentos por pacientes o consumidores en su hogar: Una revisión sistemática. *Gac Méd Caracas*, 127(2):108-122
- Organización Mundial de la Salud. Seguridad de los medicamentos: reacciones adversas a los medicamentos. OMS, Estados Unidos, 2007. <http://www.oms.org.es/prensa/ram15082007.html>
- Principales residuos de medicamentos generados en los hogares y su potencial ecotóxico en Tuxpan, Veracruz | 1-12
- Sánchez-González, Elizabeth Guadalupe, Espinosa-Contreras, Cynthia, García-Domínguez, Juan Carlos, & Hernández-Abad, Vicente Jesús. (2013). Diseño e implementación de un programa de recolección y clasificación sistemática de medicamentos no útiles en un hospital de tercer nivel. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 44(2), 46-54.
- Secretaría de Salud, Ley General de Salud [Internet] México, 2000. http://www.salud.gob.mx/unidades/cgins/insalud/publica/lgs/Ley_Salud.pdf
- Secretaría de Salud. 2017. Medicamentos caducos. [Internet]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168198/cartel_medicamentos_caducos.pdf.
- Zanabria-Pérez, F. J., Alanís Méndez, J. L., Pech-Canché, J. M., & Solís-Maldonado, C.

CAPÍTULO 20

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA DE EXTRACTO METANÓLICO DE TAGETE LUCIDA (YERBANÍZ) SOBRE CEPAS MULTIFARMACORRESISTENTES

Catalina Rivas-Morales¹, Fernanda Godínez-Herrera², David Gilberto García-Hernández³, Edelia Claudina Villarreal-Ibarra⁴, Catalina Leos-Rivas⁵

Resumen

Existe un registro del uso de las plantas medicinales en México desde la época prehispánica, volviéndolo una práctica reconocida y estudiada en las antiguas civilizaciones de la región. Con el tiempo, esta práctica evolucionó adaptando e integrando saberes de diferentes culturas, esto como resultado de los procesos de colonización, migración y globalización ocurridos en el territorio. Actualmente, nos encontramos ante alteraciones genéticas en bacterias y otros microorganismos, capaces de dotarlos de diferentes mecanismos de resistencia a los fármacos antimicrobianos. Por lo tanto, se propone el uso de plantas medicinales como una alternativa con fines de terapia para sustituir a los fármacos antimicrobianos, deteniendo así el problema mundial. El propósito de la investigación es la evaluación del extracto metanólico de *Tagetes lucida* (Yerbaníz) sobre bacterias Gram negativas (*K. pneumoniae*, *E. coli*, *A. baumannii*, y *P. aeruginosa*) y Gram positiva (*E. faecalis*) con multifarmacorresistencia. Se realizó la obtención del extracto por maceración, el tamizaje fitoquímico por pruebas coloridas y se evaluó la actividad antimicrobiana por el método de difusión en pozo.

¹ Catalina Rivas-Morales, Profesor Titular tiempo completo, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. catalina.rivasmr@uanl.edu.mx

² Fernanda Godínez-Herrera, estudiante de Maestría, Facultad de Ciencias Biológicas UANL. fergodisherre@gmail.com

³ David Gilberto García-Hernández, Profesor Asociado tiempo completo, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. David.garciahrzgr@uanl.edu.mx

⁴ Claudina Villarreal-Ibarra, Profesor Titular tiempo completo, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Popular de la Chontalpa. edelia.villareal@upch.mx

⁵ Catalina Leos-Rivas, Profesor titular tiempo completo Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. catalina.leosrs@uanl.edu.mx (autor correspondiente)

Se obtuvieron halos de inhibición en el extracto de *T. lucida* (Yerbaníz) en cuatro de las bacterias probadas (*K. pneumoniae*, *E. coli*, *E. faecalis*, y *P. aeruginosa*) y la presencia de esteroides, cumarinas, flavonoides, taninos y carbohidratos. El extracto de *T. lucida* puede ser una alternativa para combatir estos microorganismos farmacorresistentes.

Palabras claves. *Bactericida, plantas medicinales, yerbaníz, tratamiento alternativo, tamizaje fitoquímico*

Introducción

La manifestación de infecciones causadas por agentes patógenos se remonta a casi el inicio de los tiempos, pese a esto, no fue hasta hace más de tres siglos, con el descubrimiento del primer microscopio, que se logró identificar a las bacterias como agente causante de infección. A pesar de dicho descubrimiento, el registro de uso de medicinas o remedios contra los efectos causados por las infecciones data de antes de 1500 a.C. por civilizaciones antiguas (Regino, 2022).

Los egipcios son considerados pioneros en el área médica, brindándonos textos médicos; conteniendo “recetas” o prescripciones para diferentes “dolencias” presentadas en esos tiempos. Los ingredientes principales utilizados eran minerales, plantas, productos animales y diversos rezos; siendo el uso de plantas el primordial. En el famoso papiro Ebers se habla de una farmacia muy desarrollada, donde podemos encontrar el uso de plantas como ajo, opio, café, cannabis y variedades con propiedades purgantes. Desgraciadamente, mucho de este conocimiento se fue perdiendo al momento de traducir los papiros, llegando al punto de no saber a qué especie se vienen refiriendo (NatGeo, 2021). Así mismo la civilización griega también contaba con conocimientos médicos estructurados, teniendo como base creencias mitológicas y la inferioridad del ser ante el poder divino. Su principal consumo para realizar los rituales consistía en el uso de plantas con propiedades alucinógenas como el opio, cannabis, mandrágora, belladona y beleño (Burga & Quispe, 2022).

En México, al igual que estas civilizaciones, se tenía conocimientos médicos estructurados; el empleo de plantas medicinales era una práctica conocida y

estudiada en las civilizaciones antiguas de la región.

A pesar de que estos conocimientos datan de antes de la colonización, es una práctica que se mantiene vigente hoy en día. Podríamos decir que el conocimiento sigue “vivo” en las diversas al país; manteniéndolo como un legado que se pasa de generación en generación. En el X Congreso Latinoamericano de Plantas Medicinales, la investigadora mexicana y profesora de la Facultad de Ciencias de la UNAM, Abigail Aguilar Contreras, menciona “Ellos son los curanderos y las curanderas que tienen el conocimiento que en el aula universitaria no tuvimos”, refiriéndose al conocimiento que poseen en cuestión de la implementación de las plantas para tratamientos médicos (Peralta, 2022).

En la actualidad, contamos con métodos como los antibióticos para combatir infecciones microbianas, los cuales tienen como función evitar o aplazar el crecimiento de microorganismos en los humanos, animales y plantas. Aunque en su momento llegaron a ser un método innovador y altamente efectivos el uso innecesario de ellos, al igual que la mala administración de dosis y tiempos de medicación, han llegado a generar una resistencia en los microorganismos (CDC, 2020). Esta resistencia a los antimicrobianos (RAM) aparece como respuesta a la adaptación en bacterias, virus, hongos y parásitos, dando como resultado una ineficiencia en antibióticos y otros medicamentos antimicrobianos, dando como resultado un incremento en el riesgo de propagación de enfermedades, el incremento de aparición complicaciones en las enfermedades e incluso la muerte (OMS, 2021).

La Organización Mundial de la Salud (2021) declaró la resistencia a los antimicrobianos como una de las principales amenazas a la salud pública, haciendo énfasis en que esta resistencia amenaza los logros de la medicina moderna. Así mismo, el Grupo de Coordinación Interorganismos sobre Resistencia a los Antimicrobianos (IACG) de las Naciones Unidas enfatizó, en que, si no se toman medidas adecuadas, las enfermedades farmacoresistentes podrían causar 10 millones de defunciones anuales en 2050 y ocasionar que la economía se vea perjudicada a tal punto de causar una crisis financiera mundial, estimando que para el 2030, la farmacoresistencia suma en pobreza extrema a hasta 24 millones de personas.

Antecedentes

En México, el uso de plantas medicinales a través de la medicina tradicional es ancestral. Se utilizan las diferentes partes de la planta, según sea la afectación o la receta en cuestión. Lo más común es usar las hojas y las flores y esporádicamente, el tallo o la raíz. Las plantas medicinales se consumen directamente o pueden prepararse como infusiones o en presentación homeopática (Guzmán et al., 2017).

Planta estudiada *Tagetes lucida*

Tagetes lucida, también conocida como yerbanizo pericón, es nativa de México y Guatemala, donde crece en llanos, campos y a orillas de las carreteras; también se le ha encontrado en zonas de bosques templados, la taxonomía e imagen de la planta se muestran en la Tabla 1 y Figura 1 respectivamente. En la república mexicana se puede encontrar en los estados de climas templados, como por ejemplo en zonas de bosque pino-encino, selva baja caducifolia y zonas de transición, donde crece silvestremente (INAH, 2019).

El yerbaníz es una hierba permanente que llega a medir 80 cm de alto, tiene tallos glabros medianamente ramificados desde la base, y sus hojas son enteras, sésiles, de forma linear a oblanceoladas, con un margen aserrado y el ápice redondeado. Las inflorescencias son cabezuelas agrupadas en corimbos, estos contienen flores de color amarillo ligadas de 3 a 4 y en el disco de 5 a 8, las cuales al momento de estrujarse segregan un olor característico a anís. El fruto tiende a ser una cipsela negruzca linear claviforme con un vilano de dos escamas aristiformes. Su temporada de floración radica desde septiembre hasta noviembre (Calderón & Jerzy, 2010).

El yerbaníz se ha utilizado a lo largo de los años como planta medicinal para problemas digestivos como cólicos intestinales, diarrea, disentería, parásitos, flatulencias, vomito, empacho y tifoidea. También, se tiene registro de su uso para contrarrestar padecimientos del sistema circulatorio como son las varices, en problemas respiratorios como resfriados y asma, y a su vez para problemas ginecológicos, ya que tiene propiedades abortivas. Cabe mencionar que en algunas culturas se sigue utilizando para los temazcales y las “limpias”. En el área de investigación médica se han realizado estudios con ratones para tratar padecimientos relacionados con la ansiedad, donde se corroboró que las propiedades del yerbaníz sirven como ansiolítico y sedante-hipnótico (EL Universal, 2021).

Tabla 1. Taxonomía de *Tagetes lucida*

Figura 1		Descripción botánica	
		Reino	<i>Plantae</i>
		Clase	<i>Magnoliopsida</i>
		Orden	<i>Asterales</i>
		Familia	<i>Asreraceae</i>
		Tribu	<i>Tageteae</i>
		Género	<i>Tagetes</i>
Especie	<i>Tagete lucida</i>		

Tagetes lucida

Especies Microbianas Multifarmacorresistentes***Enterococcus faecalis***

E. faecalis corresponde a la familia Enterococcaceae, es una bacteria Gram positiva con morfología de coco (redonda) que habita en el tracto digestivo de los humanos y otros mamíferos. Es considerada una bacteria inmóvil (ya que no contiene flagelo), anaerobia facultativa y fermentadora de glucosa sin producir gas. Una de sus características principales es su habilidad de vivir en ambientes extremos de pH (9,6) y de concentraciones elevadas de sal, así como, también, sobrevive a cambios abruptos de temperatura y estados de deshidratación (Torres, 2022).

Presencia de resistencia

En la primera década de los 2000, aproximadamente un 5 % de los aislamientos que se obtuvieron de *E. faecalis* mostraban resistencia a vancomicina. Esta resistencia se debe a la presencia de los fenotipos VanA y VanB, los cuales vienen siendo genes de resistencia conjunta de la vancomicina y la teicoplanina (Moosavian et al., 2018).

Escherichiacoli

E. coli corresponde a la familia Enterobacteraceae, son bacilos Gram negativos no esporulados, anaerobios facultativos. Siendo la bacteria más abundante en nuestro tracto gastrointestinal, generando a pocas horas después del nacimiento y considerada parte de la flora normal, también, existen 6 cepas descritas de *E. coli* como productoras de diarreas como lo son las enterotoxigénicas (ETEC), enterohemorrágicas (EHEC), entero invasivas (EIEC),

enteropatógenas (EPEC), enteroagregativas (EAEC) y de adherencia difusa (DAEC). *E. coli* también es protagonista de infecciones en el tracto urinario, siendo asociadas a catéteres (Rodríguez, 2003).

Presencia de resistencia

En la cepa 25922, se ha encontrado la presencia de los genes de resistencia *murA* y *uhpT*, los cuales brindan resistencia a la fosfomicina, amoxicilina y cefalosporinas de segunda y tercera generación (Takahata et al., 2010).

Pseudomonas aeruginosa

P. aeruginosa corresponde a la familia Pseudomonadaceae, es un patógeno ubicuo, oportunista, Gram negativo, con motilidad unipolar. Su morfología consta de una forma similar a la de un bastón, tiene un tamaño de entre 1.5 a 5 μ de largo y 0.5 a 1 μ de diámetro, cuenta con un flagelo que le permite movilidad. Su temperatura óptima de crecimiento varía desde los 20°C a los 40°C, siendo capaz de tolerar los cambios abruptos de extremos de temperatura a diferencia de otras especies de *Pseudomonas*. Otra característica que define a esta especie es su capacidad por producir una variedad de pigmentos, como lo son la piocianina (de color azul verdoso), la pioverdina (pigmento fluorescente de color verde amarillento) y la piorrubina (de color rojo). Como método de transmisión tenemos el contacto con piel lesionada o reblandecida, así como las mucosas al contacto con el agua u otros objetos contaminados. Otro mecanismo de transmisión es la inhalación de bioaerosoles o fluidos contaminados (Paz et al., 2019).

Presencia de resistencia

La cepa 27853 contiene mutaciones en los genes cromosomales. Estas mutaciones le ayudan al patógeno a obtener resistencia a penicilinas, cefalosporinas y monobactámicos, y a su vez, a los carbapenémicos gracias a la formación de biopelículas y producción de pili tipo IV o también conocido como T4P (Perez, 2020).

Acinetobacter baumannii

A. baumannii corresponde a la familia Moraxellaceae, son bacilos o cocobacilos Gram negativos mayormente encontrados en parejas, son no fermentadores, no

esporulados, y aerobios estrictos. Mantienen una temperatura óptima entre 33°C a 35°C. Su papel predominante es como agente causal de la neumonía, volviéndose la causa más común de morbilidad infecciosa y mortalidad, afectando a pacientes en Unidades de Cuidados Intensivos. La OMS la tiene catalogada en prioridad 1 (crítica) en la lista de los patógenos prioritarios, ya que presenta una resistencia a carbapenémicos. Siendo clasificada como uno de los seis más importantes microorganismos Gram negativos multirresistentes a nivel mundial, debido a que compromete los pulmones, sangre e infecciones posquirúrgicas, y tienen tendencia a causar brotes hospitalarios (OMS, 2021).

Presencia de resistencia

En la cepa 15308 se ha encontrado resistencia a penicilinas, cefalosporinas de primera a cuarta generación, aztreonam, carbapenémicos aminoglucosidos y fluoroquinolonas; se tiene contemplado como posible origen a esta resistencia las alteraciones de proteínas ligadoras de penicilinas, así como, la disminución de la permeabilidad de la membrana externa, mutaciones en los sitios blanco y la inactivación por enzimas modificantes (Medina, 2022).

Klebsiella pneumoniae

K. pneumoniae corresponde a la familia Enterobacteriaceae es una bacteria Gram negativa, encapsulada, no móvil, fermentadora de lactosa, anaerobio facultativo; está presente en nuestra flora normal de la piel, la boca y los intestinos. Esta especie de *Klebsiella* desempeña un importante papel como causa de las enfermedades infecciosas oportunistas, debido a su capacidad de causar infecciones severas y potencialmente mortales en pacientes sanos e inmunocomprometidos, asociándose a neumonías, infecciones en el tracto urinario, bacteriemias, abscesos hepáticos, y endoftalmitis. Se le atribuye al éxito patogénico la presencia de factores de virulencia como sistemas de captación de hierro, vías del metabolismo de la alantoína, porinas, sistemas de expulsión, fimbrias kpc, producción de polisacárido capsular y lipopolisacárido, y a su vez la presencia de genes de resistencia (Molina, 2021).

Presencia de resistencia

Otros estudios dirigidos a la cepa 700603, reportaron resistencia a penicilina, oxacilina, ampicilina, ticarcilina, mezlocilina, cefalotina, cefazolina, aztreonam, lincomicina, bacitracina, kanamicina y la vancomicina (Guevara, 2019).

Por tal motivo el objetivo de este trabajo fue “Evaluar la actividad antibacteriana de los extractos metanólicos *Tagetes lucida* sobre las cepas multifarmacorresistentes”.

Metodología

Preparación de extractos metanólicos

Se trituraron las hojas con ayuda de un mortero para dejarlo maceraren metanol de 7 a 14 d. Una vez transcurrido este tiempo, se eliminó el solvente por medio del método de destilación a presión reducida a una temperatura de 35°C, posteriormente, se utilizó una estufa de secado a 40°C para eliminar completamente el solvente.

Una vez seco, se tomaron 100 mg del extracto y se colocaron en un vial con capacidad mínima de 1 mL. Se adicionó un 1 mL de metanol para solubilizar, procedimiento que se llevó a cabo en el vórtex.

Posteriormente, en un disco, se vertieron 10 μL de extracto solubilizado. Una vez seco, se invirtió para colocar nuevamente 10 μL de extracto solubilizado. Ya que esté completamente seco el disco, se mantuvo dentro de un vial estéril.

Tamizaje fitoquímico para identificar gruposfuncionales del extracto mediante pruebas coloridas

Alcaloides

- Prueba de Dragendorff.

Se preparó 2 soluciones A y B, donde se disolvió 0.85 g de nitrato de bismuto en una mezcla de 10 mL de ácido acético glacial y 40 mL de agua. Reactivo preparado a base de una mezcla de 5 mL de la solución A y 4 mL de la solución B con 100 mL de agua. La prueba es considerada positiva al observar una coloración roja o naranja persistente por un periodo de 24 h.

Flavonoides

- Prueba del H_2SO_4 .

Se disolvieron unos cuantos miligramos del extracto en H_2SO_4 . Dependiendo de la coloración que se obtuvo se definió el contenido, amarillo para flavones, naranja guinda para flavonas, rojo - azulado para chalconas y rojo-púrpura para quinonas.

Sesquiterpenlactonas

- Prueba de Baljet.

A 2 o 3 mg de la muestra se agregaron 3 a 4 gotas de la solución mezcla la cual consistió en una solución A que contenía ácido pícrico al 1 % en etanol y una 21 solución B de NaOH al 10 %, se aceptó como un resultado positivo si se tornara de color naranja a roja oscura.

Carbohidratos

- Prueba de Molish.

A 1 o 2 mg del extracto se agregó gota a gota el reactivo de Molish (alfa-naftol al 1 % en etanol), posteriormente se agregó 1 mL de ácido sulfúrico por las paredes, esta prueba será aceptada como positiva al observar un anillo púrpura en la interfase.

Cumarinas

- Prueba de NaOH

Se disolvieron 1 o 2 mg del extracto en NaOH al 10 %, se aceptó como resultado positivo si se produce una coloración amarilla y desaparece al acidular la prueba.

Esteroles y triterpenos

- Prueba de Liebermann-Buchard.

Se mezcló gota a gota 1 mL de anhídrido acético y 1 mL de cloroformo, posteriormente se enfrió a $0^{\circ}C$ y se añadió una gota de ácido sulfúrico. Se aceptó como una prueba positiva al presentar colores azul, verde, rojo, anaranjado.

- Prueba de Salkowski.

Se colocó 1 a 2 mg en contacto con 1 mL de ácido sulfúrico, aceptándose como positiva en presencia de colores amarillo o rojo para esteroides y metilesteroides.

Oxidrilos fenólicos(taninos vegetales)

- Prueba del FeCl_3 .

Se disolvieron 1 a 2 mg del extracto en 1 mL de agua o etanol y se añadieron unas gotas de cloruro de hierro al 12.5 % en agua, se aceptó como un resultado positivo si presenta un precipitado rojo, azul-violeta o verde.

Insaturaciones

- Prueba del KMnO_4 .

Se disolvieron 1 a 2 mg de la muestra en 1 mL de agua destilada, acetona o metanol y se añadió gota a gota una solución de KMnO_4 al 2 % en agua, se aceptó como positiva si se observó decoloración o formación de precipitado café.

Activación de cepas

Se tomaron las cepas a evaluar del cepario de Química Analítica: Gram Positiva: *Enterococcus faecalis* 29212; Gram Negativas: *Klebsiella pneumoniae* 700603, *Acinetobacter baumannii* 15308, *Pseudomonas aeruginosa* 27853, *Escherichia coli* 25922, las cuales están conservadas en arena, y se colocan en cajas Petri con medio para la estandarización de las bacterias, es necesario que se realice un pase previo en caldo nutritivo. Por lo tanto, se prepararon varios tubos de cristal con un volumen de 4 mL de Caldo Müller Hinton en la campana de flujo laminar; estos se mantuvieron por 24 h en la incubadora como prueba de esterilidad. Pasado el tiempo se realizó un pase de cada una de las bacterias en la campana de flujo laminar, con el flujo encendido, para los cuales se llevó a cabo la metodología siguiente: Esterilizar el asa bacteriológica en el mechero, tomar una asada del vial en conservación (tubo inclinado) e inocular un tubo de cristal previamente preparado; este proceso se repetirá para cada una de las cepas de bacterias a evaluar. Los tubos inoculados se incubaron por un periodo de 24 h a 36°C.

Escalamiento McFarland

Pasadas las 24 h de incubación de los tubos activados, se tomó una lectura a 600 nm para obtener la absorbancia inicial. Partiendo de la absorbancia inicial, dentro de la campana de flujo previamente esterilizada, se tomó un tubo de cristal con caldo nutritivo Müller Hinton y se agregó inicialmente 100 μL del tubo activado, este procedimiento se repitió hasta que se obtuvo una lectura de 0.100 a 0.110 (Escalamiento McFarland a 1×10^6 UFC/mL).

Difusión en placa por discos

Para realizar la inoculación de las cajas Petri, se realizó un extendido en placa mediante la toma de 100 μL de las cepas estandarizadas al tubo 0.5 de la escala de McFarland y extendiendo con un asa Digrafsky, posterior a eso, se colocaron 5 discos en el agar uno al centro con metanol, considerándolo control negativo, y 4 alrededor con las diluciones de los extractos. Para concluir se llevaron a incubar a 36°C por 24 h para poder realizar el análisis de los resultados.

Análisis y discusión de los resultados

Tamizaje fitoquímico para identificación de grupos funcionales en los extractos mediante pruebas coloridas

En el tamizaje fitoquímico del extracto metanólico de *Tagetes lucida* (Yerbaniz) se identificaron los grupos funcionales, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tamizaje fitoquímico del extracto metanólico de la planta en estudio.

Pruebas fitoquímicas	T. lucida (Yerbaniz)
Esteroles y Triterpenos	+
Cumarinas	+
Sesquiterpenlactonas	-

Continuación Tabla 2.

Pruebas fitoquímicas	T. lucida (Yerbaníz)
Quinonas	
Saponinas	-
Flavonoides	+
Taninos	+
Carbohidratos	+
Alcaloides	-

Difusión en placa por discos

Se comprobó la actividad antimicrobiana de *T. lucida* (Yerbaniz) en las cepas *A. baumannii* 15308, *K. pneumoniae* 700603, *P. aeruginosa* 27853, *E. faecalis* 29212 y *E. coli* 25922, cepas que presentan actividad farmacorresistente. El método que se utilizó fue difusión de placa por pocillos, donde se midieron los halos de inhibición de cada extracto en cada cepa; procedimiento realizado por duplicado, estos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Halos de inhibición del extracto metanólico de *T. lucida* de sobre cepas multifarmacorresistentes.

Cepas bacterianas	Inhibición (mm)
<i>A. baumannii</i> 15308	2 + .02
<i>K. pneumoniae</i> 700603	0 + .02
<i>P. aeruginosa</i> 27853	10 + .02
<i>E. coli</i> 25922	2 + .02

Continuación Tabla 3...

Cepas bacterianas	Inhibición (mm)
<i>E. faecalis</i> 29212	2 + .02

Se realizaron pruebas fitoquímicas para la observación de metabolitos presentes en los extractos metanólicos de *T. lucida* (Yerbaniz), planta de uso común en la medicina tradicional, arrojando resultados donde se observan metabolitos secundarios como esteroides, cumarinas, taninos, alcaloides, carbohidratos, en un trabajo realizado por Gutiérrez et al. (2018) se reportó la presencia de flavonoides y fenoles en el extracto hidroalcohólico.

Se comprobó la actividad antimicrobiana de los extractos metanólicos de *T. lucida* (Yerbaniz) en bacterias que presentan multifarmacorresistencia. Para comprobar las resistencias adquiridas se realizó un antibiograma en las bacterias Gram negativas (*A. baumannii*, *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa* y *E. coli*) y Gram positiva (*E. faecalis*). Partiendo de los resultados obtenidos se realizó pruebas para la evaluación de actividad de los extractos metanólicos por medio del método de difusión de placa por pocillos, arrojando resultados positivos por parte del extracto de *T. lucida* (Yerbaniz) en 4 cepas utilizadas (*A. baumannii*, *E. faecalis*, *P. aeruginosa* y *E. coli*), a su vez, R. Torres Martínez y colaboradores (2022) reportaron actividad en cepas multifarmacorresistentes de *P. aeruginosa* y *S. aureus* del aceite esencial de *T. lucida* reafirmando que los metabolitos de la planta contribuyen a combatir cepas con resistencias adquiridas. Partiendo de los resultados se realizó un descarte de extractos para proceder a buscar la CMI en el extracto de *T. lucida* en las cepas *A. baumannii* 15308, *P. aeruginosa* 27853, *E. faecalis* 29212 y *E. coli* 25922.

Conclusión

El extracto metanólico de *T. lucida* (Yerbaniz) mostró actividad sobre las cepas farmacorresistentes: *Acinetobacter baumannii* 15308, *Pseudomonas aeruginosa* 27853, *Escherichia coli* 25922 y *Enterococcus faecalis* 29212 y la presencia de esteroides, cumarinas, flavonoides, taninos y carbohidratos, estos metabolitos secundarios pueden contribuir a la actividad biológica de esta planta. Por lo tanto, este extracto puede ser una alternativa y/o coadyuvante para el tratamiento de enfermedades producidas por estos microorganismos multifarmacorresistentes.

Referencias bibliográficas

- Burga Muñoz, R. B., & Quispe Chilón, M. E. (2022). Análisis de la utilización de plantas medicinales para enfermedades fúngicas en la población de Shaullo Chico-Baños del Inca, Cajamarca 2022.
- Calderón de Rzedowski, G., & Jerzy Rzedowski (2010). Flora fanerogámica del Valle de México. Pátzcuaro: Instituto de Ecología/CONABIO. p. 923. ISBN 978-607-7607-36-6.
- CDC. (2020). Preguntas y respuestas sobre el uso de antibióticos | Prescripción y uso de antibióticos|CDC. Recuperado 22 de enero de 2023, de <https://www.cdc.gov/antibiotic-use/sp/should-know.html>
- El Universal. (2021, 16 junio). ¿Qué es el yerbaníz y cuáles son sus beneficios?: Una planta con múltiples beneficios. El universal. Recuperado 16 de enero de 2023, de <https://eldiariodecoahuila.com.mx/2021/06/17/que-es-el-yerbaniz-y-cuales-son-sus-beneficios/>
- Guevara Peralta, G. E. (2019). Determinación de carbapenemasas KPC y OXA-48, que fenotípicamente pertenecen al grupo de las serincarbapenemasas, en cultivos de *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae*, mayo-julio, Trujillo 2018.
- Gutiérrez Gaitén Y., Scull Lizama R., García Simón G., Montes Álvarez A., (2018). Pharmacognostic, phytochemical and biological evaluation of a hydroalcoholic extract of *Tagetes lucida* Cavanilles. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 23(2)
- Guzmán Maldonado, S. H., Díaz Huacuz, R. S., & González Chavira, M. M. (2017). *Plantas Medicinales La Realidad de una Tradición Ancestral*. SAGARPA. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_folletoinformativo/1044_4729_Plantas_medicinales_la_realidad_de_una_tradici%C3%B3n_ancestral.pdf
- INAH. (2019). Pericón. MEDIATECA. Recuperado 16 de enero de 2023, de https://lugares.inah.gob.mx/en/museos-inah/museo/museo-piezas/12917-12917-peric%C3%B3n.html?lugar_id=389
- Medina Pasion, V. (2022). Identificación de antígenos con capacidad protectora ante el reto letal con *Acinetobacter baumannii* en ratones diabetizados.
- Molina Vieira Lins, A. (2021). Revisión sistemática al respecto de la infección por *Klebsiella pneumoniae* productora de carbapenemasa en pacientes internados en terapia intensiva.
- Moosavian, M., Ghadri, H., & Samli, Z. (2018). Molecular detection of *vanA* and *vanB* genes among vancomycin-resistant enterococci in ICU-hospitalized patients in Ahvaz in southwest of Iran. *Infection and Drug Resistance*, Volume 11, 2269-2275. <https://doi.org/10.2147/idr.s177886>

- NatGeo. (2021, 20 agosto). La medicina en Egipto, así curaban enfermedades en el Antiguo Egipto. [historia.nationalgeographic.com.es. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/medicina-egipto-asi-curaban-enfermedades-antiguo-egipto_6289](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/medicina-egipto-asi-curaban-enfermedades-antiguo-egipto_6289)
- OMS. (2021, 17 noviembre). Resistencia a los antimicrobianos. Organización Mundial de la Salud. Recuperado 22 de enero de 2023, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- Paz-Zarza, V. M., Mangwani-Mordani, S., Martínez-Maldonado, A., Álvarez-Hernández, D. A., Solano-Gálvez, S. G., & Vázquez-López, R. (2019). Pseudomonas aeruginosa: patogenicidad y resistencia antimicrobiana en la infección urinaria. *Revista Chilena De Infectología*, 36(2), 180-189. <https://doi.org/10.4067/s0716-10182019000200180>
- Peralta Vázquez, C. (2022). Latinoamérica alberga toda la flora medicinal usada en la antigüedad. *Universo sistema de noticias UV*. <https://www.uv.mx/prensa/ciencia/latinoamerica-alberga-toda-la-flora-medicinal-usada-en-la-antigüedad/>
- Pérez González, Y. (2020). Determinación de la eficiencia antimicrobiana del extracto etanólico de la flor de sospó (*Pseudobombax ellipticum*) EN LAS BACTERIAS *Escherichia coli* 11229, *Escherichia coli* 25922, *Pseudomona aeruginosa* ATCC 27853, *Staphylococcus aureus* ATCC 6538.
- Regino, W. O. (2022). *Helicobacter pylori*: el descubrimiento que rompió un dogma en Medicina. *Revista colombiana de Gastroenterología*, 37(3), 334-338.
- Takahata, S., Ida, T., Hiraishi, T., Sakakibara, S., Maebashi, K., Terada, S., Muratani, T., Matsumoto, T., Nakahama, C., & Tomono, K. (2010). Molecular mechanisms of fosfomycin resistance in clinical isolates of *Escherichia coli*. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 35(4), 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2009.11.011>
- Torres-Martínez, R., Moreno-León, A., García-Rodríguez, Y. M., Hernández-Delgado, T., Delgado-Lamas, G., & Espinosa-García, F. J. (2022). *Tagetes lucida* Cav. essential oil and the mixture of its main compounds are antibacterial and modulate antibiotic resistance in multi-resistant pathogenic bacteria. *Letters in Applied Microbiology*.

Comité de revisión por pares

Dra. Damianys Almenares López

Dra. Claudina Villarreal Ibarra

Dr. Giovanni Hernández Galvez

Dr. Omar Sarracino Martínez

UNIVERSIDAD POPULAR DE LA CHONTALPA

Dr. Quetzalcóatl Cruz Hernández Escobedo

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD
JURIQUILLA, UNAM**

Erika Viviana Miranda Mandujano

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DEL ESTADO DE TABASCO

