



Coordinadores

Maria de los Angeles Camacho Ruiz  
Filiberto Briseño Aguilar  
Silvia Elena Mota Macías  
Itzel Celeste Romero Soto



Avances de la Ciencia y la  
Tecnología para el  
Desarrollo Sostenible.  
Tomo III

Investigación Permanente  
Avances de la Ciencia y la Tecnología  
para el Desarrollo Sostenible  
Tomo III



# Investigación Permanente

## Avances de la Ciencia y la Tecnología para el Desarrollo Sostenible

### Tomo III



UNIVERSIDAD DE  
GUADALAJARA  
Red Universitaria de Jalisco



C E N T R O  
UNIVERSITARIO  
DEL NORTE

#### Coordinadores

María de los Ángeles Camacho Ruiz  
Filiberto Briseño Aguilar  
Silvia Elena Mota Macías  
Itzel Celeste Romero Soto

Comité editorial

Mtro. Uriel Nuño Gutiérrez

Mtro. Juan Carlos Mercado Castellanos

Dr. José de Jesus Quintana Contreras

Dra. María de los Ángeles Camacho Ruiz

Dr. Miguel Angel Paz Frayre

Mtra. Silvia Elena Mota Macías

Mtra. Wendy Fabiola Lara Galindo

Dra. Katya González Jiménez

Dr. Alfredo Leonardo Romero Sánchez

Mtra. Daylin Ortega Carulo

Mtra. Ibis Vianey Guzmán Pinedo

Dra. Rosa María Ortega Sánchez

Dr. Guillermo Aguilar Herver

Investigación Permanente

Avances de la Ciencia y la Tecnología para el Desarrollo Sostenible.

Volumen III

Primera edición, noviembre 2024.

D. R. © 2024 Universidad de Guadalajara

Centro Universitario del Norte

Carretera federal 23, km 191, C. P. 46200

Colotlán, Jalisco, México

Tels. (+52 499) 992 1333 / 992 0110

992-2466 / 992-2467 / 992 1170

<http://www.cunorte.udg.mx/>

Alba Sinaí Huízar Márquez

Coordinación editorial

Vera Manzano

Corrección y cuidado editorial

Daniel Bautista / Prometeo Editores

Diseño y diagramación



Este trabajo está autorizado bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercialSinDerivadas 4.0

Internacional (CC BY-NC-ND) lo que significa que el texto puede ser compartido y redistribuido, siempre que el crédito sea otorgado al autor, pero no puede ser mezclado, transformado, construir sobre él ni utilizado con propósitos comerciales. Para más detalles consultese <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

ISBN Obra completa: 978-607-571-972-6

ISBN volumen III: 978-607-581-406-3

Hecho en México / Made in Mexico

## ÍNDICE

<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<i>María de los Ángeles Camacho Ruiz, Filiberto Briseño Aguilar, Silvia Elena Mota Macías, Itzel Celeste Romero Soto</i>	
<b>Digestión anaerobia de agua residual porcina en presencia de antibióticos de uso veterinario</b>	<b>12</b>
<i>Vianey Ariadna Burboa Charis, Luis Humberto Álvarez Valencia</i>	
<b>Aplicación de un sistema de electrocoagulación en aguas residuales de la industria tequilera para la eliminación de materia orgánica</b>	<b>29</b>
<i>Natalia Hernández Velázquez, María de los Ángeles Camacho Ruiz, Norma Guadalupe González Montoya, María Olga Concha Guzmán, Itzel Celeste Romero Soto, Jesús Antonio Córdova López</i>	
<b>Evaluación de un sistema de electrooxidación para la eliminación de enrofloxacina y oxitetraciclina en aguas residuales porcícolas</b>	<b>40</b>
<i>Lourdes Mariana Díaz Tenorio, Pablo Gortares Moroyoqui, Martín Emmanuel Cebreros Esquer, Luis Alonso Leyva Soto</i>	
<b>Propuesta de plan de manejo de los residuos de manejo especial (RME) para la empresa de recubrimientos integrales de tubería</b>	<b>56</b>
<i>Salma Humphreys Salas, Rocío de los Angeles García Hernández, Victor Manuel Rivera Arredondo, Bertha María Rocío Hernández Suárez</i>	
<b>Identificación y evaluación enzimática de hongos aislados de la región de Tepic, Nayarit, con alta contaminación por plásticos</b>	<b>70</b>
<i>Eduardo Antonio Trillo Hernández, Roberto Javier De la Rosa Mora, Pedro Ulises Bautista Rosales, María Marcela Robles Machuca, Leticia Casas Godoy</i>	

**Efecto del ultrasonido sobre las propiedades estructurales de películas biodegradables de almidón y fibras naturales**

**85**

*Anick Nahomi Molina Cervantes, Rocío de los Ángeles García Hernández, César Alberto Roldán Cruz, Pamela Celeste Flores Silva, Israel Sifuentes Nieves*

**Extracción de biomoléculas de alto valor del *Sargassum* spp.**

**105**

*Celestino García Gómez, Itzel Celeste Romero Soto, Elizabeth Garza Valverde, Elba González Aguayo*

**Efecto antioxidante de glicoconjugados de extracto de vísceras de pollo y glucosa**

**117**

*Juan Bautista Flores Quezada, Alma Guadalupe Villa Lerma, Roberto Rodríguez Ramírez, Rigoberto Plascencia Jatomea, Maritza Arellano Gil*

**Propuesta de plan de mantenimiento en la planta Gestamp II**

**129**

*Diego Iván Méndez Pérez, Bertha María Rocío Hernández Suárez, Rocío de los Ángeles García Hernández, Epifanio Zárate Morales, Bertha Irina Montes Galindo*

**Experiencia profesional: el caso de un centro holístico de bienestar**

**147**

*Adriana Elizabeth Morales Sánchez, Xóchitl Citlalli Morales González, Víctor Vladimir Vega Morales*

# Introducción

En un mundo donde el equilibrio entre el progreso y la preservación del medio ambiente se vuelve cada vez más crucial, la ciencia y la tecnología emergen como herramientas fundamentales para abordar los desafíos del desarrollo sostenible. En el libro *Avances de la Ciencia y la Tecnología para el Desarrollo Sostenible* se exploran investigaciones innovadoras que no solo buscan resolver problemas específicos, sino que contribuyen a la creación de un futuro más sostenible y equitativo para las generaciones venideras.

El primer capítulo, titulado “Digestión anaerobia de agua residual porcina en presencia de antibióticos de uso veterinario”, se centra en el estudio del impacto de las aguas residuales de la producción porcina en el medio ambiente, particularmente en términos de la contaminación con antibióticos, como la oxitetraciclina (OTC) y la enrofloxacina (ERX), y su influencia en la digestión anaerobia de estos efluentes. La presencia de estos antibióticos ha demostrado tener efectos negativos en la producción de metano durante la digestión anaerobia, un proceso que se considera una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Además, se observa que las concentraciones de antibióticos afectan significativamente la actividad microbiana, lo que a su vez repercute en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia y la producción de metano. Este estudio no solo busca mitigar la contaminación ambiental, sino que también apunta a promover prácticas más responsables en la industria porcina, contribuyendo así al desarrollo sostenible del sector agrícola y alimentario.

En el segundo capítulo, “Aplicación de un sistema de electrocoagulación en aguas residuales de la industria tequilera para la eliminación de materia orgánica”, se aborda el desafío ambiental generado por las vinazas, un subproducto de la producción de tequila que contiene altas concentraciones de materia orgánica y compuestos tóxicos. Estas aguas residuales representan una amenaza para el medio ambiente cuando se descargan sin tratar, contribuyendo a la salinización del suelo y la eutrofización de los cuerpos de agua. El estudio propone el uso de la electrocoagulación como un método preliminar para reducir la carga de sólidos y materia orgánica en las vinazas, que ofrecería una solución sostenible y

eficiente para minimizar su impacto ambiental. Al demostrar la viabilidad de este método, se abre la puerta a estrategias de tratamiento complementarias que podrían mejorar aún más la eficacia de la eliminación de contaminantes en este tipo de efluentes. En última instancia, este enfoque contribuye al desarrollo sostenible al proporcionar alternativas para mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la producción de tequila, promoviendo así prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente en esta industria.

El tercer capítulo, “Evaluación de un sistema de electrooxidación para la eliminación de enrofloxacina y oxitetraciclina en aguas residuales porcícolas”, continúa explorando soluciones tecnológicas para abordar la contaminación por antibióticos en aguas residuales porcinas. Los resultados muestran que el proceso de electrooxidación logra una alta eficiencia en la remoción de los antibióticos estudiados (específicamente la oxitetraciclina y la enrofloxacina), con porcentajes significativos de degradación en diferentes concentraciones y condiciones electroquímicas. Además, se comparan dos tipos de electrodos, demostrando que ambos son igualmente eficaces en la remoción de los antibióticos, lo que ofrece opciones para la implementación práctica del proceso. Este estudio no solo busca proteger la salud pública y el medio ambiente, sino que también promueve la innovación en el tratamiento de aguas residuales, fomentando así prácticas más sostenibles en la industria porcina.

En el cuarto capítulo, “Propuesta de plan de manejo de los residuos de manejo especial (RME) para la empresa de recubrimientos integrales de tubería”, se aborda la gestión de RME generados por una empresa dedicada al recubrimiento de tuberías en México, en particular en la ciudad de Poza Rica, Veracruz. Considerando la enorme cantidad de residuos generados diariamente en el país, la investigación propone un plan de manejo que no solo busca cumplir con la legislación aplicable, sino que también apunta a minimizar el impacto ambiental y proteger la salud de los trabajadores y la comunidad circundante. Este plan se desarrolla en tres etapas: identificación del proceso, análisis de la gestión actual de los residuos y establecimiento de estrategias de manejo. Se destacan medidas concretas, como el diseño de un sistema de control para capturar partículas de arena sílica, la reutilización de residuos como la pedacería de tubería de acero al carbón y aluminio para fabricar recogedores, y la valorización de residuos a través de su reutilización o tratamiento. Además, se propone una lista de presta-

dores de servicios autorizados para el manejo de residuos especiales. Este enfoque integral hacia la gestión de residuos contribuye directamente al desarrollo sostenible al promover prácticas más responsables y eficientes en la industria, reduciendo así el impacto ambiental y fomentando la economía circular.

El quinto capítulo, “Identificación y evaluación enzimática de hongos aislados de la región de Tepic, Nayarit, con alta contaminación por plásticos”, presenta una solución biotecnológica para abordar el problema de la contaminación por plásticos en el medio ambiente. La acumulación de dichos residuos representa una amenaza significativa para la sostenibilidad, pues afecta diversos ecosistemas y la salud humana. Mediante el aislamiento y caracterización de hongos provenientes de zonas altamente contaminadas por plásticos, el estudio demuestra que estos microorganismos tienen la capacidad de secretar enzimas especializadas en la degradación de polímeros sintéticos. Esta estrategia biotecnológica ofrece un enfoque prometedor para mitigar el impacto de la contaminación plástica, al aprovechar la capacidad natural de los microorganismos para degradar los materiales sintéticos. Al identificar cepas como *Aspergillus fumigatus*, *Pichia fermentans* y *Saccharomyces cerevisiae*, capaces de producir enzimas clave, el estudio abre la puerta a futuras investigaciones y aplicaciones prácticas que podrían contribuir significativamente al desarrollo sostenible, puesto que aborda uno de los problemas ambientales más urgentes de nuestro tiempo.

El sexto capítulo, titulado “Efecto del ultrasonido sobre las propiedades estructurales de películas biodegradables de almidón y fibras naturales”, se adentra en el desarrollo de materiales biodegradables mediante técnicas de modificación de almidón con fibras naturales de agave utilizando ultrasonido. Esta técnica se emplea para mejorar las propiedades de los biopolímeros y contrarrestar sus deficiencias, como la susceptibilidad al agua y la baja resistencia. El estudio revela que el ultrasonido induce cambios morfológicos y estructurales en las películas de almidón, como una mayor homogeneidad, transparencia y reducción de aglomeraciones, lo que mejora la interacción entre el almidón y las fibras de agave. Además, se observa un incremento en la cristalinidad de las muestras tratadas, lo que se traduce en una mayor estabilidad térmica y propiedades mecánicas mejoradas. Esta investigación no solo busca mejorar las propiedades de los biopolímeros, sino que también promueve el uso de

materiales alternativos a los polímeros derivados del petróleo, contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental y al fomento de prácticas más sostenibles en la industria.

En el séptimo capítulo, “Extracción de biomoléculas de alto valor del *Sargassum spp.*”, se aborda el problema de la proliferación descontrolada de algas, particularmente el *Sargassum spp.*, que afecta negativamente a las aguas de África Occidental y el Caribe. Este fenómeno no solo obstaculiza las actividades turísticas y pesqueras locales, sino que también tiene implicaciones ambientales al bloquear la luz solar y afectar la vida marina. Sin embargo, se destaca el potencial de estas algas para abordar desafíos de desarrollo sostenible a través de diversas aplicaciones, como la extracción de biomoléculas con propiedades bioactivas. Estas biomoléculas, como los fucoides, alginatos y laminarinas, no solo tienen aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, sino que también ofrecen beneficios medioambientales al absorber grandes cantidades de dióxido de carbono. La investigación se enfoca en optimizar métodos de extracción para mejorar el rendimiento y la composición bioquímica de estos biocompuestos, lo que podría conducir a la creación de nuevos productos sostenibles con impacto positivo en múltiples sectores y en la conservación del medio ambiente marino.

El octavo capítulo, “Efecto antioxidante de glicoconjungados de extracto de vísceras de pollo y glucosa”, se centra en la evaluación del potencial antioxidante de los extractos proteicos de vísceras de pollo glicados mediante la reacción de Maillard, utilizando sistemas proteína-glucosa. Se destaca la importancia de aprovechar las vísceras de pollo, que constituyen aproximadamente 30 % de los residuos generados en la industria avícola, como una fuente valiosa de proteínas. La investigación demuestra que la glicación de estos extractos proteicos con glucosa conduce a la formación de compuestos con capacidad antioxidante, lo que sugiere su posible aplicación en el desarrollo de alimentos con funcionalidad bioactiva. Esta investigación no solo busca aprovechar los residuos de la industria avícola, sino que también promueve la producción de alimentos más estables, nutritivos y con propiedades beneficiosas para la salud, con lo cual contribuye a la reducción del desperdicio de recursos y al fomento de prácticas más sostenibles en la industria alimentaria.

El noveno capítulo, “Propuesta de plan de mantenimiento en la planta Gestamp II”, se enfoca en el desarrollo de un plan de mantenimiento

sistemático para mejorar la eficiencia, eficacia y seguridad de las instalaciones industriales. A través de la identificación de fallas, análisis de causas y condiciones de operación actuales, se propone un plan integral que incluye actividades preventivas y predictivas, así como un programa de capacitación para el personal operativo y técnico. Este enfoque busca reducir los paros no planeados, optimizar los procesos de producción y prolongar la vida útil de los equipos. En términos de desarrollo sostenible, la implementación de este puede contribuir significativamente al reducir el desperdicio de recursos al evitar fallas y mantener una producción estable, con lo cual se promueve la eficiencia y la conservación de recursos naturales. Además, al fomentar una cultura de mantenimiento autónomo y mejora continua, se crea una base sólida para la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones industriales.

Finalmente, el décimo capítulo, “Experiencia profesional: el caso de un centro holístico de bienestar”, aborda el concepto *holístico* en el contexto de la salud y el bienestar, destacando la importancia de considerar a la persona en su totalidad, no solo desde la perspectiva de la enfermedad. Se hace énfasis en la medicina holística e integrativa, que centra su enfoque en el individuo, considerando aspectos como su cuerpo, antecedentes, estado mental, ánimo, condiciones de vida y entorno social. Se reconoce la necesidad de integrar terapias alternativas y complementarias en la práctica de la salud convencional, como lo sugieren estudios realizados en diferentes disciplinas de la salud. Además, se discute el impacto de la pandemia por COVID-19 en la salud mental y el bienestar, resaltando la importancia de ofrecer alternativas holísticas para abordar las necesidades emergentes de la comunidad. En este contexto, se presentan proyectos de centros holísticos que buscan promover el bienestar comunitario a través de la oferta de servicios que respondan a las necesidades locales y culturales, contribuyendo así al desarrollo de comunidades más resilientes y equitativas. En conjunto, estos capítulos reflejan la diversidad de enfoques científicos y tecnológicos que pueden contribuir al desarrollo sostenible en diferentes sectores y contextos.

María de los Ángeles Camacho Ruiz  
Filiberto Briseño Aguilar  
Silvia Elena Mota Macías  
Itzel Celeste Romero Soto

# Digestión anaerobia de agua residual porcina en presencia de antibióticos de uso veterinario

Vianey Ariadna BURBOA CHARIS•  
Luis Humberto ÁLVAREZ VALENCIA••

## Resumen

El incremento del consumo de carne de cerdo ha generado grandes repercusiones en el medio ambiente y en la salud humana. La producción intensiva de los cerdos genera grandes volúmenes de residuos sólidos y líquidos, que en la mayoría de las ocasiones no son tratados. El tratamiento anaerobio representa una mejor opción para los efluentes porcinos, ya que es menor en cuanto a la demanda de insumos y porque con él se obtiene biogás. Se llevaron a cabo cinéticas para evaluar la posible inhibición del proceso de digestión anaerobia y el efecto en la producción de metano por la presencia de antibióticos en aguas residuales porcinas. El pH del medio se mantuvo en un rango de 7.64 a 7.85 para todas las botellas. Las muestras adicionadas con oxitetraciclina (OTC) presentaron valores significativamente mayores en la remoción de ST y SVT, comparado con las muestras de ERX. El metano acumulado al finalizar la cinética con ERX (mg/L) fue de 106.1 (2.5), 90.9 (5), 69.7 (7.5) y 90.9 (10) mL, todos los valores por debajo del control. La producción de metano en la cinética adicionada con OTC (mg/L) fue de 74.1 (2.5), 108.7 (5), 93.8 (7.5) y 84 (10) mL. La presencia de antibióticos en el agua residual presenta una evidente inhibición sobre los microorganismos que participan en la digestión anaerobia, lo cual se refleja en la producción de metano.

---

• Doctora en Ciencias con especialidad en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Sonora. Dpto. Ciencias Agro-nómicas y Veterinarias, Instituto Tecnológico de Sonora. <https://orcid.org/0000-0001-7210-7219>. vburboach@gmail.com.

•• Doctor en Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Dpto. Ciencias Agronómicas y Veterinarias, Instituto Tecnológico de Sonora. <https://orcid.org/0000-0003-1809-9304>. luis.alvarez@itson.edu.mx.

**Palabras clave:** agua residual porcina, digestión anaerobia, antibióticos, metano.

## Introducción

Las aguas residuales provenientes de la producción de carne de cerdo han llevado a la acumulación de desechos sólidos sin tratar y han contaminado diferentes cuerpos de agua donde son descargados (Cervantes *et al.*, 2007). Están formadas por fracciones sólidas y líquidas (heces y orina), por el acarreado de agua de lavado (Villamar *et al.*, 2011), que se caracterizan por tener altas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos (Ding *et al.*, 2017); también contiene micro-contaminantes peligrosos como antibióticos (generalmente  $\mu\text{g/L}$  a nivel  $\text{mg/L}$  ocasionalmente) (Zhou *et al.*, 2020) usados para el control de enfermedades y como promotores de crecimientos (Liu *et al.*, 2023) y metales pesados ( $\mu\text{g/L}$  a nivel  $\text{mg/L}$ ) (Cang *et al.*, 2004). Solo entre 10 a 30 % de los antibióticos suministrados son metabolizados por el cerdo, por lo que una cantidad de antibióticos se excreta en su estado original o bien como metabolito (Cheng *et al.*, 2018). Los antibióticos son solubles en agua, a partir de la dosis suministrada puede ser excretada con la orina (90 %) y heces (75 %) (Halling-Sørensen, 2001).

Los principales grupos de antibióticos que son aplicados en cerdos son tetraciclinas, macrólidos, penicilinas, lincosamidas, aminoglucósidos, sulfonaminadas y flouroquinolonas (Kemper, 2008). Las tetraciclinas son un grupo de antibióticos con amplio espectro antibacteriano, lo que ha llevado a un uso indiscriminado en medicina veterinaria en las últimas décadas como terapéuticos o preventivos e igualmente como promotores del crecimiento (Silvestre, 1996). La presencia de oxitetraciclina (OTC) en aguas residuales genera una resistencia de los microorganismos a su acción, alergias, problemas de osificación y dentición por su acción quelante sobre el ión calcio y efectos carcinogénicos (Monnet *et al.*, 2000). La enrofloxacina (ERX) es una fluorquinolona utilizada en los años ochenta en medicina veterinaria para la prevención y el tratamiento de infecciones bacterianas (Liu *et al.*, 2017), debido a que actúa directamente en la inhibición de la DNAGirasa (Hooper *et al.*, 1997). Al actuar sobre el DNA, dichos compuestos son bactericidas, activos a muy bajas concentraciones, y muestran efecto postantibiótico (Mckellar, 1996). El uso de estos

antibióticos incrementó la tasa de resistencia y la presencia de problemas graves de salud pública (Otero *et al.*, 2000).

En México se presenta una deficiencia y carencia de tecnologías adecuadas para dar un tratamiento y disposición adecuada la descarga de aguas residuales porcinas (Cervantes *et al.*, 2007). La fuerte contaminación que estas provocan obliga al sector agroindustrial a implementar estrategias para el tratamiento de dichos efluentes, con el fin de evitar el deterioro del ambiente. El tratamiento anaerobio representa una mejor opción para su tratamiento, ya que es menor en cuanto a la demanda de insumos comparado con el tratamiento aerobio. La digestión anaeróbica es un proceso biológico que, en ausencia de oxígeno, convierte sustratos complejos (carbohidratos, líquidos, proteínas, entre otros compuestos) en biogás por acción microbiana. El proceso consta de cuatro etapas (Lim y Wang, 2013; Syuhadaa *et al.*, 2015). Por medio de la bioconversión se puede obtener beneficios para el tratamiento de residuos orgánicos, como los siguientes: generación de energía a partir del biogás, producción de fertilizantes orgánicos y regulación de emisiones de gases de efecto invernadero (Parra Huertas, 2010; Molino *et al.*, 2013). Diversos estudios han reportado la alta eficiencia de la digestión anaerobia en la eliminación de carga orgánica de 70 a 98 % (Garzón-Zuñiga y Buelna, 2014; Jiang *et al.*, 2019). Deng *et al.* (2006) reportan una remoción de N-NH<sub>3</sub> y nitrógeno total de 99.4 % y 94.3 %, respectivamente, con un reactor anaerobio para tratar agua residual porcina.

El uso masivo de antibióticos en las granjas porcinas para tratar enfermedades y mejorar el crecimiento del animal eleva significativamente la concentración de estos compuestos en sus efluentes (Ben *et al.*, 2009). Los sistemas anaerobios son reconocidos por su alto rendimiento y tolerancia hacia compuestos tóxicos; sin embargo, su utilización en aguas que contienen antibióticos y otros compuestos farmacéuticos es aún escasa y no conclusiva (Torres Arévalo y Chaparro, 2015). El objetivo fue establecer el efecto de diferentes concentraciones de ERX y OTC durante la digestión anaerobia de efluentes porcinos.

## Metodología

### Agua residual porcina, inóculo y antibióticos

El agua residual fue colectada de una granja porcina de engorda ubicada en Bácum, Sonora, México; fue centrifugada a 7000 RPM (revoluciones por minuto) por 10 minutos para separar la fracción sólida preservando la fracción líquida para las pruebas de producción de metano. El pH y la demanda química de oxígeno (DQO) en la fracción líquida fue 7.7 y  $6098 \pm 268.7$  mg/L, respectivamente. Se utilizó un lodo anaerobio sin previa aclimatación a los efluentes porcinos, que contenía 9.5 % de sólidos suspendidos volátiles (ssv) y 12.1 % de sólidos totales (ST) en peso húmedo, y fue disgregado con un tamiz de 0.425 mm antes de utilizarse como inóculo. Los antibióticos utilizados para los experimentos metanogénicos son OTC y ERX, los cuales son de uso veterinario exclusivamente. El OTC fue producido por INOVAT, Brasil (Emicina: oxitetraciclina 50 mg/L); el ERX, por FARMATEC, México (Marflox: enrofloxacina 11.5 g/100 mL).

### Ensayos de producción de metano

Se realizaron ensayos metanogénicos para evaluar el impacto de OTC y ERX durante la digestión anaerobia de la fracción líquida de aguas residuales porcinas para la producción de metano. Para llevar a cabo los ensayos se utilizaron botellas de 500 mL, con 350 mL de la fracción líquida de efluente porcino como volumen de operación, y 3 g ssv/L de lodo anaerobio como inóculo. La OTC y ERX se establecieron en concentraciones de 2.5, 5.0, 7.5 y 10 mg/L, más el control sin antibióticos. Las botellas se colocaron en un agitador a 40 °C y 130 rpm durante 32 días. El pH fue medido a cada botella al finalizar la cinética. Se evaluó la concentración de DQO, SVT y ST al inicio y final de la cinética, a las cuales se les restó la aportación de sólidos del inóculo, evaluados de acuerdo a métodos estándares (American Public Health Association, 1992, pp. 2-54). Para determinar el volumen de metano producido se utilizó el método de desplazamiento de líquido usando una solución de NaOH al 2 %. Los parámetros cinéticos se obtuvieron ajustando los datos experimentales con el modelo modificado de Gompertz (Lin y Lay, 2004), en los que (véase ecuación 1)  $P$  es la producción de metano acumulada (mL),  $P_{max}$  es la producción máxima

de metano (mL),  $R_{max}$  es la tasa máxima de producción de metano (mL/día) y  $\lambda$  es la fase lag (días). Los parámetros del modelo se estimaron mediante el ajuste de la curva global utilizando STATISTICA six sigma 7, con una mínima suma residual de errores cuadrados entre los datos experimentales y curvas del modelo.

**Ecuación 1.** Ecuación de Modelo modificado de Gompertz

$$P = P_{max} \cdot \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{2.71828 \cdot R_{max}}{P_{max}} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

## Ensayo de adsorción de antibióticos en lodo

La capacidad de adsorción de ERX y OTC del lodo anaerobio se evaluó mediante experimentos cinéticos de adsorción. Se realizaron ensayos en botellas serológicas de 120 mL con 60 mL de la fracción líquida de efluente porcino, 1 g ssv/L de lodo anaerobio y 10 mg/L de cada antibiótico. Las botellas fueron selladas con tapones de hule y sellos de aluminio. Se procedió a inyectar helio para establecer condiciones anaerobias. Las concentraciones de OTC y ERX fueron medidas a 373 y 271 nm, respectivamente, utilizando un espectrofotómetro UV-VIS.

## Cuantificación de antibióticos

Se analizó la concentración inicial y final de las muestras de agua residual de cada concentración de antibióticos (ERX y OTC) del ensayo de producción de metano. Se tomaron 2 mL de cada muestra, que fueron centrifugadas a 4300 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante fue filtrado en una membrana de 0.22  $\mu$ m y analizadas en cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC, por sus siglas en inglés) (Agilent Technologies G1311C-G4212A) con una columna Zorbax Eclipse Plus-C18 (5  $\mu$ m y 4.6 x 150 mm). La fase móvil para OTC fue de 50:50 (v/v) de ácido oxálico (0.01 %) y MeOH. Para ERX, la fase móvil está compuesta en una proporción de 70:30 (v/v) de ácido fosfórico (0.1 %) y acetonitrilo.

## Resultados y discusión

### Caracterización de agua residual de ensayo de producción de metano

En la tabla 1 se presentan los resultados de la medición de ST y SVT, los cuales revelan que la presencia de antibióticos afecta a la degradación de dichos parámetros, ya que en el control disminuyó aproximadamente 50 % de ST y 81.5 % de SVT, lo que indica una buena actividad microbiana por parte del inóculo anaerobio. Las muestras adicionadas con OTC presentaron valores superiores en la eliminación de ST comparado con las muestras de ERX. Ben *et al.* (2009) también reportan la estabilidad de un sistema de digestión anaerobia tratando efluentes porcinos adicionado con ocho diferentes antibióticos con concentraciones de 100 mg/L, los cuales no afectan el pH del sistema. La estabilidad del pH es importante para que se lleve a cabo la actividad microbiana del proceso y la degradación del sustrato, para la obtención de metano.

**Tabla 1.** Resultados de ST, SVT y pH de la cinética de producción de metano de agua residual porcina con antibióticos

Condición	SVT (g/L)	Eliminación de SVT (%)	ST (g/L)	Eliminación de ST (%)	pH final
Control inicial	6.33	-	10.13	-	7.70
Control final	3.12	50.7	5.02	50.4	7.77
OTC (mg/L)					
2.5	3.33	47.7	5.14	49.2	7.85
5.0	5.07	19.9	7.95	21.5	7.64
7.5	5.70	10.0	8.53	15.8	7.80
10	2.86	54.8	4.45	56.0	7.86
ERX (mg/L)					
2.5	5.63	11.1	9.11	10.1	7.78
5.0	5.64	10.9	9.12	10.0	7.85
7.5	4.14	34.6	6.33	37.5	7.90
10	4.92	22.3	9.28	8.4	7.83

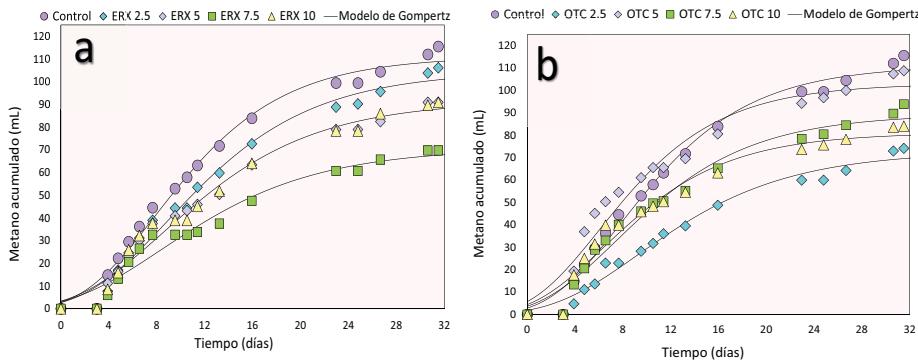
Fuente: Elaboración propia.

## **Efecto de antibióticos en la producción de metano de agua residual de ensayo de producción de metano**

Los resultados de la producción de metano muestran que la presencia de OTC y ERX en el medio afecta negativamente al proceso de digestión anaerobia. El metano acumulado al finalizar la cinética para ERX (mg/L) fue de 106.1 (2.5), 90.9 (5.0), 69.7 (7.5) y 90.9 (10) mL, lo que significa una disminución en la cantidad de metano de 8.1, 21.3, 39.7 y 21.3 %, comparada con el control (figura 1a). La producción de metano en la cinética adicionada con OTC presenta resultados más bajos de metano acumulado con respecto al control, es decir, 35.8 % (74.1 mL), 5.9 % (108.7 mL), 18.78 % (93.8 mL) y 27.3 % (84 mL) menor, para las concentraciones de 2.5, 5.0, 7.5 y 10 mg/L, respectivamente (figura 1b). Las tetraciclinas actúan inhibiendo la síntesis proteica de las bacterias (Vicente y Pérez-Trallero, 2010). Las tetraciclinas son antibióticos bacteriostáticos (Hilal-Dandan y Brunton, 2013), por lo que se les podría considerar como una de las causas por las cuales la producción de metano decreció en las cinéticas adicionas con OTC.

El proceso de digestión anaerobia es un proceso complejo que se divide en cuatro fases de degradación, donde cada fase es llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos que están en interrelación sintrófica (Bauer *et al.*, 2014). Los primeros tres grupos de bacterias son responsables de degradar agv, alcoholes de cadena corta y acetato (Gujer y Zhender, 1983). Debido a que compuestos como erx tienen un amplio efecto inhibitorio contra las bacterias Gram positivas y Gram negativas, es posible que se suprima la producción de sustratos, lo que causará también una afectación sobre los metanógenos, disminuyendo la producción metano (Bauer *et al.*, 2014).

**Figura 1.** Cinética de producción de metano por digestión anaerobia de aguas residuales porcinas con diferentes concentraciones de ERX (A) y OTC (B)



Fuente: Elaboración propia.

El efecto inhibitorio por la presencia de antibióticos se refleja en la cantidad de DQO (tabla 2) consumida del agua residual. En el caso de OTC, disminuyó 1.3, 1.7, 2.7 y 1.2 veces para las concentraciones de 2.5, 5.0, 7.5 y 10 (mg/L), respectivamente, lo que indica que la mayor eficiencia de eliminación corresponde a la concentración más alta (10 mg/L) con 41.9 %, y la menor fue de 19.6 %, correspondiente a la concentración de 7.5 mg/L. De acuerdo a la producción de metano se establece el rendimiento de metano (mL CH<sub>4</sub>/g DQO), lo cual resulta en un incremento para las concentraciones de 5.0 y 7.5 mg/L, de 1.5 y 2.2 veces mayor respectivamente comparadas con el control, y también presentan los valores más altos de eficiencia de conversión con 39.4 y 55.8 %, respectivamente. Las concentraciones de 2.5 y 10 mg/L presentaron valores cercanos al control. Por lo tanto, no se puede establecer que el incremento de la concentración de OTC es proporcional a la inhibición.

**Tabla 2.** Eliminación de DQO y productividad de metano con incubaciones microbianas adicionadas con antibióticos

Condición	DQO eliminado (g)	Eficiencia de eliminación de DQO (%)	Producción de metano (mL)	Rendimiento de metano (mL CH <sub>4</sub> /g DQO)	Eficiencia de conversión (%)
Control	1.15	54.1	115.5	100	25
OTC (mg/L)					
2.5	0.83	39.0	74.1 (-35.8)*	88.95	22.2
5.0	0.68	32.3	108.7 (-5.8)	157.65	39.4
7.5	0.42	19.6	93.8 (-18.7)	223.33	55.8
10	0.89	41.9	84.0 (-27.2)	93.75	23.4
ERX (mg/L)					
2.5	0.48	22.6	106.1 (-8.1)	219.66	54.9
5.0	0.56	26.2	90.9 (-21.2)	162.32	40.5
7.5	0.74	34.9	69.7 (39.6)	93.49	23.3
10	0.41	19.3	90.9 (-21.2)	220.09	55.0

\*Porcentaje de disminución en la producción de metano con respecto al control.

Fuente: Elaboración propia.

Estudios previos han reportado una reducción en la producción de metano durante la digestión anaerobia del estiércol porcino en presencia de tetraciclinas como OTC y clortetraciclina (CTC) (Sanz *et al.*, 1996; Álvarez *et al.*, 2010). El efecto inhibitorio ejercido por estos compuestos con concentraciones como 3.1 mg OTC/L. Arikán *et al.* (2006) mostraron 27 % de reducción en la producción de CH<sub>4</sub>. Sin embargo, algunos estudios han informado ausencia de inhibición en un rango de concentraciones de OTC de 125-250 mg/L (Lallai *et al.*, 2002). Este resultado se podría atribuir a la aclimatación del inóculo utilizado, ya que fue recolectado de la biomasa de un digestor anaerobio que estaba tratando a estiércol de cerdo que contiene antibióticos. Por otro lado, Sanz *et al.* (1996) mencionan que los antibióticos como CTC pueden alterar la producción de biogás durante la digestión anaerobia, ya que presentan una disminución en la producción de metano de 20 % a 80 % cuando las concentraciones de CTC aumentaron de 2 a 150 mg/L. Las inconsistencias pueden ser el resultado de los diferentes orígenes de los lodos utilizados y las condiciones operacionales mantenidas en cada trabajo, fuente del sustrato, relación inóculo/

sustrato, concentración de antibiótico, tamaño del reactor y tipo de operación (Álvarez *et al.*, 2010).

Los resultados para ERX presentan valores menores de DQO eliminado comparado con OTC (tabla 2). Con respecto al control, una disminución de 2.4, 2.0, 1.5 y 2.8 veces de DQO eliminada y eficiencias de eliminación de DQO de 22.6, 26.2, 34.9 y 19.3 % para las concentraciones de 2.5, 5.0, 7.5 y 10 mg/L, respectivamente. La menor producción de metano es de 69.7 mL dada por la concentración de 7.5 mg/L; asimismo, el rendimiento de metano (93.49 mL CH<sub>4</sub>/g DQO) y la eficiencia de conversión (23.3 %) es la menor comparada con las otras concentraciones probadas de ERX. En contraste, las concentraciones de 5.0 y 10 mg/L tuvieron una producción de metano de 90.9 mL; a pesar de la concentración de 10 mg/L, el rendimiento de metano fue 2.2 veces mayor con respecto al control, mientras que la concentración de 5.0 mg/L solo fue 1.6 veces mayor comparada al control. La eficiencia de conversión para 2.5 (54 %) y 10 (55 %) mg/L presentaron valores similares. Por lo tanto, a pesar de la adición de antibióticos, que deberían cambiar la actividad microbiana debido a sus efectos bacterianos, se pueden observar tres patrones: un impacto positivo donde se mejoró la producción de metano en presencia del antibiótico, un impacto negativo donde el antibiótico inhibió la producción de metano y, por último, que no generó ningún cambio la presencia del antibiótico. La comprensión de los diferentes mecanismos entre los tres patrones de producción de metano puede representar un hallazgo sobresaliente que debería ser importante para la comprensión integral de la producción de metano en la digestión anaerobia, sobre todo en las interacciones microbianas (inhibición, represión, aceleración y dependencia) (Mustapha *et al.*, 2016).

**Tabla 3.** Parámetros cinéticos obtenidos a partir del modelos de Gompertz aplicado a los cultivos metanogénicos

Condición	Pmax (mL)	Fase lag, λ (Días)	Rmax (mL/día)	R <sup>2</sup>
Control	111	43.7	0.282	0.993
OTC (mg/L)				
2.5	104.6	48.3	0.234	0.990
5.0	90.8	33.7	0.198	0.976
7.5	70.7	22.8	0.146	0.987
10	91.6	33.5	0.196	0.981

ERX (mg/L)				
2.5	72.7	51.6	0.156	0.992
5.0	102.9	8.53	0.277	0.990
7.5	89.3	25.1	0.214	0.9817
10	81	10.1	0.209	0.987

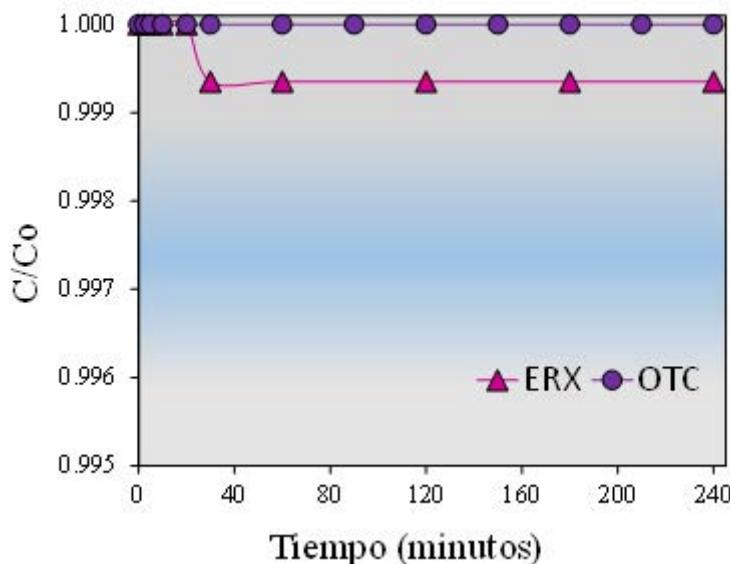
Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros cinéticos del modelo de Gompertz también fueron influenciados por la presencia de los antibióticos y sus diferentes concentraciones (tabla 3). Los resultados del control, que no contenía antibióticos, fueron de  $R_{max}$  de 0.282 mL/día,  $P_{max}$  de 111 mL y una fase lag ( $\lambda$ ) de 43.7 días, con un factor de correlación ( $R^2$ ) de 0.993. La tasa de producción de metano más baja fue 0.146 mL/día, obtenida en los cultivos con OTC a 7.5 mg/L, seguida por los cultivos con 2.5 mg/L de ERX con 0.156 mL/día. Por otro lado, los cultivos con ERX a 5 mg/L presentaron una  $R_{max}$  similar al control (0.277 mL/día), seguidos por los resultados con OTC a 2.5 mg/L (0.234 mL/día). De igual forma, la fase lag presenta cambios significativos con las diferentes concentraciones de OTC y ERX. Las concentraciones de ERX a 5 y 10 mg/L tuvieron una fase lag 4.2 y 5.1 veces menor comparada con la del control. En contraste, las concentraciones más bajas en ambos antibióticos mostraron fase lag de 18 % con ERX y 10.5 % con OTC superiores al control.

## Adsorción de antibióticos

Los resultados de la cinética de adsorción muestran que el lodo anaerobio utilizado como inóculo para el ensayo de producción de metano no tiene la capacidad de adsorber los antibióticos en estudio, ya que la variación de la concentración inicial para ambos antibióticos fue mínima, como se muestra en la figura 2.

**Figura 2.** Cinética de adsorción de lodo anaerobio con ERX y OTC



Fuente: Elaboración propia.

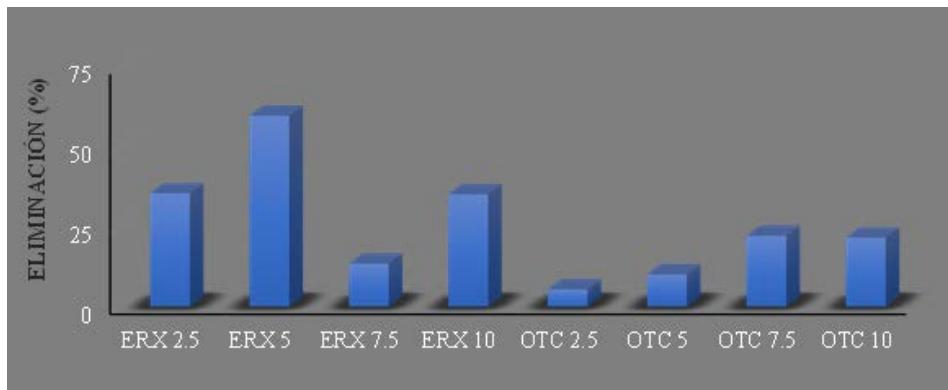
Los resultados de la cinética de adsorción indican que la eliminación de OTC y ERX del medio no son por mecanismo de adsorción, por lo que se puede concluir que sí se lleva a cabo una degradación de ambos antibióticos por actividad microbiana.

### Eliminación de antibióticos

La figura 3 muestra el porcentaje final de ERX y OTC con respecto a sus diferentes concentraciones presentes en el medio al final del ensayo de producción de metano. De acuerdo a ello, se muestra que la OTC es más resistente que la ERX bajo las diferentes concentraciones (2.5, 5.0, 7.5 y 10 mg/L) y, además, que tiene un efecto negativo en la producción de metano, como se describió anteriormente. Los resultados indican que en los cultivos con la ERX a 5.0 mg/L hubo la mayor eliminación de antibiótico, ya que 40.3 % de la concentración inicial quedó presente en el medio.

La ERX a una concentración de 2.5 y 10 mg/L mostró remociones similares de aproximadamente 35 % con respecto a la concentración inicial.

**Figura 3.** Porcentaje de eliminación de ERX y OTC en ensayo de producción de metano



Fuente: Elaboración propia.

En contraste, la muestra que presentó cambios mínimos con respecto a su concentración inicial es la OTC de 2.5 mg/L con 5.3 % de eliminación, el cual también fue el que menos producción de metano presentó, comparado con el resto de las concentraciones de la OTC. Las incubaciones a 7.5 mg/L de ERX fueron las que mostraron la más baja eficiencia de eliminación del antibiótico al finalizar la cinética (13.4 %), y fue esta misma la que menor producción de metano presentó con respecto a todas las concentraciones de ERX. Estos resultados indican que ambos antibióticos no pueden ser degradados completamente por el consorcio anaerobio en el tiempo que duró la cinética, lo cual afecta directamente su actividad microbiana y se refleja directamente en la producción de metano. Es importante mencionar que la concentración y el mecanismo de acción de cada antibiótico interfieren en dicho problema.

## Conclusiones

La digestión anaerobia de aguas residuales de efluentes porcinos es una opción viable ya que el proceso soporta altas cargas de materia orgánica, sin tener altas variaciones de pH, lo que permite la estabilidad del sistema.

Las aguas residuales porcinas con antibióticos como ERX y OTC representan un reto para los microorganismos anaerobios debido a que generan una inhibición, lo que impide que se lleve a cabo la síntesis proteica bacteriana. Esto también dependerá de la concentración en la cual estén presentes en el medio. Sin embargo, es evidente el efecto negativo, debido a la cinética llevada a cabo, la muestras con ERX y OTC tuvieron una menor producción de metano comparadas con el control. El efecto que tienen los antibióticos sobre el consorcio anaerobio no ha sido claramente descrito, por lo que se sugiere generar mayor investigación del tema.

## Referencias

- Álvarez, J. A., Otero, L., Lema, J. M. y Omil, F. (2010). The effect and fate of antibiotics during the anaerobic digestion of pig manure. *Bioresource Technology*, 101(22): 8581-8586. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.075>
- American Public Health Association (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18a ed. APHA-AWWA-WWCF.
- Arikan, O. A., Sikora, L. J., Mulbry, W., Khan, S. U., Rice, C. y Foster, G. D. (2006). The fate and effect of oxytetracycline during the anaerobic digestion of manure from therapeutically treated calves. *Process Biochemistry*, 41(7): 1637-1643. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2006.03.010>
- Bauer, A., Lizasoain, J., Nettmann, E. y Bergmann, I. (2014). Effects of the Antibiotics Chlortetracycline and Enrofloxacin on the Anaerobic Digestion in Continuous Experiments. *BioEnergy Research*, 7: 1244-1252. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9458-0>
- Ben, W., Qiang, Z., Pan, X. y Chen, M. (2009). Removal of veterinary antibiotics from sequencing batch reactor (SBR) pretreated swine wastewater by Fenton's reagent. *Water Research*, 43(17): 4392-4402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.057>
- Cang, L., Wang, Y., Zhou, D. y Dong, Y. (2004). Heavy metals pollution poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu province, China. *Journal of Environmental Science*, 16(3): 371-374.
- Cervantes, F. J., Saldívar-Cabral, J. y Yescas, J. F. (2007). Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1): 3-12.
- Cheng, D. L., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y. W., Zhou, J. L., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Bui, X. T. y Zhang, X. B. (2018). Bioprocessing for elimination anti-

- biotics and hormones from swine wastewater. *Science of The Total Environment*, 621: 1664-1682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.059>
- Deng, L., Zheng, P. y Chen, Z. (2006). Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using ic-sbr process with bypass of raw wastewater. *Process Biochemistry*, 41(4): 965-969. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.022>
- Ding, W., Cheng, S., Yu, L. y Huang, H. (2017). Effective swine wastewater treatment by combining microbial fuel cells with flocculation. *Chemosphere*, 182: 567-573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.006>
- Garzón-Zúñiga, M. A., y Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1): 65-79.
- Gujer, W. y Zehnder, A. J. B. (1983). Conversion processes in anaerobic digestion, *Water, Science and Technology*, 15(9): 127-167. <https://doi.org/10.2166/wst.1983.0164>
- Halling-Sørensen, B. (2001). Inhibition of aerobic growth and nitrification of bacteria in sewage sludge by antibacterial agents. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 40(4): 451-460. <https://doi.org/10.1007/s002440010197>
- Hilal-Dandan, R. y Brunton, L. L. (2013). *Goodman & Gill. Manual de farmacología y terapéutica*, 2<sup>a</sup> ed. Mc. Graw Hill Education.
- Hooper, D. C., Wolfson, J. S., Ng, E. Y. y Swartz, M. N. (1997). Mechanisms of action of and resistance to ciprofloxacin. *The American Journal of Medicine*, 82(4A): 12-20.
- Jiang, M., Qiao, W., Ren, Z., Mahdy, A., Wandera, S. M., Li, Y., y Dong, R. (2019). International Biodeterioration & Biodegradation Influence of operation conditions on methane production from swine wastewater treated by a self-agitation anaerobic reactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 143: 104710. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.027>
- Kemper, N. (2008). Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, 8(1): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.06.002>
- Lallai, A., Mura, G. y Onnis, N. (2002). The effects of certain antibiotics on biogas production in the anaerobic digestion of pig waste slurry. *Bioresource Technology*, 82(2): 205-208. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00162-6)

- Lim, J. W. y Wang, J. Y. (2013). Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste. *Waste Management*, 33(4): 813-819. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.013>
- Liu, W., Song, X., Ding, X., Xia, R., Lin, X., Li, G., Nghiem, L. D. y Luo, W. (2023). Antibiotic removal from swine farming wastewater by anaerobic membrane bioreactor: Role of hydraulic retention time. *Journal of Membrane Science*, 677, 121629. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121629>
- Liu, X., Steele, J. C., & Meng, X.-Z. (2017). Usage, residue, and human health risk of antibiotics in Chinese aquaculture: A review. *Environmental Pollution*, 223: 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.003>
- Mckellar, Q. A. (1996). Clinical relevance of the pharmacologic properties of fluorquinolones. *The Compendium on Continuing Education for the Practicing Veterinary*, 18(2): 14-21.
- Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B. y Braccio, G. (2013). Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, 103: 1003-1009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.070>
- Monnet, D. L., Emborg, H. D., Andersen, S., Schöller, C., Sorense, T. y Bager, F. (2000). Vigilancia de las resistencias bacterianas a los agentes antimicrobianos en Dinamarca. *Eurosurveillance*, 5(12). <https://doi.org/10.2807/esm.05.12.00021-es>
- Mustapha, N. A., Sakai, K., Shirai, Y. y Maeda, T. (2016). Impact of different antibiotics on methane production using waste-activated sludge : mechanisms and microbial community dynamics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100: 9355-9364. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-016-7767-2>
- Otero, J. L., Mestorino, O. N. y Errecalde, J. O. (2001). Enrofloxacina: una fluorquinolona de uso exclusivo en veterinaria Parte I: química, mecanismo de acción, actividad antimicrobiana y resistencia bacteriana. *Analecta Veterinaria*, 21(1): 31-41.
- Parra Huertas, R. A. (2010). Digestión anaerobia de lactosuero: efecto de altas cargas puntuales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1): 5385-5394.
- Sanz, J. L., Rodríguez, N. y Amils, R. (1996) The action of antibiotics on the anaerobic digestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 46(5-6): 587-592. <https://doi.org/10.1007/s002530050865>
- Silvestre, A. (1996). Residuos de medicamentos de uso veterinario, antibióticos. En *Toxicología de los alimentos*, 2a ed. (pp. 391-398). Hemisferio Sur.

- Syuhadaa, N., Husnain, T., Li, B., Rahman, A. y Riffat, R. (2015). Investigation of the Performance and Kinetics of Anaerobic Digestion at 45°C. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(14): 1099-1110. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.714090>
- Torres Arévalo, Y. V. y Chaparro, T. R. (2016). Actividad metanogénica específica de una solución acuosa de amoxicilina. *Afinidad*, 73(574). <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/312012>
- Vicente, D. y Pérez-Trallero, E. (2010). Tetraciclinas, sulfamidas y metronidazol. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28(2): 122-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eimc.2009.10.002>
- Villamar, C. A., Cañuta, T., Belmonte, M. y Vidal, G. (2011). Characterization of Swine Wastewater by Toxicity Identification Evaluation Methodology (TIE). *Water Air and Soil Pollution*, 223(8): 363-369. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-011-0864-z>.
- Zhou, Q., Li, X., Wu, S., Zhong, Y. y Yang, C. (2020). Enhanced Strategies for Antibiotic Removal from Swine Wastewater in Anaerobic Digestion. *Trends in Biotechnology*, 38(1): 8-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.07.002>

# Aplicación de un sistema de electrocoagulación en aguas residuales de la industria tequilera para la eliminación de materia orgánica

Natalia HERNÁNDEZ VELÁZQUEZ•

María de los Ángeles CAMACHO RUÍZ••

Norma Guadalupe GONZÁLEZ MONTOYA•••

María Olga CONCHA GUZMÁN••••

Itzel Celeste ROMERO SOTO•••••

Jesús Antonio CÓRDOVA LÓPEZ•••••

## Resumen

La industria tequilera es de las actividades económicas con mayor impacto ambiental debido a la alta concentración de contaminantes que sus efluentes residuales poseen. En el presente trabajo se evaluó la eliminación de materia orgánica en aguas residuales de la industria tequilera por un sistema de electrocoagulación. Para ello, en un reactor de acrílico de configuración cuadrangular con capacidad de 1 L se usaron dos pares de electrodos de aluminio como ánodo y de acero inoxidable como cátodo en forma de placas planas de 80 cm<sup>2</sup> de área de superficie activa. Durante

---

• Departamento de Ingeniería, Instituto Tecnológico Superior de Jalisco campus Arandas, Tepatitlán de Morelos, México. Ingeniera ambiental. nataliahv2000@gmail.com.

•• Laboratorio de Investigación en Biotecnología, Centro Universitario del Norte (CUNORTE), Universidad de Guadalajara (UDG). Doctora y directora de División de Ciencia y Tecnología. <https://orcid.org/0000-0002-9857-9115>, angeles\_camacho@cunorte.udg.mx

••• Laboratorio de Investigación en Biotecnología, CUNORTE, UDG. Doctora y profesora de tiempo completo. <https://orcid.org/0000-0003-1861-9541>, nggm1377@gmail.com.

•••• Laboratorio de Investigación en Biotecnología, CUNORTE, UDG. Doctora y profesora de tiempo completo. <https://orcid.org/0000-0002-4146-4974>, mocg@cunorte.udg.mx.

••••• Laboratorio de Investigación en Biotecnología, CUNORTE, UDG. Doctora y profesora de tiempo completo. <https://orcid.org/0000-0001-8669-378>, itzel.romero@cunorte.udg.mx.

•••••• Laboratorio de Fermentaciones y Catálisis, Departamento de Química, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, UDG. Doctor y profesor de tiempo completo. <https://orcid.org/0000-0002-9320-1033>, antonio.cordova@academicos.udg.mx.

el experimento, se evaluaron cuatro cinéticas a distintas condiciones de un diseño experimental 22 (500 y 750 rpm y pH de 3 y 7), aplicando una densidad de corriente de 37.5 mA/cm<sup>2</sup>. En cada corrida se determinó la concentración de materia orgánica cada 10 min, con el fin de evaluar el comportamiento del coagulante y su efecto sobre la materia orgánica. Los resultados indicaron que a partir de los primeros 10-20 min se alcanzan las máximas remociones en las distintas condiciones; así mismo, se observó una mejor formación de coágulos a una velocidad de agitación de 750 rpm y a pH de 3. Estos resultados resaltan la alta eficiencia de este sistema en tiempos cortos de operación, a pesar de las altas concentraciones de materia orgánica presente. Esto indica la viabilidad de este sistema para ser aplicado en una de las etapas de tratamiento de este tipo de efluentes residuales.

**Palabras clave:** electrocoagulación, vinazas, materia orgánica, tratamiento.

## Introducción

A nivel mundial, la producción de tequila es una de las actividades económicas de mayor importancia. Durante 2022, en México se produjeron 651.4 millones de litros de tequila (Consejo Regulador de Tequila [CRT], 2023). La denominación de origen establece que el tequila a base del agave azul (*tequilana Weber*) solo puede producirse en ciertas regiones nacionales, principalmente en el estado de Jalisco (con 91 % de la producción) (Zurita *et al.*, 2022). A pesar de su importancia económica, este ejercicio genera cantidades elevadas de aguas residuales denominadas vinazas, las cuales contienen grandes concentraciones de sólidos y materia orgánica. Se estima que por la producción de cada litro de tequila se generan entre 10-15 litros de vinaza (López-López *et al.*, 2010). Aunque las características de las vinazas son muy variables, estos desechos tienen la particularidad de ser aguas residuales con bajo pH, alta concentración de materia orgánica (50-100 g/L) y sólidos suspendidos y disueltos de color marrón oscuro; estas la convierte en uno de los efluentes más difíciles de tratar (Dos Reis *et al.*, 2019). Así mismo, se caracterizan por contener altas concentraciones de compuestos fenólicos, ácido acético y láctico, distintos polímeros de alto peso molecular y otros compuestos recalcitrantes y de alta toxicidad que impactan directamente con el medio ambiente, y por su

dificultad para ser biodegradados por sistemas biológicos (López-López *et al.*, 2010). Aunado a esto, 80 % de los efluentes residuales producidos en forma de vinazas son descargados a fuentes receptoras (lagos, ríos, drenes, entre otros) sin previo tratamiento (Rodríguez Cortés y de la Cerna-Hernández, 2017).

Cuando las vinazas se descargan en exceso pueden generar salinización del suelo (afectación de los suelos agrícolas); así mismo, su vertimiento ayuda a desarrollar procesos de eutrofización en los cuerpos de agua debido a la alta carga de nutrientes que contienen. Este efecto favorece la proliferación acelerada de microalgas, lo cual impide la penetración de la luz solar, inhibiendo la actividad fotosintética y la presencia de oxígeno. Esto incrementa la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como alteraciones en los ecosistemas y pérdida de la biodiversidad acuática (Mikucka y Zielińska, 2020; Pant y Adholeya, 2007; Satyawali y Balakrishnan, 2008).

Ante este panorama, distintos esfuerzos se han realizado en la búsqueda de alternativas para el tratamiento de este tipo de efluentes y para que estos logren ser sustentables, económicamente viables, eficientes y que permitan minimizar el impacto ambiental. Generalmente se han empleado tratamientos biológicos anaerobios, debido a su alta eficiencia de remoción de materia orgánica y por el beneficio energético que puede obtenerse a través de la producción de biogás (Kharayat, 2012). Ejemplo de ello son los reactores anaerobios de flujo ascendente o reactores UASB. No obstante, las altas concentraciones de la demanda química de oxígeno (DQO) (más de 75.000 mg/L, aproximadamente) pueden causar un efecto tóxico para los consocios microbianos anaerobios (Syaichurrozi *et al.*, 2021). Además, en las vinazas existen contaminantes orgánicos persistentes, los cuales no pueden ser removidos eficazmente por métodos biológicos convencionales (Prajapati y Chaudhari, 2015), por lo que se recomienda un proceso avanzado como las tecnologías electroquímicas, las cuales han demostrado ser eficaces en la reducción de estos compuestos.

En las vinazas, los sistemas de electrocoagulación pueden aplicarse de forma preliminar después de una sedimentación primaria, para eliminar gran parte de los sólidos suspendidos y reducir de forma indirecta parte de materia orgánica presente. La electrocoagulación es un proceso que presenta diversas ventajas sobre otros tratamientos. Esto incluye tiempos cortos de retención, menor cantidad de lodos generados y no requiere

la aplicación de aditivos químicos como la coagulación química convencional (Syaichurrozi *et al.*, 2020). Por otro lado, aunque es un proceso que requiere alto consumo de energía, se pueden aplicar fuentes de energía renovables para abastecer su requerimiento. Una alternativa viable para el tratamiento de estos efluentes es el uso de un sistema que permita reducir la gran cantidad de sólidos en una primera etapa después de la sedimentación primaria, lo que permite reducir indirectamente parte de la materia orgánica presente. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue aplicar un sistema de electrocoagulación en vinazas para reducir la materia orgánica presente.

## **Metodología**

El desarrollo experimental se realizó en el Laboratorio de Investigación en Biotecnología en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara.

### **Caracterización fisicoquímica de las vinazas**

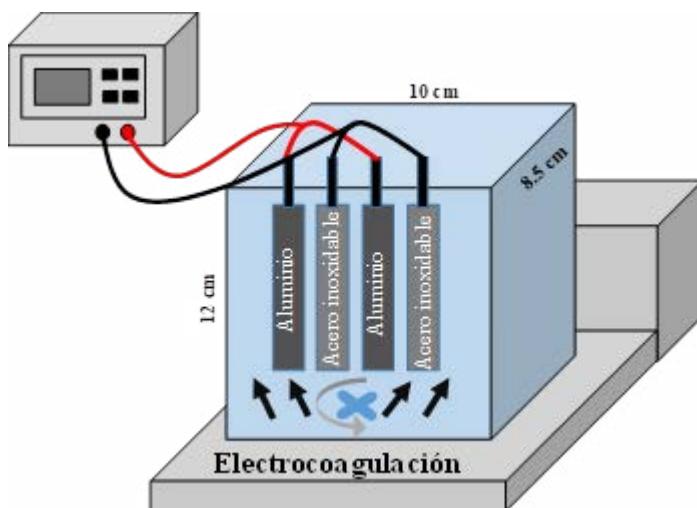
Las vinazas fueron obtenidas de los efluentes residuales emanados de una planta industrial de producción de tequila situada en Arandas, Jalisco. El agua residual fue recopilada tras someterse a un tratamiento anaerobio mediante un biodigestor, lo cual resultó en una concentración de contaminantes inferior a la que suele encontrarse en este tipo de efluentes. Con el propósito de realizar su caracterización fisicoquímica, se determinó la presencia de materia orgánica mediante la DQO, así como la concentración de NOx (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) conforme a los métodos estandarizados descritos en APHA Standard Methods 1999. La medición de los sólidos se llevó a cabo siguiendo la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. Por último, el pH fue evaluado mediante el empleo de un medidor de pH (HI2550, HANNA Instruments).

### **Unidad experimental**

Se utilizó un reactor de acrílico de configuración cuadrangular de medidas 8.5 cm de ancho por 10 cm de largo por 12 cm de altura (figura 1). Dos pares de electrodos en forma de placas planas cuadrangulares se utilizaron para

la remoción de materia orgánica: los ánodos de Al y los cátodos de acero inoxidable. El área de superficie activa de los electrodos fue de 40.48 cm<sup>2</sup>. Se utilizó una fuente de poder de la marca BK Precisión 1673 para el suministro de energía. Durante el tratamiento, las vinazas se mantuvieron en agitación constante mediante un agitador magnético de la marca Cole-Parmer StableTemp.

**Figura 1.** Reactor experimental de electrocoagulación con dos pares de electrodos; ánodos de aluminio y cátodos de acero inoxidable



Fuente: Elaboración propia.

## Condiciones experimentales

Para el estudio se realizaron cuatro cinéticas con duración de 60 min cada una. Se utilizó un diseño factorial 2<sup>2</sup>, considerando como variables experimentales la velocidad de agitación de 500 y 750 rpm (revoluciones por minuto) y el pH de 3 (el que poseen las vinazas sin ajuste) y 7 (neutralizado). La intensidad de corriente se mantuvo de forma constante en cada experimento (6 A). Los experimentos se realizaron por triplicado.

## Recolección y análisis de la muestra

La recolección de muestra se realizó cada 10 minutos. A cada muestra se le determinó la concentración de materia orgánica en forma de DQO de acuerdo con el APHA Standard Methods 1999. Cada análisis se realizará por triplicado. La remoción de materia orgánica se determinó mediante la ecuación 1, donde R se refiere a la remoción de DQO en unidades de porcentaje, Ci a la concentración inicial de materia orgánica en el agua antes del tratamiento y Cf a la concentración después del tratamiento, esto a diferentes tiempos.

**Ecuación 1.** Porcentaje de remoción

$$R \text{ (%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

## Resultados y discusión

### Caracterización de la muestra

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las vinazas se muestran en la tabla 1. La materia orgánica se observa baja comparada con diversos autores como Méndez-Acosta *et al.* (2010), Buitrón y Carvajal (2010), López-López *et al.* (2010), quienes al caracterizarlas encontraron concentraciones de DQO de entre 55.2 a 66.3 g/L. Así mismo, España-Gamboa *et al.* (2011) mencionan en su trabajo de investigación que la DQO en vinazas es muy variable y que se pueden encontrar de 50 g/L y hasta 150 g/L en aguas residuales. Estas diferencias pueden deberse a que muy probablemente las vinazas tuvieron un tratamiento previo en la industria antes de su recolección para someterlas al sistema de electrocoagulación.

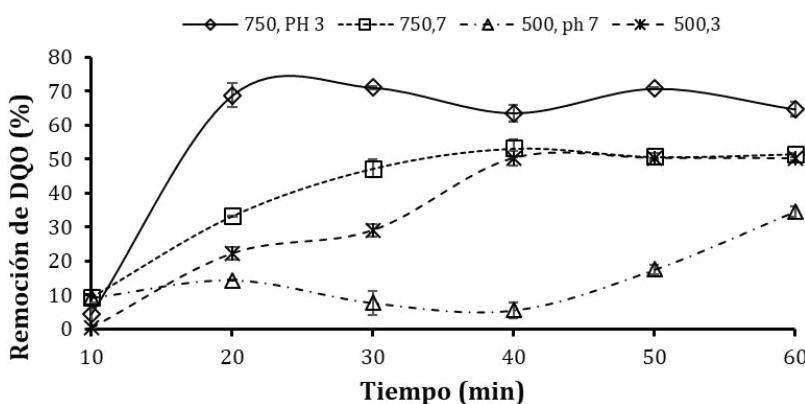
**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica de las vinazas

Parámetro	Valor	Unidad
DQO	20,300	mg/L
pH	3	-
Conductividad	2470	$\mu$ S/cm
Sólidos Totales (ST)	67945.33	mg/L
Sólidos disueltos (SD)	10140	mg/L
Sólidos suspendidos (SS)	57803.3	mg/L
Nitritos	397	mg/L
Nitratos	715.5	mg/L

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de las muestras a diferentes condiciones demostraron que a partir de los 20 minutos se alcanzó la mayor parte de la remoción total; así mismo, las mejores condiciones se encontraron a pH de 3 y una agitación de 750 rpm (figura 2). Las condiciones a pH 7 y agitación de 750 y 500 rpm tuvieron un comportamiento similar y alcanzaron las mismas eliminaciones de DQO a partir de los 40 min.

**Figura 2.** Cinéticas de eliminación de materia orgánica a distintas condiciones.

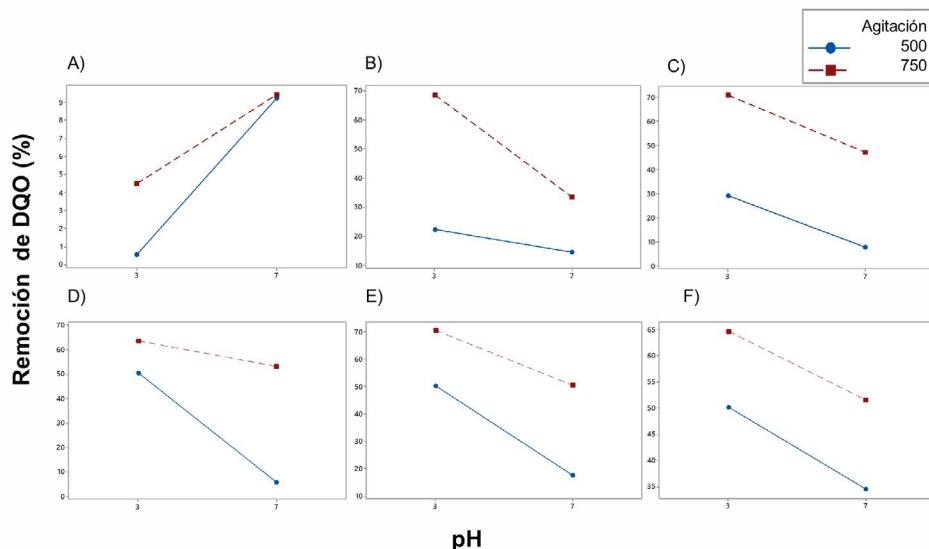


-Δ- 500 rpm y pH 7, -x- 500 rpm y pH 3, -□- 750 rpm y pH 7, -◊- 750 rpm y pH 3.

Fuente: Elaboración propia.

El impacto de las variaciones en el pH y la agitación en la eliminación de materia orgánica se presenta en la figura 3, donde cada subfigura (A-F) ilustra las alteraciones en la remoción de DQO a lo largo del tiempo durante la operación del sistema. Durante los primeros 10 minutos se observó un desempeño superior del sistema a un pH de 7, coincidiendo con los resultados obtenidos por Syaichurrozi *et al.* (2021), quienes al optimizar su sistema de electrocoagulación identificaron que un pH inicial de 7 resultaba en una mayor eficiencia en la eliminación de DQO. Sin embargo, a partir de los 20 minutos, de acuerdo con las gráficas de efectos principales, se registraron las mayores remociones a un pH de 3, las cuales se mantuvieron hasta el final de la cinética a los 60 minutos (figuras 3 y 4). Asimismo, se observó que en condiciones de pH neutro la formación de flóculos se tornó más inestable debido a la precipitación de sales y otros compuestos ocasionada por la variación del pH. En consecuencia, se incrementaron los flóculos/sólidos suspendidos en el agua tratada.

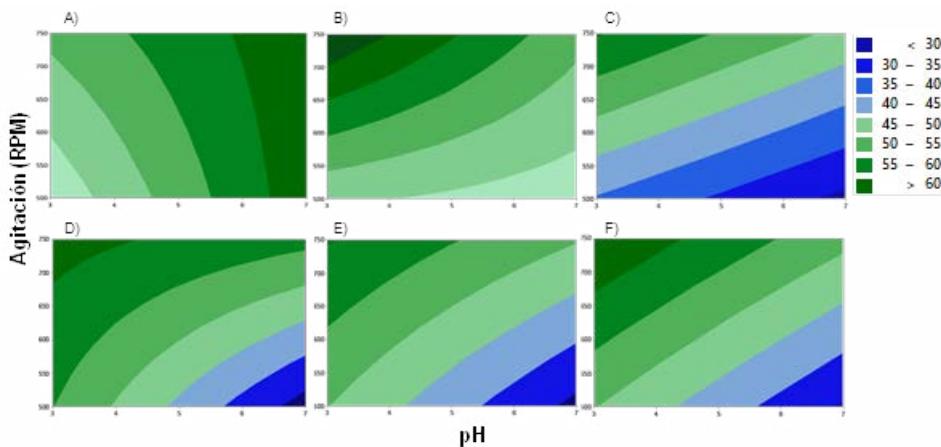
**Figura 3.** Gráfico de efectos principales de pH y agitación sobre la eliminación de DQO en cada muestra analizada (cada 10 min)



Fuente: Elaboración propia.

El impacto de la agitación y el pH se exhibe en la figura 4 mediante una representación gráfica de contornos. Se observa que las eficiencias de remoción más destacadas se manifiestan en áreas sombreadas de verde oscuro, correspondientes a condiciones de agitación y pH específicos a lo largo de diferentes intervalos de tiempo. Además, en la figura 4F, que representa la muestra a los 60 minutos, se evidencia una óptima actividad del sistema bajo condiciones de mayor agitación y un pH de 3. Este patrón se replica en los intervalos de tiempo de 20, 30, 40 y 50 minutos, lo que revela una consistente mejora en la eficacia del sistema en dichas circunstancias.

**Figura 4.** Gráfico de contornos del efecto de pH y agitación sobre la eliminación de DQO en cada muestra analizada (cada 10 min)



Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

La electrocoagulación se presenta como un sistema preliminar eficaz para la eliminación significativa de sólidos presentes en las vinazas, lo que conduce a una reducción sustancial de la carga de materia orgánica de manera indirecta. Sin embargo, dadas las características particulares de estos efluentes resulta imperativo seguir una combinación de diversos tratamientos complementarios. Este sistema puede implementarse como fase inicial, posterior a una sedimentación primaria; no obstante,

se requiere una sedimentación secundaria tras la aplicación de dicho método. Los resultados cinéticos indican que las mayores eficiencias en la eliminación de materia orgánica se alcanzan a una velocidad de agitación de 750 rpm y un pH de 3 durante distintos intervalos de tiempo. Estos hallazgos contribuyen significativamente a la investigación de sistemas avanzados para el tratamiento de las vinazas.

## Referencias

- Buitrón, G. y Carvajal, C. (2010). Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: Effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 101(23): 9071-9077. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.127>
- Consejo Regulador de Tequila (CRT, 2023). *Producción Total de Tequila y Tequila 100% en 2022*. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- Dos Reis, K. C., Coimbra, J. M., Duarte, W. F., Schwan, R. F. y Silva, C. F. (2019). Biological treatment of vinasse with yeast and simultaneous production of single-cell protein for feed supplementation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2): 763-774. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1709-8>
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G. y Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: characterization and treatments. *Waste Management & Research*, 29(12): 1235-1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>
- Kharayat, Y. (2012). Distillery wastewater: bioremediation approaches. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9(2): 69-91. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.688056>
- López-López, A., Davila-Vazquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E. y Gálindo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9(2): 109-116. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9204-9>
- Méndez-Acosta, H. O., Snell-Castro, R., Alcaraz-González, V., González-Alvarez, V. y Pelayo-Ortiz, C. (2010). Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a cstr-type digester. *Biodegradation*, 21(3): 357-363. <https://doi.org/10.1007/s10532-009-9306-7>

- Mikucka, W. y Zielińska, M. (2020). Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192(3): 770-793. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>
- Pant, D. y Adholeya, A. (2007). Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review. *Bioresourse Technology*, 98(12): 2321-2334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.027>
- Prajapati, A. y Chaudhari, P. (2015). Physicochemical Treatment of Distillery Wastewater-A Review. *Chemical Engineering Communications*, 202(8): 1098-1117. <https://doi.org/10.1080/00986445.2014.1002560>
- Rodríguez Cortés, A. y de la Cerna-Hernández, C. (2017). El mezcal, su producción y tratamiento de residuos. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 2(8): 10-14.
- Satyawali, Y. y Balakrishnan, M. (2008). Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. *Journal of Environmental Management*, 86(3): 481-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.024>
- Syaichurrozi, I., Sarto, S., Sediawan, W. B. y Hidayat, M. (2020). Mechanistic models of electrocoagulation kinetics of pollutant removal in vinasse waste: Effect of voltage. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101312>
- Syaichurrozi, I., Sarto, S., Sediawan, W. B. y Hidayat, M. (2021). Effect of Current and Initial pH on Electrocoagulation in Treating the Distillery Spent Wash with Very High Pollutant Content. *Water*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/w13010011>
- Zurita, F., Tejeda, A., Montoya, A., Carrillo, I., Sulbarán-Rangel, B. y Carreón-Álvarez, A. (2022). Generation of Tequila Vinasses, Characterization, Current Disposal Practices and Study Cases of Disposal Methods. *Water*, 14(9), 1395. <https://doi.org/10.3390/w14091395>

# Evaluación de un sistema de electrooxidación para la eliminación de enrofloxacina y oxitetraciclina en aguas residuales porcícolas

Lourdes Mariana DÍAZ TENORIO•

Pablo GORTARES MOROYOQUI\*\*

Martín Emmanuel CEBREROS ESQUER\*\*\*

Luis Alonso LEYVA SOTO\*\*\*\*

## Resumen

México se encuentra en el noveno lugar mundial en producción de carne de puerco, y por estados, Sonora es segundo lugar nacional. El sur de dicho estado cuenta con 66 % del total de granjas. Esa gran actividad agropecuaria genera enormes cantidades de agua residual con una gran variedad de sustancias disueltas o suspendidas en ellas. Las sustancias de uso farmacéutico y cuidado personal han cobrado importancia por ser persistentes y bioacumulables en el ambiente, provocando problemas en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres en concentraciones que van de  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $\text{\mu g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Se ha puesto especial atención a los antibióticos debido a su presencia constante en las aguas residuales porcícolas y a la generación de problemas ambientales. En este trabajo se utilizó un sistema de electrooxidación para evaluar su capacidad de eliminar antibióticos de Medio Residual Sintético (MRS). Se analizaron tres concentraciones de cada antibiótico (1, 5 y 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y se trataron con tres intensidades de corriente (0.5, 1.0 y 1.5 A) con electrodos de titanio (cátodo) y

• Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). Doctora por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Cibnor), La Paz. lourdes.diaz@itson.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8941-3965>

\*\* Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, ITSON. Doctor por la Universidad de Arizona, Estados Unidos de América. pablo.gortares@itson.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5362-2709>

\*\*\* Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, ITSON. Ingeniero Biotecnólogo por el itson. martin.cebreros18@gmail.com

\*\*\*\* Programa IxM, Conahcyt. Doctor por el Cibnor, La Paz. luis.leyva@itson.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8101-7925>

titanio cubierto de óxido de plomo/óxido de iridio (ánodos). Se cuantificó la desaparición de los antibióticos con HPLC. Los datos indican que ambos ánodos tienen eficiencias similares y que pueden eliminar entre 70 y 95 % de los antibióticos dependiendo la intensidad de la corriente.

**Palabras clave:** aguas residuales, contaminantes emergentes, antibióticos, remoción, electrooxidación.

## Introducción

La producción de carne de cerdo a nivel mundial documentado en 2017 en informes anuales de la Confederación de Porcicultores Mexicanos (2017) coloca a China como potencia mundial en producción de esta carne, seguida por Estados Unidos, Canadá y Brasil. México se encuentra en el noveno lugar, y en 2016 también ocupó dicha posición, con una participación del 1.3 % en la producción mundial de carne de cerdo, con 1.4 millones de toneladas (Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura [FIRA], 2017). En 2017 hubo un aumento de 30 mil toneladas. Algunos datos interesantes perspectivos de 2017 a 2025 proyectan un incremento en la producción de carne de cerdo con una tasa promedio anual de 1.1 %, es decir, 130.8 millones de toneladas para México al final del periodo; esto según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la AFAO, en el reporte *Perspectivas Agrícolas 2016-2025* (FIRA, 2017). Según la Confederación de Porcicultores Mexicanos (2017), Jalisco es el primer productor nacional de carne de cerdo con 306,148 toneladas, seguido por Sonora (254,660 toneladas) y Puebla (165,563 toneladas). Yucatán, Veracruz y Guanajuato son el cuarto, quinto y sexto lugar, respectivamente. En Sonora hay 389 granjas y 66 % de ellas se encuentran en la zona sur del estado. Se cuenta con un inventario de 155,600 vientres, 9 rastros TIF y 318 mil cabezas, lo cual en febrero de 2017 aportó 18.6 % de la producción nacional con 21,136 toneladas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SAGARPA], 2017). De acuerdo con datos publicados por Nagarajan *et al.* (2019), en una granja porcícola pueden generarse entre 4 y 8 litros de aguas residuales por puerco al día, lo que, considerando las 318,000 cabezas el estado estaría generando entre 1,272 m<sup>3</sup> y 2,544 m<sup>3</sup> diarios de dichas aguas.

Las aguas residuales porcícolas contienen una gran diversidad de contaminantes desde los inicios de la cría de cerdos, ya sean biológicos o químicos. Paulatinamente se han implementado estrategias para bajar la cantidad de estos contaminantes, que comprenden desde patógenos, compuestos nitrogenados, fosfatados, sólidos solubles, sólidos insolubles, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO); Estos dos últimos como indicadores de la cantidad de materia orgánica presente en el agua (Nagarajan *et al.*, 2019). Por otro lado, existe un grupo conocido como contaminantes emergentes, que se refiere a que no habían sido descubiertos previamente o a que se detectaban a niveles muy bajos, cuyo potencial de riesgo es mayormente desconocido (Environmental Protection Agency [EPA], 2014). Las sustancias de uso farmacéutico y muchos otros productos ya sea de uso veterinario o humano han cobrado importancia porque poseen propiedades fisicoquímicas que los hacen persistentes y con capacidad de bioacumulación, lo cual provoca problemas en los ecosistemas acuáticos incluso a niveles menores de  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (Naddeo *et al.*, 2009).

Alrededor de 1990, los fármacos ya sea de uso veterinario, humano, así como los productos del cuidado personal contaban con un soporte de investigación muy escaso como contaminantes, pero en años recientes la ciencia se comenzó a enfocar en la liberación, el destino y las consecuencias que estos compuestos generan (Halling-Sørensen *et al.*, 1998; Hirsch *et al.*, 1999). Se han detectado una gran cantidad de compuestos como antiinflamatorios, reguladores de lípidos, antibióticos, hormonas, antiepilepticos,  $\beta$ -bloqueadores, antidepresivos, antineoplásicos, medios de contraste de rayos X, en gran variedad de aguas, desde residuales hasta potable, así como también en suelo y sedimento (Santos *et al.*, 2010).

Las aguas residuales porcícolas son difíciles de digerir, y muy pocas son tratadas; en México se carece de tecnologías capaces de dar un tratamiento eficiente a estas aguas por lo que terminan impactando de manera negativa en los cuerpos receptores y alrededores (Castillo, 2002).

La toxicidad, las alergias y la resistencia bacteriana son las principales consecuencias de los antibióticos en aguas residuales (Guzmán *et al.*, 2004). La resistencia microbiana provocada por los antibióticos en el medio ambiente es un problema severo y que ha ido en aumento en los últimos años, a tal grado de ser considerado uno de los problemas de salud, tanto humana como animal, más eminentes del siglo xxi (Junza *et*

*al.*, 2014). Una gran parte de los antibióticos consumidos por los cerdos en una granja (entre 30 % y 90 %) se excretan sin cambios significativos a través de la orina y las heces, y finalmente se alojan en las aguas residuales, las cuales posteriormente son llevadas a las plantas de tratamiento. En dichas plantas, tienen poca o nula eliminación y una parte significativa de los contaminantes son desechados en cuerpos receptores (Cha *et al.*, 2006).

Los antibióticos se han utilizado desde hace décadas de forma intensiva en los animales que dan lugar a productos de consumo humano, tanto de forma profiláctica como preventiva, así como para promoción del crecimiento. Se ha reportado la toxicidad de varios fármacos, junto con sus metabolitos, que incluyen casos de mortalidad en micro- y macroorganismos (Halling-Sørensen *et al.*, 1998; Escher *et al.*, 2011). Asimismo, antibióticos y mezclas de los mismos se han encontrado en cianobacterias y algas verdes (González-Pleiter *et al.*, 2013), además de que su presencia en los ambientes acuáticos puede impactar en la salud humana (Escher *et al.*, 2011). El uso desmedido de estos fármacos en animales podría generar resistencia, la cual, a su vez, tendría un impacto tanto en la salud humana como en el ambiente (Vélez Ospina, 2013). Dicho lo anterior, es urgente desarrollar procesos, sistemas y tecnologías específicos para microcontaminantes que lleven a cabo una eliminación tanto eficaz como eficiente de antibióticos tales como la enrofloxacina y la oxitetraciclina, así como también de la actividad microbiana en las aguas tratadas.

Actualmente existe una gama de sistemas o procesos que tienen la función de eliminar antibióticos y otro tipo de compuestos en una matriz acuosa, generalmente conocidos como procesos de oxidación avanzada, donde podemos encontrar a la oxidación con ozono, oxidación Fenton, fotocatálisis, fotólisis y algunas más; sin embargo, uno de los más efectivos es la electrooxidación, la cual es una alternativa al tratamiento de aguas que contienen contaminantes orgánicos (DQO) e inorgánicos que ha generado un gran interés en la comunidad científica. Esta presenta muchas ventajas que la hacen muy viable para la eliminación de antibióticos en aguas residuales tanto a pequeña como a gran escala, las cuales van desde una automatización relativamente fácil de implementar hasta el hecho de ser una metodología ambientalmente amigable si se hace uso de una fuente de energía renovable como la energía solar, unido al hecho

de que el reactivo principal que ayudará a la remoción de contaminantes es el electrón (Oturan y Brillas, 2007).

Las aguas residuales generadas a partir de vertederos municipales y una amplia diversidad de industrias han sido tratadas con éxito por este proceso en muchos experimentos a escala piloto y en algunos casos a escala industrial. Por lo tanto, debido a su alta capacidad de remoción de contaminantes, el uso de un sistema de electrooxidación es totalmente adecuado para la depuración de aguas residuales pretratadas. Sin embargo, los costos de tratamiento deben reducirse antes de la aplicación de este proceso a gran escala. En consecuencia, el empleo de la electrooxidación con otras tecnologías y fuentes de energía renovables es la manera óptima de implementar este sistema para convertirlo en un proceso aún más eficiente y amigable con el medio ambiente (Anglada *et al.*, 2009).

Los principales grupos de antibióticos que son aplicados en cerdos son tetraciclinas, macrólidos, penicilinas, lincosamidas, aminoglucósidos, sulfonaminadas y flouroquinolonas. Las tetraciclinas cuentan con amplio espectro antibacteriano, lo que ha conducido a un uso indiscriminado en medicina veterinaria en las últimas décadas, con fines terapéuticos o preventivos, y se utilizan igualmente como promotores del crecimiento (Kemper, 2008). La presencia de oxitetraciclina (OTC) en aguas residuales genera una resistencia de los microorganismos a su acción, alergias, problemas de osificación y dentición por su acción quelante sobre el ión calcio, así como efectos carcinogénicos (López-Lozano *et al.*, 2000). La enrofloxacina (ERX) es una fluroquinolona desarrollada en los años ochenta para uso exclusivo en medicina veterinaria (Badawy *et al.*, 2021). El principal mecanismo de acción de las quinolonas es la inhibición de la DNAGirasa. Al actuar específicamente sobre el DNA, las fluroquinolonas son rápidamente bactericidas, activas a muy bajas concentraciones y muestran efecto posantibiótico (Bush *et al.*, 2020).

El uso de estos antibióticos aumentó la tasa de resistencia y la aparición de serios problemas de salud pública (Otero *et al.*, 2000); asimismo, está elevando de forma significativa la concentración de estos compuestos en las aguas residuales (Polianiu *et al.*, 2020). Los procesos anaerobios son conocidos por su alto rendimiento y tolerancia hacia compuestos tóxicos; sin embargo, su utilización en aguas que contienen antibióticos y otros compuestos farmacéuticos es aún escasa y no conclusiva (Torres Toapanta, 2015). Dado lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar

un sistema de electrooxidación como proceso alternativo en la eliminación de antibióticos (oxitetraciclina y enrofloxacina) de uso veterinario en aguas residuales porcícolas bajo distintos parámetros electroquímicos y diferentes concentraciones de los dos fármacos.

## Metodología

Se preparó 1 L de medio residual sintético (MRS) para cada experimento con los compuestos que pueden ser observados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición del medio residual sintético

REACTIVO	CONCENTRACIÓN (gr·L <sup>-1</sup> )
NaCl	0.007
CaCl <sub>2</sub>	0.004
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.002
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.022
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.008
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.033
NH <sub>4</sub> Cl	0.010

Fuente: Elaboración propia.

Dicho sistema estuvo compuesto por una bomba peristáltica que se encargó de la recirculación continua del fluido, una fuente de poder que suministró la energía eléctrica necesaria mediante un par de cables de corriente, un par de electrodos que se utilizaron como ánodo y cátodo y un reactor electroquímico hecho de acrílico apoyado en un soporte metálico. El reactor utilizado fue uno hecho de material de acrílico con una geometría cilíndrica, cuyas medidas fueron de 27.2 cm de alto y 10.2 cm de diámetro, el cual contó con un volumen operacional de 1 litro. El espacio dentro del reactor era adecuado para el uso de 1 a 3 electrodos cilíndricos, dependiendo del tamaño de cada uno; de igual manera contaba con una salida en la zona inferior la cual permitía la recirculación del efluente sometido al tratamiento y una perforación en el costado superior para introducir una manguera de recirculación.

Con la finalidad de comparar la eficiencia de remoción de dos tipos de electrodos, se utilizaron de manera individual ánodos de  $\text{Ti}/\text{PbO}_2$  y de  $\text{Ti}/\text{IrO}_2$ . Ambos fueron conectados al polo positivo de la fuente de poder en su respectivo proceso de electrooxidación. El electrodo de  $\text{Ti}/\text{PbO}_2$  contaba con medidas de 15.2 cm de alto y 7.5 cm de diámetro; por otro lado, el electrodo de  $\text{Ti}/\text{IrO}_2$  contó con medidas de 15.2 cm de alto y 8 cm de diámetro. Un electrodo de igual manera cilíndrico de titanio fue utilizado como cátodo, el cual fue conectado en el polo negativo de la fuente de poder; sus respectivas medidas eran de 15.2 cm de alto y 8.8 cm de diámetro. Las corrientes de 0.5 A, 1.0 A y 1.5 A necesarias para la electrooxidación fueron suministradas por una fuente de poder marca BK PRECISION, modelo 1672, la cual poseía dos salidas variables y una fija. Las salidas variables estaban conformadas por una de 0 a 32 V y otra de 0 a 3 A. La salida fija poseía una capacidad de 5 V/3 A. La recirculación del fluido fue aplicada mediante a una bomba peristáltica marca MasterFlex, modelo 7017-20. La centrifugación de las muestras fue llevada a cabo en una centrifuga marca Eppendorf (Hamburgo, Alemania), modelo 5810 R, la cual poseía un límite máximo de 12,000 rpm. Concentraciones separadas de  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de antibióticos (oxitetraciclina, enrofloxacina) fueron añadidas al mrs previamente preparado con la finalidad de llevar a cabo la remoción de cada uno de estos antibióticos en el sistema de electrooxidación. Cada concentración tanto de enrofloxacina como oxitetraciclina fue sometida a tres amperajes distintos: 0.5 A, 1.0 A y 1.5 A, durante un tiempo de remoción de 40 minutos y con una toma de muestra cada 5 minutos.

**Extracción de enrofloxacina:** se mezclaron 2 mL de MRS con antibiótico previamente tratados en el sistema de electrooxidación. Se agregaron 2 mL de buffer (ácido fosfórico 0.1 %: acetronitrilo en proporción 70:30 v/v) y se dejaron reposar durante 30 minutos. Después se procedió a agitar en vórtex por un tiempo estimado de 1 minuto, y posteriormente fue centrifugado a 3000 rpm durante 15 minutos en un equipo de centrifugación marca Eppendorf (Hamburgo, Alemania), modelo 5810 R. Se tomó 1 mL con una jeringa para ser filtradas a un vial a través de una membrana de 0.2  $\mu\text{m}$  (Millipore®, Billerica, Massachusetts) para su posterior inyección al equipo de HPLC.

**Extracción de oxitetraciclina:** se llevó a cabo de la misma manera que el otro antibiótico, pero con otro buffer (ácido oxálico 0.01M: Metanol

en una proporción 50:50 v/v), y se centrifugó a 5500 rpm durante 15 minutos, en el mismo equipo anterior y de la misma manera que la enrofloxacina.

**Ánalisis de antibióticos:** se utilizó un equipo de HPLC marca Agilent, modelo 1260, una columna Zorbax Eclipse Plus C18 de 150 mm de largo, 4.6 mm de diámetro y un tamaño de partícula de 5  $\mu\text{m}$ . Los detalles aparecen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones cromatográficas para el análisis por HPLC de los dos antibióticos

Antibiótico	Fase móvil	Volumen de inyección	Velocidad de flujo	Temp. de columna	Detección (dad)	Tiempo de corrida
Enrofloxacina	Ac. Fosfórico 0.1%:Acetonitrilo (70:30 V/V)	10 $\mu\text{L}$	1 mL/min	30 °C	$\lambda$ 280	5.5 min
Oxitetraciclina	Ac. Oxálico 0.01 M:Metanol (50:50 V/V)	10 $\mu\text{L}$	1 mL/min	30 °C	$\lambda$ 264	7.5 min

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados y discusión

### Eliminación de oxitetraciclina: 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con cargas de 0.5, 1.0 y 1.5 A

Respecto a la eliminación del antibiótico con una carga de 0.5 A, se logró remover 65 % del total de la sustancia; se pasó de una concentración de 0.9903  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a una de 0.3415  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Se puede apreciar que en los primeros 10 minutos se removió de manera agresiva 50 % del total del antibiótico. Esto puede ser debido a que en el tiempo 0 hay una mayor cantidad de este y en el resto del tiempo de remoción se atenúa la oxidación del compuesto (figura 1a).

En los resultados correspondientes a la eliminación de oxitetraciclina con una carga de 1.0 A se podría deducir que al ser el doble de amperaje, se eliminaría al doble respecto a los resultados obtenidos previamente; sin embargo, los resultados son distintos, ya que se logró eliminar 53 % del total del antibiótico en los primeros 10 minutos, solo 3 % más respecto a

la remoción con una carga 0.5 A. En este caso, se logró eliminar 81 % del total del antibiótico, pasando de una concentración total de  $0.9934 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $0.1854 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

En la carga de 1.5 A se logró remover 64 % de oxitetraciclina en los primeros 10 minutos del proceso, y posteriormente la eliminación se fue atenuando hasta llegar a una remoción total de 96 %; en este caso, se pasó de una concentración de  $1.0025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a una de  $0.09675 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

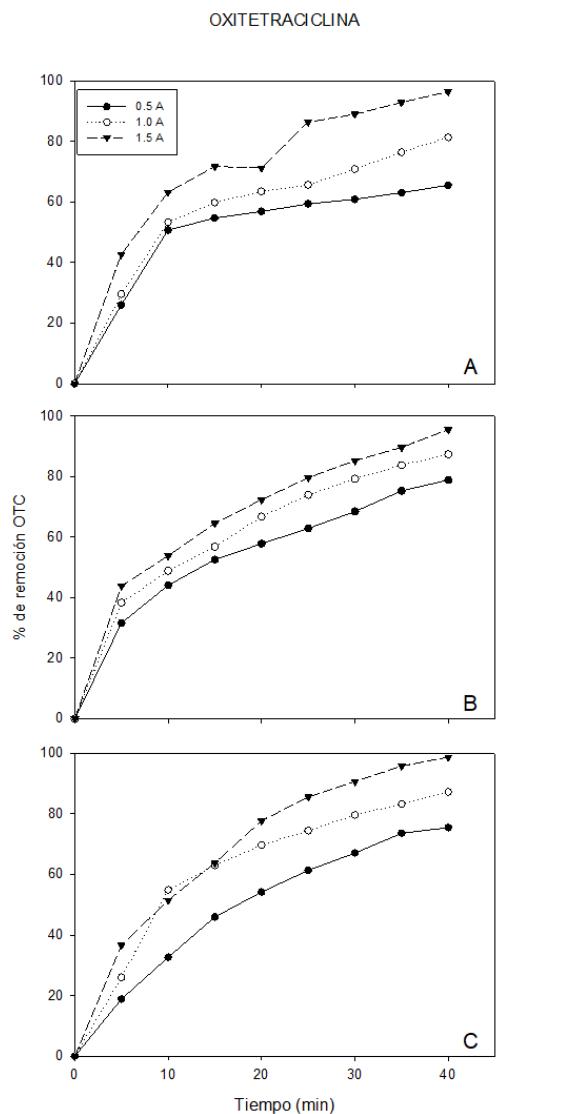
### **Eliminación de oxitetraciclina: $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con cargas de 0.5 A, 1.0 A y 1.5 A**

Los resultados obtenidos al aplicar una intensidad de corriente de 0.5 A presentan un porcentaje de remoción en los primeros 10 minutos menor al removido con la misma intensidad en la concentración de  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , ya que se eliminó un total de 44 % del antibiótico; posteriormente, el compuesto comenzó a oxidarse en un promedio de 5 a 10 % cada 5 minutos, y llegó a un total de 78.80 % de eliminación del antibiótico en el medio residual sintético (figura 1b).

Respecto a los resultados de la electrooxidación de oxitetraciclina con una intensidad de corriente de 1.0A, se obtuvo una remoción similar en los primeros 15 minutos que la carga de 0.5A y un total de 66.72 % de oxidación justo a los 20 minutos de proceso, con lo que hubo una remoción total de 87.28 % del antibiótico. Se pasó de una concentración de  $4.9717 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a una de  $0.6322 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  una vez terminado el proceso.

En cuanto a los resultados obtenidos del proceso utilizando una intensidad de corriente de 1.5A, se removió 72.31 % de oxitetraciclina justo a la mitad del tiempo, el cual es un porcentaje de oxidación muy alto para los apenas 20 minutos de proceso transcurridos; sin embargo, durante la segunda mitad se logró remover solamente 23 % más del antibiótico, y se llegó a un total de 95.47 % de oxidación.

**Figura 1.** Porcentajes de degradación de oxitetraciclina con tres intensidades de corriente



A: concentración de 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; B: concentración de 5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  y; C: concentración de 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .  
Fuente: Elaboración propia.

## Eliminación del antibiótico oxitetraciclina: $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con cargas de 0.5 A, 1.0 A y 1.5 A

En la oxidación anódica de la oxitetraciclina en el medio residual sintético bajo una intensidad de corriente de 0.5 A se logró una eliminación de 32.65 % en los primeros 10 minutos de proceso; 54.20 % a los 20 minutos, y 75.49 % justo a los 40 minutos. Cabe destacar que el proceso de electrooxidación en esta concentración, al ser tan alta, se comporta de una manera menos agresiva en cuanto a la eliminación del antibiótico. Eso se puede observar del minuto 10 hasta el tiempo final. Durante el proceso, en el que fue aplicada una carga de 1.0 A, se obtuvo una remoción de 26 % en los primeros 5 minutos y 54 % en los primeros 10 minutos. Se vio disminuida la remoción durante los 30 minutos restantes, pues se tuvo un promedio de eliminación de entre 4 a 9 % en cada intervalo de 5 minutos, y se llegó a una oxidación total final de 87.25 % del antibiótico. En cuanto al uso de una intensidad de corriente de 1.5 A, se puede observar una remoción drástica del antibiótico en los primeros 15 minutos del proceso, pues se tuvo una eliminación de 38.62 % en los primeros 5 minutos. Se puede apreciar que después del minuto 20 la remoción comenzó a disminuir en cada muestreo; se tuvo un promedio de 5 % de eliminación cada 5 minutos. El porcentaje final de oxidación fue de 98.73 %, que es el mayor porcentaje de eliminación registrado en los experimentos con oxitetraciclina (figura 1c).

**Tabla 3.** Remoción de enrofloxacina a 1.5A y  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  con las tres intensidades de corriente

Enrofloxacina ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Intensidad (A)	% de Remoción
1	0.5	79.57
	1.0	89.26
	1.5	97.00
5	0.5	78.27
	1.0	88.05
	1.5	92.58
10	0.5	64.94
	1.0	83.30
	1.5	95.67

Fuente: Elaboración propia.

Para la enrofloxacina, el comportamiento fue muy similar a los resultados mostrados por oxitetraciclina al ser sometidos a electrooxidación, pues mostró una tendencia directamente proporcional a la intensidad de corriente, pero no necesariamente respecto a la concentración, ya que en ambos casos la concentración intermedia muestra la remoción total menor.

Finalmente, se realizaron varias pruebas para comparar la eficiencia de remoción de diferentes electrodos, por lo que se usaron dos ánodos distintos, uno de titanio con recubrimiento de óxido de plomo y otro de titanio con recubrimiento de óxido de iridio. Los datos muestran que, en general, cuando se usa el recubrimiento de óxido de plomo la remoción es mayor (alrededor de 5 % de diferencia). Sin embargo, el comportamiento básicamente sigue la misma tendencia.

Para ambos antibióticos la mayor velocidad de degradación se da en los primeros minutos del proceso, lo que concuerda con datos publicados por Navarro (2019), en donde se lleva a cabo un proceso de electrooxidación de carbamazepina, utilizando un ánodo de  $Ti/PbO_2$  y una corriente de 1 A. En dicha experimentación se obtiene un porcentaje de degradación aproximado de 56.25 % en los primeros 10 minutos del proceso electrolítico. Los resultados obtenidos en este trabajo en la electrooxidación de enrofloxacina y oxitetraciclina (a  $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y 1 A de intensidad) de 33.84 % y 54.86 % de degradación, respectivamente, en los primeros 10 minutos del experimento confirman que la eficiencia y velocidad de la remoción de los fármacos es mayor mientras más concentración haya en el medio. Una vez degradado el mayor porcentaje presente, la velocidad disminuye.

Respecto a la atenuación que se da durante los últimos minutos en la degradación de oxitetraciclina y enrofloxacina, también corresponde con el estudio antes citado, ya que a partir del minuto 60 del proceso no existe una disminución significativa de la concentración de la carbamazepina. Es por esto que los tiempos de reacción que normalmente se evalúan en los procesos de electrooxidación van de 30 a 120 minutos (García-Espinoza *et al.*, 2018). Dado lo anterior se podría decir que en los dos casos se tiene una cinética de degradación de primer orden, ya que la eficiencia de degradación es afectada por la concentración del compuesto a tratar. Es por eso que durante los experimentos la degradación en los primeros intervalos de tiempo es muy rápida, y se torna proporcionalmente lenta a la baja concentración del antibiótico en los últimos intervalos de tiempo.

Un estudio similar al realizado en este proyecto de investigación fue llevado a cabo por Romero Soto (2018), en cual se eliminaron antibióticos simultáneamente de aguas residuales porcícolas reales mediante un proceso de electrooxidación. Dichos antibióticos estaban conformados por oxitetraciclina, enrofloxacina, florfenicol y cloranfenicol. Los parámetros de electrooxidación y la instrumentación utilizada fueron un tanto parecidos a lo aplicado en este proyecto de investigación. Se usaron dos cátodos de Ti, un ánodo de Ti/PbO<sub>2</sub>, una intensidad de corriente de 3 A y concentraciones de 0.1 mg•L<sup>-1</sup> de los antibióticos antes mencionados. La remoción fue de 90 % durante 130 minutos; fue menor que las obtenidas en el presente estudio. La diferencia está en que en el presente estudio se utilizaron aguas residuales sintéticas sin sólidos o materia que pudiera interferir en el funcionamiento de los electrodos y en el paso de corriente a través de la matriz líquida en la que están suspendidos los antibióticos.

Para los resultados de la comparación de electrodos con ambos recubrimientos (óxido de plomo y óxido de iridio) se hace la observación que por economía se podrían usar los de plomo (además de que las remociones son mayores), pero también habría que considerar el potencial peligro del plomo como uno de los metales pesados con mayor toxicidad en las aguas residuales. Una evaluación de pros y contras debería tenerse en cuenta para la selección de electrodos como estos.

## Conclusiones

Este trabajo demostró que la eliminación de antibióticos como la oxitetraciclina y la enrofloxacina es altamente eficiente utilizando los sistemas de electrooxidación con electrodos metálicos. Los porcentajes de remoción alcanzados en todas las concentraciones y en todas las intensidades de corriente son buenos en relación a otros trabajos con condiciones similares. Finalmente, podemos decir que ambos recubrimientos (óxido de plomo y óxido de iridio) son prácticamente igual de eficientes para la remoción de los antibióticos aquí utilizados. Debido a esa igualdad de remoción entre ambos electrodos, su uso puede ser equivalente, y por lo tanto, la selección de uno u otro debería estar basada en otros parámetros como el costo, la facilidad de adquisición o el grado de contaminación que pudieran presentar.

## Referencias

- Anglada, A., Urtiaga, A. y Ortiz, I. (2009) Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications Emerging Technologies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(12): 1747-1755. <https://doi.org/10.1002/jctb.2214>
- Badawy, S., Yang, Y., Liu, Y., Marawan, A., Ares, I., Martínez, M. A., Martínez-Larrañaga, M. R., Wang, X., Anadón, A. y Martínez, M. (2021) Toxicity induced by ciprofloxacin and enrofloxacin: oxidative stress and metabolism. *Criticals Reviews in Toxicology*, 51(9): 754-787. <https://doi.org/10.1080/10408444.2021.2024496>
- Bush, N. G., Diez-Santos, I., Abbott, L. R. y Maxwell, A. (2020) Quinolones: Mechanism, Lethality and Their Contributions to Antibiotic Resistance. *Molecules*, 25(23): 2-27. <https://doi.org/10.3390/molecules25235662>
- Castillo, L. G., (2002). *Estimación de la contaminación por nitrógeno derivada de la actividad humana en las aguas superficiales y subterráneas del Valle del Yaqui, Sonora* [Tesis de maestría en Ingeniería en Administración de Recursos Hídricos]. Instituto Tecnológico de Sonora México.
- Cha, M., Yang, S. y Carlson, K. H. (2006). Trace determination of  $\beta$ -lactam antibiotics in surface water and urban wastewater using liquid chromatography combined with electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1115(1-2): 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.02.086>
- Confederación de Porcicultores Mexicanos (2017). *Compendio Estadístico del Sector Porcícola 2017*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200634/Panorama\\_Agroalimentario\\_Carne\\_de\\_Cerdo\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200634/Panorama_Agroalimentario_Carne_de_Cerdo_2016.pdf)
- Environmental Protection Agency (EPA, 2014). Contaminants of Emerging Concern including Pharmaceuticals and Personal Care Products. <http://water.epa.gov/scitech/cec/>
- Escher, B., Baumgartner, R., Koller, M., Treyer, K., Lienert, J. y McArdell, C. (2011). Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospitals wastewater. *Water Research*, 45(1), 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.019>
- Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura (FIRA, 2017) *Panorama agroalimentario. Carne de cerdo 2016*. [www.ugrpg.org.mx/pdfs/Panorama\\_Agroalimentario\\_Carne\\_de\\_cerdo\\_2017.pdf](http://www.ugrpg.org.mx/pdfs/Panorama_Agroalimentario_Carne_de_cerdo_2017.pdf)

- García-Espinoza, J. D., Mijaylova-Nacheva, P. y Avilés-Flores, M. (2018). Electrochemical carbamazepine degradation: Effect of the generated active chlorine, transformation pathways and toxicity. *Chemosphere*, 192: 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.147>
- González-Pleiter, M., Gonzalo, S., Rodea-Palomares, I., Leganés, F., Rosal, R., Boltes, K., Marco, E. y Fernández-Piñas, F. (2013). Toxicity of five antibiotics and their mixtures towards photosynthetic aquatic organisms: Implications for environmental risk assessment. *Water Research*, 47(6): 2050-2064. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.020>
- Guzmán, M. A., Salinas, J., Toche, P. y Afani, A. (2004) Alergia a b-lactámicos. *Revista Chilena de Infectología*, 21(4): 285-298. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182004000400002>
- Halling-Sørensen, B., Nielsen, S., Lanzky, P., Ingerslev, F., Lutzhoft, H. y Jorgensen, S. (1998). Occurrence, fate and effects of pharmaceuticals substances in the environment- a review. *Chemosphere*, 36(2): 357-394. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(97\)00354-8](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(97)00354-8)
- Hirsch, R., Ternes, T. A., Haberer, K. y Kratz, K. L. (1999). Occurrence of antibiotics in the aquatic environment. *Science of the Total Environment*, 225(1-2): 109-118. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(98\)00337-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00337-4)
- Junza, A., Dorival, N., Zafram A. y Barrón, D. (2014) Multiclass method for the determination of quinolones and β-lactams, in raw cow milk using dispersive liquid-liquid microextraction and ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1356: 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.06.034>
- Kemper, N. (2008) Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, 8(1): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.06.002>
- López-Lozano, J. M., Monnet, D. L., Yagüe, A., Burgos, A., Gonzalo, N., Camillos, P. y Saez, M. (2000). Modelling and forecasting antimicrobial resistance and its dynamic relationship to antimicrobial use: a time series analysis. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 14(1): 21-31. [https://doi.org/10.1016/s0924-8579\(99\)00135-1](https://doi.org/10.1016/s0924-8579(99)00135-1)
- Nagarajan, D., Kusmayadi, A., Yen, H. W., Dong, C. D., Lee, D. J. y Chang, J. S. (2019). Current advances in biological swine wastewater treatment using microalgae-based processes. *Bioresource Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121718>

- Naddeo, V., Meriç, S., Kassinos, D., Belgiorno, V. y Guida, M. (2009). Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation. *Water Research*, 43(16): 4019-4027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.027>
- Navarro, J. (2019). *Tratamiento de agua residual de hospital por un proceso de electrooxidación*. Memorias del Congreso AMICA. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional, Instituto Politécnico Nacional. Durango, México.
- Otero, J. L., Mestorino, N. y Errecalde, J. (2001). Enrofloxacin: Una fluoroquinolona de uso exclusivo en veterinaria. Parte I: química, mecanismo de acción, actividad antimicrobiana y resistencia bacteriana. *Anales Veterinaria*. 21(1): 31-41. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/11129>
- Oturán, M. y Brillas, E. (2007) Electrochemical Advanced Oxidation Processes (eaops) for Environmental Applications. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 25(1): 1-18. <http://dx.doi.org/10.4152/pea.200701001>
- Polianciuc, S. I., Gurzau, A. E., Kiss, B., Stefan, M. G. and Loghin, F. (2020) Antibiotics in the environment: causes and consequences. *Medicine and Pharmacy Reports*, 93(3): 231-240. <https://doi.org/10.15386%2Fmpr-1742>
- Romero Soto, I. C. (2018). *Design of treatment systems for the removal of antibiotics in aquaculture and swine wastewater* [Tesis]. Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias.
- Santos, L. H., Araujo, A., Fachini, A., Pena, A., Delerue-Matos, C. y Montenegro, M. C. (2010) Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3): 45-95. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.100>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA, 2017). *Situación actual de la Porcicultura en Sonora*. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <http://oiapes.sagarhpa.sonora.gob.mx/notas/porcicultura-20170419.pdf>
- Torres Toapanta, M. R. (2015). *Determinación de niveles de tetraciclina y oxitetracíclina en leche cruda en la asociación copla (corporación productora de leche de Alóag) de la parroquia Alóag del cantón Mejía* [Tesis para optar por el título profesional de Químico en Alimentos]. Universidad Central del Ecuador.
- Vélez Ospina, C. (2013). *Determinación de antibióticos en carne vacuna y porcina, proveniente del Norte Antioqueño en la planta Frigocolanta ubicada en el Municipio de Santa Rosa de Osos*. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera de Alimentos. Corporación Universitaria Lasallista, Caldas (Antioquia).

# Propuesta de plan de manejo de los residuos de manejo especial (RME) para la empresa de recubrimientos integrales de tubería

Salma HUMPHREYS SALAS•

Rocío de los Angeles GARCÍA HERNÁNDEZ••

Victor Manuel RIVERA ARREDONDO•••

Bertha María Rocío HERNÁNDEZ SUÁREZ••••

## Resumen

Se presenta un plan elaborado para una empresa especializada en el recubrimiento integral de tuberías, ubicada en la ciudad de Poza Rica, Veracruz, el cual se desarrolló mediante la identificación detallada de cada proceso de recubrimiento en el área productiva, utilizando procedimientos, instructivos, bitácoras y registros operativos de la empresa. El proceso de recubrimiento se divide en tres etapas: ensamblaje, limpieza de tuberías y recubrimiento anticorrosivo. Posteriormente, se determinaron las cantidades mensuales generadas de cada residuo identificando como sujetos al plan de manejo a los residuos de cartón, pedacería de tubería y partículas de arena sílica. En los procesos se detectó la ausencia de un sistema adecuado para la recolección y tratamiento de los residuos generados, lo que implica un incumplimiento con la Ley número 847 del estado de Veracruz. En respuesta a esta situación, se propone la implementación de medidas específicas. Como parte integral del plan de manejo, se sugiere el diseño y la instalación de un equipo ciclón destinado a la captura eficiente de las partículas de arena sílica, reduciendo significativamente su emisión al ambiente. Además, se estructuran medidas concretas destinadas a

---

• Especialización en Diagnóstico y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Químicas región Xalapa, Universidad Veracruzana (uv), Xalapa. salma\_humphreys@outlook.es

•• Doctorado en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, uv Xalapa. rocigarcia@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4333-2657>.

••• Doctorado en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas región Xalapa, uv, Xalapa. vicrivera@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0630-8404>.

•••• Doctorado en Educación, Facultad de Ciencias Químicas región Xalapa, uv, Xalapa. berthernandez@uv.mx.

mitigar los impactos ambientales negativos durante las diversas etapas de recubrimiento de tuberías. Finalmente, se ofrecen recomendaciones detalladas para asegurar el cumplimiento con la legislación aplicable. La implementación de este plan no solo promoverá una gestión responsable de los residuos de manejo especial, sino que también contribuirá al compromiso medioambiental de la empresa.

**Palabras clave:** residuos, residuos de manejo especial, plan de manejo.

## Introducción

En México, se generan alrededor de 102,895 toneladas de residuos cada día (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [Sedema], 2019). Estos residuos, definidos como materiales, insumos o productos resultantes del consumo humano, son aptos para el aprovechamiento, tratamiento o la disposición final. En el país, la legislación para su gestión está establecida por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual clasifica los residuos en tres categorías: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos peligrosos (RP) y residuos de manejo especial (RME) (Ibarra *et al.*, 2015). Los RME se definen como aquellos generados en los procesos productivos que no cumplen con las características para ser considerados residuos peligrosos ni residuos sólidos urbanos. Asimismo, se incluyen aquellos generados por grandes productores de residuos sólidos urbanos, es decir, aquellos que producen más de 10 toneladas al año (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2018).

La industria se ha destacado como uno de los principales generadores de RME, ya que su enfoque se centra en satisfacer las necesidades fundamentales de la sociedad. Estas demandas han evolucionado gracias a los beneficios que ofrece, como la amplia gama de servicios, el acceso rápido y los precios competitivos (Robledo Villalpando, 2016). En la actualidad, la gestión y control de los diversos tipos de residuos no solo persiste como un desafío, sino que se ha convertido en una necesidad (Olán Izquierdo, 2018). La industria petrolera es una de ellas. Para asegurar la calidad de los hidrocarburos durante su transporte, se utilizan sistemas de tuberías que deben cumplir con estándares específicos, incluyendo su recubrimiento interno y externo de alta calidad. No obstante, como es inherente a cualquier proceso productivo, también se generan residuos en esta industria.

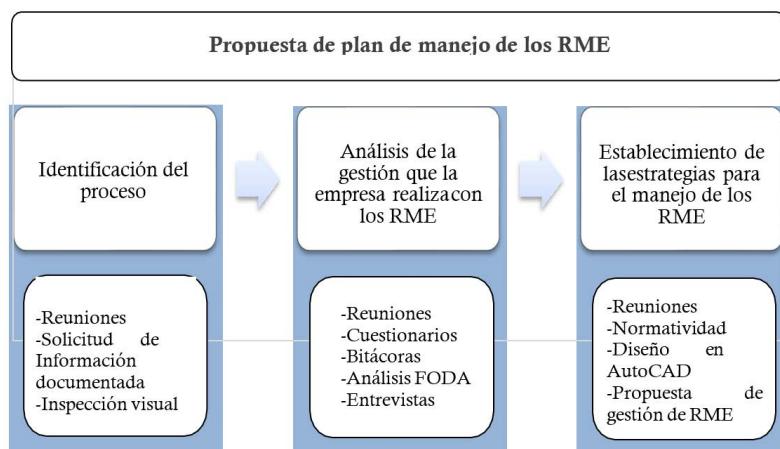
En la ciudad de Poza Rica, Veracruz, opera una empresa que se especializa en servicios de recubrimiento interno y externo de tuberías. Durante dicho proceso se generan RME, las cuales son la pedacería de tubería, partículas de arena sílica y el cartón. Estos residuos no reciben una gestión, por lo que es imperativo abordarlos y gestionarlos eficazmente. Una opción recomendada es la implementación de un plan de manejo que minimice su impacto ambiental, ya que proporciona pautas específicas para su gestión de acuerdo con sus características físicas.

Por tal motivo, es necesario proponer un plan de manejo que faculte a los trabajadores para llevar a cabo la gestión adecuada de los RME generados. Este instrumento no solo garantizará el cumplimiento con la legislación aplicable, sino que contribuirá a prevenir la contaminación en el medio ambiente y proteger la salud tanto de los trabajadores como de la población cercana.

## Metodología

La metodología que se llevó a cabo en la elaboración del plan de manejo de los RME generados en la empresa consta de tres etapas. En la figura 1 se presenta el proceso metodológico de este proyecto, y cada etapa se describe a detalle a continuación.

**Figura 1.** Esquema del proceso metodológico



Fuente: Elaboración propia.

## **Etapa 1. Identificación del proceso**

- a) Obtención de datos. Se hizo una reunión con el jefe de producción y el coordinador de Sistemas de Gestión Integral (SGI) para solicitar los registros de sus entradas y salidas como las bitácoras e inventarios de materiales, procedimientos e instructivos operativos, con el fin de conocer el proceso de recubrimiento.
- b) Inspección visual. Se utilizó como instrumento una bitácora de anotaciones para observar los tipos de residuos que son generados en cada proceso o actividad. Esto permitió la realización de diagramas de entradas y salidas, facilitando el entendimiento de la información documentada que ejecutan en la empresa.

Es importante señalar que la inspección visual no se llevó a cabo exclusivamente en la etapa de limpieza de tubería, ya que no se contó con acceso debido a consideraciones de seguridad. Además, la visibilidad de las actividades en esta etapa se vio afectada por la expansión de partículas volantes. Para obtener información sobre esta etapa, se recurrió a entrevistas con el personal operativo.

## **Etapa 2. Análisis de la gestión actual de los residuos**

Para conocer la gestión actual de los residuos se hizo una reunión con el encargado de sistemas de gestión de calidad (SGC) y el jefe de producción para la elaboración de una encuesta que se aplicó al personal operativo para evaluar la situación de la empresa en cuestión del manejo de los RME. Posteriormente, se llevó a cabo una reunión para la revisión de la documentación administrativa y conocer los permisos o autorizaciones que cuenta la empresa en materia de residuos. Los datos obtenidos se compararon con la ley de prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave.

Para examinar el cumplimiento legal se elaboró una lista de verificación con base a los criterios de la guía de autoevaluación homologada de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa). Además, en esta etapa se llevó a cabo un análisis FODA, que es una técnica para iden-

tificar las fortalezas, las oportunidades, las debilidades y las amenazas de la empresa con la finalidad de aprovechar las oportunidades de mejora.

### **Etapa 3. Establecimiento de estrategias de los residuos de manejo especial**

En esta etapa se establecieron las estrategias que la empresa debe seguir con base a los resultados obtenidos de la lista de verificación. Para esto, se tomó como referente la guía para la elaboración de plan de manejo para los generadores de residuos de manejo especial del estado de Veracruz, que permite reorientar el manejo tradicional de los RME.

Durante esta etapa, se empleó el programa AutoCAD para la creación y diseño de un ciclón, cuya función fue separar partículas sólidas arrastradas por una corriente gaseosa. En este proyecto, el ciclón fue diseñado para capturar la arena sílica, un residuo generado en la fase de limpieza de tubería (*sandblast*).

El equipo se diseñó específicamente para el proceso de *sandblast*, en base a la consulta de expertos en esta área, en concordancia con datos que fueron obtenidos de acuerdo con la información solicitada al personal de la empresa, que fueron densidad de las partículas, densidad del gas, caudal de corriente, presión, viscosidad del gas y la concentración de las partículas. Con esto se obtuvieron las dimensiones correctas del equipo y se diseñó un ciclón de alta eficiencia.

## **Resultados y discusión**

De acuerdo con la metodología utilizada los resultados obtenidos en cada etapa se presentan a continuación.

### **Identificación del proceso de recubrimiento de tuberías**

Se establecieron cuatro visitas en la empresa de recubrimientos de tuberías, de las cuales se llevó a cabo junto al coordinador de SGI y el jefe de producción (encargado del área operativo). De acuerdo con la información brindada por los encargados registrada en una bitácora y la inspección visual, se pudo conocer el proceso de recubrimiento de tubería, el

cual consiste en tres etapas: ensamble de tubería, limpieza de tubería y la aplicación del recubrimiento.

### Análisis de la gestión actual de los residuos

El análisis de los residuos generados fue a partir de la identificación del tipo de residuos y las cantidades generadas. De acuerdo con esto, se observó inicialmente que los residuos se encontraban depositados en el suelo y que en el almacenamiento de estos se mezclaban los residuos peligrosos y de manejo especial, como se muestra en la figura 2.

**Figura 2.** Inspección visual de los residuos generados



Fotografías de Salma Humphreys.

La obtención de la cantidad generada en cada fase del proceso de recubrimiento se basó en la información recopilada de las bitácoras de

la empresa. La revisión exhaustiva de estas bitácoras permitió identificar y cuantificar las cantidades generadas, presentadas de manera detallada en la tabla 1. Adicionalmente, se enriqueció esta información mediante diálogos directos con el personal de la empresa.

**Tabla 1.** Cantidad mensual de residuos generados en el área de procesos de sandblast

Proceso/Actividad	Residuos	Cantidad (kg)
Limpieza de tubería	Arena sílica	650
Limpieza mecánica	Óxidos y pintura vieja	20
Recubrimiento de tubería	Envases vacíos impregnados de pintura y/o solventes u otros sólidos impregnados de estos.	27
Ensamble de tubería	Unicel	5
	Pedacearí de tubería de AC y aluminio	400
	Escoria de óxidos	20
Calibración de equipos/materiales/herramientas	Cartón	350
Almacenamiento	Hule	5
	Cartón	8
	Tarimas de madera	10

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el dialogo y los recorridos que se llevaron a cabo en el área de producción, se elaboró una encuesta al personal operativo con más años laborando en la empresa y al jefe de producción, las cuales fueron de gran ayuda para conocer la gestión actual que les brindan a sus residuos. Concordando con lo que propuso Muñoz Leal (2016), estos mencionan que las encuestas pueden obtener más información aparte de la inspección visual y documentos que se soliciten en la empresa.

El resultado que más sobresale de la encuesta es el que refleja la responsabilidad que tiene el personal en el manejo de los residuos. Este resultado es el más alarmante, ya que las personas encuestadas no sentían

ninguna responsabilidad en cuanto el manejo de los residuos generados, y esperaban que alguien externo realizara ese trabajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos por las encuestas, se observó que el personal no conoce los tipos de residuos que producen, debido a que todo residuo que generan lo identifican y almacenan como residuos peligrosos sin un diagnóstico previo de estos, como se muestra en la figura 3.

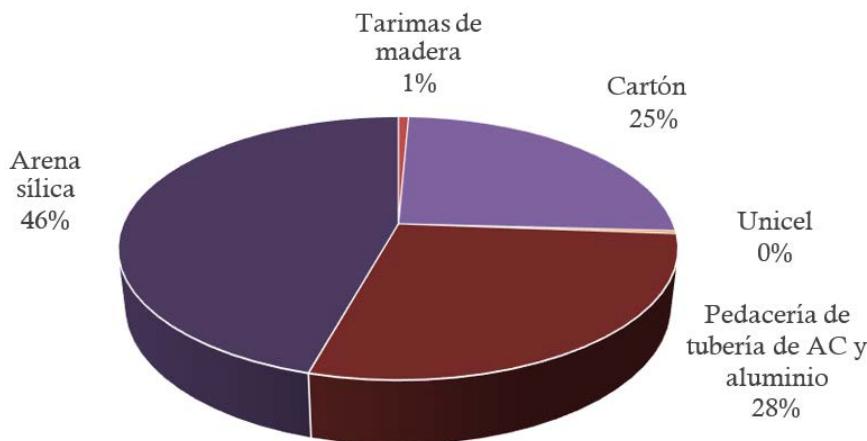
**Figura 3.** Almacén de residuos



Fotografía de Salma Humphreys.

Por otro lado, de acuerdo con el reglamento de la LGPGIR, los residuos peligrosos que se generan en los procesos productivos son la escoria de óxidos, envases de pintura, de solventes y sólidos impregnados de estos. La mayor cantidad de residuos generada es de residuos de manejo especial en base a la NOM-161-SEMARNAT-2011.

De acuerdo con la tabla 1, se decidió que los residuos que están sujetos a plan de manejo son las partículas de arena sílica, pedacería de tubería de AC y aluminio y el cartón. Aunque el cartón no se genera en una gran cantidad igual o mayor a 10 toneladas anuales, se incluyó debido a que es un residuo que es valorizable de acuerdo con el diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. A continuación, en la figura 4 se muestran los residuos sujetos a plan de manejo.

**Figura 4.** Porcentaje de cada residuo

Fuente: Elaboración propia.

Así, se dará un manejo a cerca de 99 % del total de RME que se generan en la EMPR esa, como se observa en la figura 4. Los procesos y actividades potenciales de generación de residuos son la limpieza de tubería (proceso de sandblast), proceso de ensamble (juntas manguito) y almacén de acuerdo con la tabla 1.

### **Estrategias de manejo para los RME**

Con base en el análisis que se llevó a cabo se realizaron las propuestas para remediar los incumplimientos detectados de los residuos sujetos a plan de manejo, utilizando como referente los lineamientos de la NOM-161-SE-MARNAT.2011 y la Ley 847 del estado de Veracruz. Por lo tanto, las decisiones que se abordaron para la elaboración del plan de manejo de residuos se menciona a continuación.

En el caso de la pedacería de AC y aluminio, de acuerdo con lo que propuso CYM MATERIALES SA (2018), es importante conocer las características para saber la clasificación del tipo de manejo que se debe de brindar al residuo de las tuberías para poder medir su valorización en el mercado. Es importante mencionar que los fabricantes de acero al carbón

y aluminio generalmente compran chatarra ferrosa directamente por las empresas intermediarias, que son las que generan estos residuos. Por lo tanto, la existencia de metales ferrosos sin recuperar evita el desarrollo de actividades de reciclaje a partir de esta fuente.

De esta manera, los trabajadores realizaron recogedores a partir de este residuo (figura 5), ya que era un residuo que no se podía valorizar con empresas autorizadas para su reciclaje debido a los óxidos que este residuo tenía en la superficie. Los trabajadores decidieron reutilizar este residuo en beneficio de la empresa, así como también lograr un bien económico con su venta.

**Figura 5.** Implementación de la gestión de los residuos de acero al carbón y aluminio

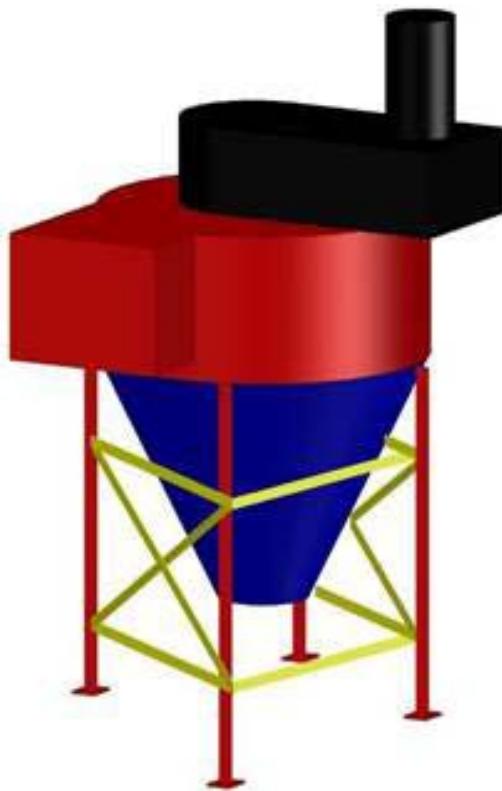


Fotografías de Salma Humphreys.

Por otro lado, en cuanto a los residuos de la arena sílica, en un inicio se pensaba realizar un diseño de una cabina de chorreo, debido a que es un sistema de control el cual se integra un recuperador separador de

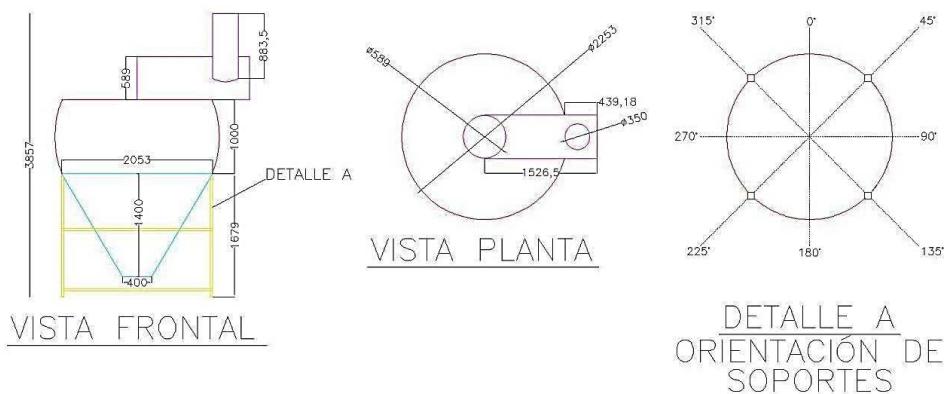
las partículas de arena sílica capturadas y las partículas de los óxidos de las tuberías, pero no resultaba conveniente por los costos de construcción, operación y mantenimiento, como también es un tipo de sistema recomendado para empresas que generen mayor cantidad de partículas. Entonces, en el caso particular de este residuo se elaboró un equipo para la captura de estas. Para esto, se consultó a expertos en el área para diseñar una propuesta de un sistema de control en el programa AutoCAD. Una vez que se diseñó el equipo, se llevaron a cabo propuestas para su gestión, como se muestra en las figuras 6 y 7.

**Figura 6.** Modelo del ciclón, imagen representativa



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.** Plano de detalle del ciclón



Fuente: Elaboración propia.

Por último, una vez que se llevó a cabo la propuesta del manejo interno de los residuos, se realizó una lista minuciosa en la página de la Secretaría del Medio Ambiente del estado de Veracruz de las empresas encargadas de la recolección y transporte que cuentan con autorizaciones vigentes para el manejo de residuo especial, lo cual se enlistan en la siguiente liga: <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/listado-de-prestadores-de-servicios/>. Para la selección, esta se realizó de acuerdo con los servicios que ofrece la empresa y de acuerdo con su ubicación.

## Conclusiones

A través de la identificación de las etapas del proceso del recubrimiento se pudo obtener un panorama completo de las entradas y salidas de cada proceso. De esta manera, se dieron a conocer los puntos donde se generaba mayor volumen de residuos. En el análisis se seleccionaron todos aquellos residuos que están sujetos a plan de manejo de acuerdo con su generación, los cuales fueron los residuos de manejo especial (RME); sin embargo, se detectó que también generan residuos peligrosos, como los botes de pintura que se generan en un alto volumen mensualmente pero que, al ser recolectados y tratados por el mismo proveedor, no fueron contabilizados. Para el cartón y pedacería de tuberías se propusieron medidas de valorización con el objetivo de buscar su reutilización o trata-

miento así no se dispongan en rellenos sanitarios. En el caso de las partículas de arena sílica se diseñó un sistema de control en AutoCAD para la captura de estas partículas.

Aunque todas las estrategias descritas en el proyecto son propuestas, se logró implementar la valorización de los residuos de la pedacería de tubería. A través de la reutilización se han fabricado recogedores con dicho residuo, los cuales se destinarán para su uso interno en la empresa, y se considera su futura venta. Por último, el plan de manejo fue presentado a los responsables del sistema de gestión integral y del área

## Referencias

- CYM MATERIALES SA (2018). Study of costs and performances between Steel Abrasive and Sand. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://cym.com.ar/intranet/Study-of-cost-between-Steel-Abrasive-and-Sandblasting-cym.pdf>
- Ibarra, D., Velazquez, J., Paz, I., Rosales, H., Ibarra Rodríguez, D., Guzmán, M. T. O., Bernardino Velázquez Fernández, J. y Paz, I. (2015). Characterization of leachates of the special handling wastes with different storage ages Oxidative stress and glutaraldehyde View project Characterization of leachates of the special handling wastes with different storage ages. *Research Invenity: International Journal Of Engineering And Science*, 5(1): 1-8. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1319405>
- Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Manejo Especial para el estado de Veracruz (2004). *Gaceta Oficial*. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatatal/Veracruz/wo77544.pdf>
- Muñoz Leal, J. A. (2016). *Propuesta para elaborar una guía de seguridad y salud ocupacional al ejecutar el proceso de sandblasting por operarios en la empresa Halliburton base Yopal* [Tesis de Ingeniería Industrial]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD. Escuelas de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería Ingeniería Industrial.
- Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 (1 de febrero de 2013). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>
- Olán Izquierdo, M. E. (2018). *Ánalisis de la productividad de las empresas dedicadas al manejo integral de residuos del municipio del centro del estado*

*de tabasco para una propuesta de desarrollo* [Tesis de maestría en Pla-  
nificación de Empresas]. Instituto Tecnológico Villahermosa, Tecnológico  
Nacional de México.

Robledo Villalpando, N. L. (2016). *Sistemas y tratamientos de residuos peligro-  
sos* [Tesis de Ingeniería en Procesos Ambientales]. Universidad Autónoma  
Agraria “Antonio Narro”.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [Sedema]. (2019). *Resi-  
duos de Manejo Especial*. Gobierno del Estado de Veracruz-Sedema-Fon-  
do Ambiental Veracruzano. Recuperado el 24 de abril de 2024 de [http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/si-  
tes/9/2020/03/RMEP.pdf](http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/si-<br/>tes/9/2020/03/RMEP.pdf)

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2018). *Informe  
de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas  
ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento  
verde. Edición 2015*. Dirección General de Estadística e Información Am-  
biental, Semarnat. Recuperado el 24 de abril de 2024 de [https://apps1.  
semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7\\_Residuos.pdf](https://apps1.<br/>semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf)

# Identificación y evaluación enzimática de hongos aislados de la región de Tepic, Nayarit, con alta contaminación por plásticos

Eduardo Antonio TRILLO HERNÁNDEZ•  
Roberto Javier DE LA ROSA MORA••  
Pedro Ulises BAUTISTA ROSALES•••  
María Marcela ROBLES MACHUCA••••  
Leticia CASAS GODOY•••••

## Resumen

Uno de los principales problemas de contaminación en el planeta es la contaminación por plásticos derivados del petróleo, su uso indiscriminado y la pobre incorporación en la cadena de reciclaje, que han ocasionado una sobreacumulación en el planeta. Los hongos son una opción viable para proponer una solución al problema de contaminación por plásticos, ya que su naturaleza saprófita los hace excelentes candidatos para colonizar sustratos complejos. Teniendo como base el mecanismo de degradación enzimática del polietileno-tereftalato (PET) descrito en *Ideonella sakaiensis* -201-F6 por la enzima extracelular PETasa y MHTasa, se plantea la existencia de un mecanismo similar en organismos más complejos como los hongos. Por esta razón, el presente trabajo tiene como objetivo aislar, identificar y evaluar hongos que secretan enzimas asociadas a la degradación de polímeros sintéticos. Se realizó un cribado

---

• Estancias posdoctorales por México, comisionado a la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN). <https://orcid.org/0000-0001-5849-3483>. [eduardo\\_trillo@uan.edu.mx](mailto:eduardo_trillo@uan.edu.mx)

•• Licenciatura en Químico Farmaceútico Biólogo por la UAN. <https://orcid.org/0009-0005-9804-569X>. [18007542@uan.edu.mx](mailto:18007542@uan.edu.mx)

••• Edificio de Tecnología de Alimentos, Secretaría de Investigación y Posgrado, UAN. <https://orcid.org/0000-0001-6651-8994>. [ubautista@uan.edu.mx](mailto:ubautista@uan.edu.mx)

•••• Edificio de Tecnología de Alimentos, Secretaría de Investigación y Posgrado, UAN. <https://orcid.org/0000-0003-1307-0609>. [marcela.robles@uan.edu.mx](mailto:marcela.robles@uan.edu.mx)

••••• CONAHCYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Unidad de Biotecnología Industrial. <https://orcid.org/0000-0002-0566-5824>. [lcasas@ciatej.mx](mailto:lcasas@ciatej.mx)

enzimático utilizando sustratos análogos para la detección de la actividad lacasa, cutinasa, lipasa/esterasa y proteasa. La identificación de hongos se realizó por espectrometría de masas MALDI-TOF. Hasta el momento se tienen 13 cepas aisladas, donde 100 % demostraron secretar enzimas hidrolíticas tipo lacasa y esterasa/lipasa, y solo 70 % produjeron proteasas. Los géneros identificados fueron Aspergillus, Pichia y Saccharomyces de los cuales, *Aspergillus fumigatus* se ha asociado a la degradación de poliuretano (PUR), ácido polihidroxibutírico (PHB), poliprolactona (PCL), succinato de polibutileno (PBS), polisulfona (PES), polihidroxialcanoato (PHBV) y ácido poliláctico (PLA). Estos resultados van dirigidos a analizar enzimas extracelulares en el medio por fermentación sumergida en presencia de polímeros sintéticos como sustratos, evaluar la colonización del hongo y degradación polimérica.

**Palabras clave:** Contaminación, plásticos, hongos, sustratos análogos

## Introducción

En la actualidad nuestra vida cotidiana está cubierta de polímeros sintéticos, ya que son pocas las actividades que no generen residuos plásticos, desde empaques de alimentos, hasta pequeños recubrimientos de cables. Estos se acumulan y generan un problema de contaminación. La contaminación por plásticos en los distintos ecosistemas proviene de una serie de factores, de los cuales las actividades antropogénicas que le dan modernidad a nuestra vida diaria son las principales responsables. La comodidad de nuestra vida moderna está cimentada sobre un sinfín de variedades de polímeros sintéticos, tales como espesantes en las pastas de dientes (como el carbopol), iluminadores en maquillaje (como el nailon-6), películas protectoras en tratamientos de belleza (como el polimetilmetacrilato), piezas pequeñas de computadora hechas de acrilonitrilo-butadieno-estireno, recubrimiento de cables (como el policloruro de vinilo y polietileno), empaques de alimentos (como el polietileno de baja densidad), componentes de juguetes (como poliolefinas) o simplemente el contenedor térmico que se utilizó en el desayuno (poliestireno), por mencionar algunos ejemplos (Zadjelovic *et al.*, 2023).

La velocidad con la que las actividades antropogénicas generan residuos plásticos supera por mucho la velocidad con la naturaleza los puede

mineralizar. Esto ha causado una acumulación de plásticos en distintos ecosistemas (Eremeeva *et al.*, 2023). Esta creciente acumulación es diferente en todo el planeta, se concentra en países en vías de desarrollo como los ubicados en la región sur del continente americano (ourworldindata.org/explorers/plastic-pollution). El confinamiento de los residuos plásticos en estos países se realiza en tiraderos al aire libre, en su mayoría expuestos a los factores medioambientales. Estos factores, como la radiación uv causada por el sol, la alta humedad, lluvia y viento, así como los diferentes niveles de acidez ocasionados por los lixiviados y los microorganismos presentes en los desechos orgánicos, proveen un sistema natural de desgastes de residuos plásticos (Chamas *et al.*, 2020).

El proceso de desgaste de los plásticos es heterogéneo; produce piezas de plástico de distintos tamaños, entre ellas, piezas de magnitudes menores a 100  $\mu\text{m}$  (Karbalaei *et al.*, 2018). Estas pequeñas piezas terminan siendo ingeridas por la base de la cadena alimentaria, por el plancton marino, principalmente. Este acontecimiento hace que la comida que hoy está en nuestras mesas contenga partículas de micro y nanoplásticos (Karbalaei *et al.*, 2018). Muchas de las soluciones para resolver el problema de contaminación por plásticos están en fomentar una economía circular y disminuir la producción de envases de plástico virgen, pero este proceso puede tardar mucho tiempo en establecerse. Una de las soluciones biotecnológicas que han impulsado diversas investigaciones sobre la degradación de plásticos es el descubrimiento de la bacteria *Ideonella sakaiensis*, microorganismo que produce las enzimas PETasa y MHTasa para degradar el tereftalato de polietileno (PET) y llevarlo hasta su mineralización, convirtiéndolo en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Yoshida *et al.*, 2021). Este hallazgo es una evidencia contundente de la evolución de los microorganismos y el uso de sustratos complejos como fuentes de carbono; es un fenómeno natural que puede ser replicado por otro microorganismo en cualquier parte del planeta.

Los hongos son una solución biotecnológica que puede emplearse para llevar a cabo el proceso de biorremediación, ya que su naturaleza saprófita les otorga un excelente complejo enzimático para degradar sustratos complicados como la lignina (Bugg *et al.*, 2011) y el petróleo (Sánchez, 2020), por mencionar algunos ejemplos. El suelo es un ecosistema ideal para encontrar microorganismos, y cuando se encuentra en abundancia de contaminantes como los polímeros sintéticos, es muy probable que se encuentre un nicho capaz de sobrevivir con los recursos

que se tiene al alcance, sin importar el clima, ubicación geográfica o grado de contaminación (Łebkowska *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017; Nakei *et al.*, 2022). Actualmente, ya se han reportado especies de hongos que pueden emplear polímeros sintéticos como fuente de carbono (Zahmatkesh Anbarani *et al.*, 2023), por lo cual el presente trabajo tiene como objetivo aislar hongos de lugares con alta contaminación por plásticos con la finalidad de evaluar su potencial para degradar polímeros sintéticos.

## Metodología

### Aislamiento de hongos a partir de plásticos y sedimento

Se recolectaron plásticos y sedimentos de la región con alta contaminación por plásticos en la ciudad de Tepic, Nayarit, localidad del Camichin Juaja en las coordenadas  $21^{\circ}29'33.558''$  latitud norte y  $104^{\circ}47'35.07''$  de longitud oeste. Se recolectaron solamente las muestras de plástico que presentaran síntomas claros de desgaste, así como una fracción del sedimento con el cual el plástico estaba en contacto. Las muestras se almacenaron a  $4^{\circ}\text{C}$  hasta su posterior análisis; fueron cortadas en piezas pequeñas, se pesaron 2 g de plástico y 1 g de sedimento. Ambos fueron integrados en un tubo falcon de 50 ml con 30 ml de agua estéril, y se llevó a homogeneización por 15 min. Después, se realizaron diluciones  $1 \times 10^5$  y se sembraron en Agar Dextrosa-Papa (PDA) ligeramente acidificado con ácido tartárico y 100 M de cloranfenicol, como lo describen Gaddeyya *et al.* (2018). Las siembras fueron incubadas a  $28^{\circ}\text{C}$  durante 24 h. Una vez observado el crecimiento, se seleccionaron colonias con diferente morfología para su purificación.

### Purificación de cepas por resiembra

Las cepas seleccionadas en el aislamiento fueron resembradas en medio PDA con 100M de cloranfenicol, sembradas por triple punción en una sola caja para observar la morfología. Las cajas inoculadas se incubaron a  $28^{\circ}\text{C}$  durante 48 h. Las cepas que presentaron morfologías iguales en al menos dos de los tres puntos de siembra. Se pasaron a otra caja con medio PDA adicionado con 100M de cloranfenicol hasta observar el mismo fenotipo. Una vez observada la misma morfología, se consideró como cepa purifi-

cada. Las cepas purificadas fueron crioconservaron con 15 % de glicerol estéril a -80 °C.

### Cribado enzimático en caja

Utilizando medio PDA con cloranfenicol como base, se prepararon emulsiones con sustratos análogos en un estado de emulsión. Las emulsiones se realizaron a una concentración de 10 g·l<sup>-1</sup> con Tween 80 como agente integrador. Con la ayuda de un sonicador de punta, bajo las condiciones 90 % amplitud con tres pulsos de 30 seg del sonicador a 45 °C, se realizaron las emulsiones. Luego la emulsión fue integrada al medio de cultivo estéril con la ayuda de un agitador magnético y placa de agitación. Las enzimas y sus sustratos análogos analizados se encuentran descritos en la tabla 1.

**Tabla 1.** Sustratos utilizados para detectar enzimas secretadas por hongos

Sustrato análogo	Enzima asociada a la degradación de plástico	Referencia
Tributirina	Esterasa/lipasa	Griebeler <i>et al.</i> (2009)
Aceite de linaza	Cutinasa	Morris <i>et al.</i> (2012)
Leche en polvo	Proteasa	Charnock (2021)
ABTS	Lacasa	More <i>et al.</i> (2011)

Fuente: Elaboración propia

### Identificación por espectrometría de masas, MALDI-TOF

Para la identificación de los hongos aislados se realizó la extracción de proteínas e identificación de espectros por espectrometría de masas usando el equipo MALDI-TOF Microflex Brukerel y el software Flex Control. Los extractos proteicos de los hongos se obtuvieron a partir del crecimiento en medio líquido, utilizando 700 µl de medio de cultivo PDA-cloranfenicol bajo condiciones de crecimiento de 150 rpm a una temperatura de 30 °C durante 48 h. Posteriormente, se recuperó la biomasa por centrifugación a 10,000 rpm durante 5 min. Con ayuda de una micropipeta se retiró el medio de cultivo líquido, manteniendo la biomasa en el tubo. Se lavó la

biomasa en dos ocasiones con ayuda de 1 ml de agua destilada estéril. Despues, se añadieron 300  $\mu$ l de agua estéril y 900  $\mu$ l de etanol al 95 % y se llevó a homogeneización en vortex. Posteriormente, se centrifugó 2 min a 13,000 rpm. Luego, se retiró el sobrenadante con ayuda de una micropipeta y se dejó evaporar el etanol residual completamente durante 10 min a temperatura ambiente. Seguido, se añadió 20  $\mu$ l de ácido fórmico al 70 % y el mismo volumen de acetonitrilo; luego, se centrifugó durante 2 min a 13,000 rpm y tomar 1  $\mu$ l para colocar en la placa de lectura (Reeve and Bachmann 2019).

## Resultados y discusión

### Descripción del punto de muestreo

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de un sitio con alta contaminación por plásticos de la región Tepic, Nayarit. De acuerdo con los datos del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), el sitio marcado como Tepic presenta un clima cálido subhúmedo con una temperatura media anual de 24 °C y una precipitación media anual de 1.150 mm<sup>3</sup>. Como se observa en la figura 1A, el sitio muestreado en Tepic se encuentra en la localidad Camichín de Jauja a 21°29'33.558" latitud norte y 104°47'35.07" de longitud oeste. Este tiradero clandestino cuenta con al menos ocho años de haber iniciado, además de tener contacto con un afluente de agua residual que conecta con la zona industrial de la ciudad, como se observa en la figura 1B y 1C.

**Figura 1.** Localización geográfica del sitio de muestreo Tepic, Nayarit



A) imagen aérea tomada de Google Maps. La estrella amarilla indica la localización exacta del tiradero clandestino. B) Imagen norte del tiradero clandestino. C) Imagen sur del tiradero clandestino. Fuente: Elaboración propia.

### Aislamiento de cepas y cribado enzimático

En el sitio de Tepic se recolectaron un total de 24 muestras de plásticos y sedimentos, tomando como criterio de inclusión el desgaste aparente del polímero. De esta ubicación se obtuvieron 13 cepas de hongos. Debido al origen de las muestras, muchas presentaban más de una morfología

durante el proceso de purificación por resiembra. De las cepas, se reportan solo diez en la tabla 2, ya que se eliminaron las duplicadas. Cabe destacar que algunos hongos no pudieron ser purificados por resiembra, ya que exhiben más de una morfología luego de seis días de observación.

**Tabla 2.** Descripción morfológica de cepas encontradas en el sitio de Tepic, Nayarit

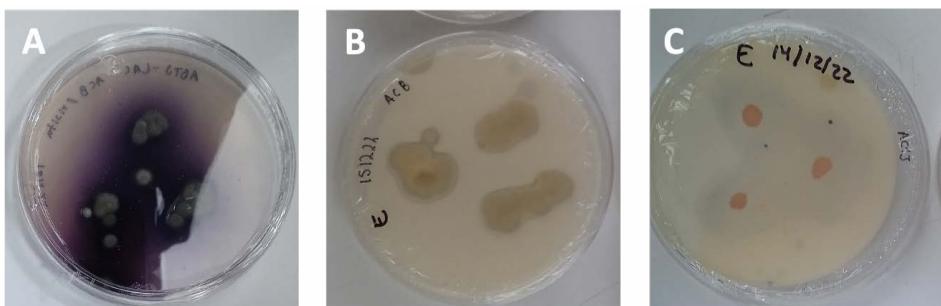
Especie / Tipo de hongo	Morfología de la colonia (forma, elevación y margen)		Polímero sintético del cual fue aislada
	Frente	Reverso	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> / levadura	Colonia redonda, con elevación curvada y sin margen	Blanco opaco	Poliestireno
<i>Aspergillus fumigatus</i> / Filamentoso	Colonia con crecimiento redondo tipo filamentosa, con elevación tipo algodonosa	Centro gris oscuro con márgenes en gris menos intenso	Polietileno de baja densidad
Filamentoso / NI	Colonia de forma irregular y con elevación convexa	Café oscuro en un tono uniforme	Polietileno de baja densidad
Filamentoso / NI	Colonia con crecimiento redondo tipo filamentosa, con elevación tipo algodonosa	Centro gris oscuro con márgenes en gris menos intenso	Desconocido
Filamentoso / NI	Colonia de crecimiento irregular, filamentosa con elevación	Café oscuro al centro con margen claro	Tereftalato de Polietileno
Filamentoso / NI	Colonia de crecimiento irregular, con elevación tipo algodonosa y margen irregular	Amarillo opaco al centro y con bordes blancos al margen	Poliestireno
<i>Pichia Fermentans</i> / NI	Colonia con aspecto cremoso, con elevación	Blanco opaco	Poliestireno
Levadura / NI	Colonia cremosa color naranja con crecimiento sin elevación, no presenta márgenes ni elevación	Naranja opaco	Polietileno de baja densidad
Filamentoso / NI	Colonia filamentosa, crecimiento con elevación tipo algodonoso, con margen filiforme	Amarillo opaco	Desconocido
Levadura / NI	Colonia cremosa color naranja, con elevación convexa, crecimiento regular en círculo sin margen	Color naranja opaco	Polipropileno

Fuente: Elaboración propia

Las colonias aisladas fueron sometidas a pruebas de cribado enzimático, la cual tiene como objetivo identificar el tipo de enzimas secretadas por las cepas sobre medio sólido por presencia o ausencia de halo (zona clara o pérdida de coloración en el medio sólido) alrededor del crecimiento del hongo ante la presencia de sustratos análogos. De las 13 cepas aisladas, todas demostraron tener al menos una actividad enzimática de forma extracelular.

El resultado positivo del cribado enzimático fue evidente. Los ejemplos de la actividad lacasa y esterasa se muestran en la figura 2. La actividad tipo lacasa presenta la aparición de un color azul-purpura en el medio, ocasionado por la degradación del ABTS (figura 2A). Mientras tanto, la actividad esterasa/lipasa (figura 2B y 2C) se presentó como una zona clara alrededor de la colonia. La actividad de ambas enzimas se registró en las cepas aisladas del sitio Tepic, Nayarit (figura 3).

**Figura 2.** Identificación de halo (zona clara) en cepas aisladas del sitio Tepic, Nayarit



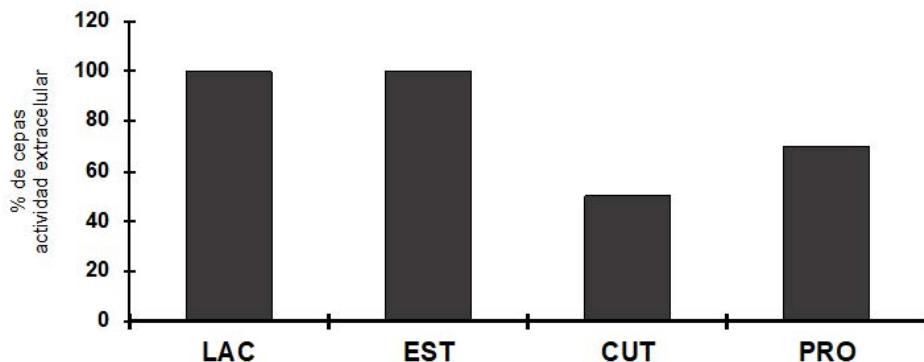
Fuente: Elaboración propia. A) Frente, Cepa AC8 en PDA+ABTS para medir actividad lacasa; B) Reverso, Cepa AC8, en PDA+tributirina para medir lipasa/esterasa; C) Frente, cepa AC13 PDA+tributirina para medir actividad lipasa/esterasa.

Cabe destacar que 100 % mostraron capacidad para crecer y producir enzimas extracelulares capaces de hidrolizar la tributirina-aceite de linaza y ABTS, lo cual indica la posible secreción de enzimas con actividad esterasa/lipasa y lacasa, respectivamente (figura 3). Mientras tanto, la actividad proteasa extracelular se encontró en 70 % de las cepas y la actividad cutinasa en menor proporción con un 50 % del total de las cepas analizadas. Dentro de las características morfológicas de las cepas se encuen-

tran mohos polvosos, hongos filamentosos y levaduras, características morfológicas descritas en la tabla 2.

**Figura 3.** Resultado de cepas con presencia de halo en diferentes sustratos análogos

### Cribado Enzimático del Sitio Tepic Nayarit



LAC: lacasa, EST: esterasa/lipasa, CUT: cutinasa y PRO: proteasa. Fuente: Elaboración propia.

Recientemente, el uso de microorganismos ha ganado especial atención debido a su plasticidad para degradar diferentes tipos de polímeros sintéticos (Nakei *et al.*, 2022). En el caso de los suelos contaminados, ya se tiene evidencia del aislamiento de varios microorganismos capaces de secretar enzimas relacionadas a la degradación de polímeros sintéticos, como lo reporta Nakei *et al.*, (2022) en Tanzania, comunidad de Morogoro. En este estudio se reportan hongos aislados de suelos con alta contaminación por bolsas y envases de plástico, los cuales se encontraban en un basurero clandestino y en tierras de cultivo abandonadas. En ambos sitios, el número de hongos encontrados en la siembra masiva fue  $1.6 \times 10^4$  y  $4.7 \times 10^4$ , de los cuales se lograron aislar 16 y 8 cepas, respectivamente. La complejidad del trabajo para la purificación de cepas, desde la primera siembra hasta la obtención de la cepa pura, puede verse comparada con los aislados obtenidos por Nakei *et al.*, (2022). Sus resultados fueron similares al o encontrado en nuestro estudio.

## Identificación de las cepas aisladas del sitio Tepic Nayarit

Las especies identificadas en el presente estudio fueron *Aspergillus fumigatus*, *Pichia fermentans* y *Saccharomyces cerevisiae*. Hasta el momento, no se encuentran registros en la base de datos PlasticDB (<https://plasticdb.org/>) y PMDB (<http://pmbd.genome-mining.cn/>) sobre *S. cerevisiae* como organismo degradador de plásticos. En este trabajo, se encontró crecimiento de *S. cerevisiae* en medio sólido con actividad enzimática para esterasa/lipasa y lacasa, indicando presencia de actividad enzimática asociada a la degradación de polímeros sintéticos. Investigaciones recientes indican que *S. cerevisiae* ha sido utilizada en diversos procesos de biorremediación, como lo reportan Zahmatkesh *et al.* (2023). En dicho estudio se utiliza a *S. cerevisiae* (ATCC 9763) como agente biológico para eliminar polímeros de poliestireno (PS) menores a los 100  $\mu\text{m}$ , logrando eliminar 98 % de los polímeros de PS de la suspensión (Zahmatkesh *et al.*, 2023).

El hongo unicelular *S. cerevisiae* también se ha evaluado frente a otro tipo de polímeros sintéticos, como el policloruro de vinilo (PVC) (Markić *et al.* 2023). En dicho estudio, se pone a prueba la capacidad de *S. cerevisiae* y de cuatro cepas más –*Candida parapsilosis*, *Rhodotorula glutinis*, *Geotrichum candidum* y *Trichosporon sp.*– para evaluar su eficiencia como agentes de biorremediación con partículas de PVC de 25-100  $\mu\text{m}$ . Cabe destacar que esta última aseveración proviene de un trabajo reportado por Markić *et al.* (2023), por lo que es posible que más investigaciones se están llevando a cabo. Es evidente que la búsqueda de microorganismos que puedan secretar enzimas degradadoras de polímeros sintéticos es un tópico que se encuentra aún en desarrollo, como lo demuestran los estudios reportados para hongos unicelulares adheridos a polímeros sintéticos descritos anteriormente. Además, en los resultados obtenidos de este trabajo también se encontró *Pichia fermentans* en polímeros de PS, cepa de la cual no se tiene evidencia de su capacidad para secretar enzimas asociadas a la degradación de polímeros sintéticos, por lo que se seguirá realizando investigación experimental.

Por último, el hongo filamentoso *Aspergillus fumigatus* fue encontrado y aislado en muestras de polietileno de baja densidad (PEBD). De acuerdo con los resultados obtenidos, este hongo filamentoso fue capaz de secretar proteínas al exterior de la membrana plasmática del tipo lacasa y esterasa/lipasa. Estos resultados refuerzan la información reportada

por diversos investigadores en la literatura, ya que desde el año 2000, existe evidencia que indica la capacidad de *A. fumigatus* para degradar polímeros sintéticos como el poliéster (Sanchez *et al.* 2000). Dentro de la base de datos Plastic DB existen 21 registros que demuestran mediante evidencia experimental que *A. fumigatus* secreta proteínas tipo esterasa (Osman *et al.* 2018; Jung *et al.*, 2018) capaces de degradar polímeros sintéticos como polihidroxibutirato, succinato de polietileno y succinato de polibutileno, así como poliuretano -poliester (Álvarez-Barragán *et al.*, 2016) y polietileno de baja densidad (Chigwada *et al.*, 2023). Debido a las múltiples actividades enzimáticas presentadas, *A. fumigatus* es un excelente candidato para realizar experimentos de fermentación sumergida con polímeros sintéticos.

## Conclusiones

Con estos resultados se demuestra que los hongos aislados en el sitio de Tepic pueden ser planteados como una solución biotecnológica para resolver el problema de la acumulación de plásticos en el planeta. Las 13 cepas aisladas del sitio de Tepic, Nayarit, fueron capaces de secretar enzimas asociadas a la degradación de plásticos, siendo las actividades esterasa/lipasa y lacasa las presentes en 100 % de los hongos analizados, así como actividad proteasa y cutinasa en 70 y 50 %, respectivamente. Hasta el momento, *A. fumigatus*, *P. fermentans* y *S. cerevisiae* han sido identificadas por extractos proteicos, siendo *A. fumigatus* la cepa que presenta mayor actividad sobre todos los sustratos analizados. Actualmente, todas las cepas aisladas de este sitio son candidatas para continuar evaluando su capacidad de degradar polímeros sintéticos en condiciones de fermentación en medio líquido.

## Referencias

- Álvarez-Barragán, J., Domínguez-Balfagón, L., Vargas-Suárez, M., González-Hernández, R., Aguilar-Osorio, G. y Loza-Tavera, H. (2016). Biodegradative Activities of Selected Environmental Fungi on a Polyester Polyurethane Varnish and Polyether Polyurethane Foams. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(17): 5225-5235. <https://doi.org/10.1128/aem.01344-16>

- Bugg, T. D.H., Ahmad, M., Hardiman, E. M. y Rahmanpour, R. (2011). Pathways for Degradation of Lignin in Bacteria and Fungi. *Natural Product Reports*, 28(12): 1883-1896. <https://doi.org/10.1039/C1NP00042J>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L. y Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(9): 3494-3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Charnock, C. (2021). Norwegian Soils and Waters Contain Mesophilic, Plastic-Degrading Bacteria. *Microorganisms*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010094>
- Chigwada, A. D., Oduor Ogola, H. J. y Tekere, M. (2023). Multivariate analysis of enriched landfill soil consortia provide insight on the community structural perturbation and functioning during low-density polyethylene degradation. *Microbiological Research*, 274. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2023.127425>
- Eremeeva, N. A., Savoskina, O. A., Poddymkina, L. M., Abdulmazhidov, K. A. y Gamidov, A. G. (2023). Analysis of Anthropogenic Impact on the Environment, Measures to Reduce It, and Waste Management. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1114422>
- Gaddeyya, G., Shiny Niharika, P., Bharathi, P. y Ratna Kumar, P. K. (2012). Isolation and Identification of soil mycoflora in different crop fields at Salur Mandal. *Advances in Applied Science Research*, 3(4): 2020-2026. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91006632>
- Griebeler, N., Polloni, A. E., Remonatto, D., Arbter, F., Vardanega, R., Cchet, J. L., Di Luccio, M., de Oliveira, D., Treichel, H., Cansian, R. L., Rigo, E. y Ninow, J. L. (2009). Isolation and Screening of Lipase-Producing Fungi with Hydrolytic Activity. *Food and Bioprocess Technology*, 4(4): 578-586. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-008-0176-5>
- Jung, H. W., Yang, M. K. y Su, R. C. (2018). Purification, characterization, and gene cloning of an *Aspergillus fumigatus* polyhydroxybutyrate depolymerase used for degradation of polyhydroxybutyrate, polyethylene succinate, and polybutylene succinate. *Polymer Degradation and Stability*, 154: 186-194. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2018.06.002>
- Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T. R. y Cole, M. (2018). Occurrence, Sources, Human Health Impacts and Mitigation of Microplastic Pollution. *Environ-*

- mental Science and Pollution Research*, 25(36): 36046-36063. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3508-7>
- Łebkowska, M., Zborowska, E., Karwowska, E., Miaśkiewicz-Peska, E., Muszyński, A., Tabernacka, A., Naumczyk, J. y Jeczalik, M. (2011). Bioremediation of Soil Polluted with Fuels by Sequential Multiple Injection of Native Microorganisms: Field-Scale Processes in Poland. *Ecological Engineering*, 37(11): 1895-1900. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2011.06.047>
- Markić, M., Bule Možar, K., Martinjak, V., Miloloža, M., Cvetnić, M., Bolanča, T., Kučić Grgić, D. y Ukić, Š. (2023, 28-31 de marzo). *Comparison of Different Yeast Cultures in the Biodegradation of Polyvinyl Chloride Microplastics*. 28<sup>th</sup> Croatian Meeting of Chemists and Chemical Engineers, 229. Rovinj, Croatia.
- Nakei, M. D., Misinzo, G., Tindwa, H. y Semu, E. (2022). Degradation of polyethylene plastic bags and bottles using microorganisms isolated from soils of Morogoro, Tanzania. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1077588>
- Osman, M., Mehmood Satti, S., Luqman, A., Hasan, F., Shah, Z. y Ali Shah, A. (2018). Degradation of Polyester Polyurethane by *Aspergillus Sp.* Strain S45 Isolated from Soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(1): 301-310. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0954-0>
- Rueda, H., Prieto, E. y Jiménez, C. (2020). Cutinases obtained from filamentous fungi: a comparison of screening methods. *DYNA*, 87(214): 183-190. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n214.83737>
- Sánchez, C. (2020). Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. *Biotechnology Advances*, 40. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2019.107501>.
- Sanchez, J. G., Tsuchii, A. y Tokiwa, Y. (2000). Degradation of Polycaprolactone at 50 °C by a Thermotolerant *Aspergillus Sp.* *Biotechnology Letters*, 22(10): 849-853. <https://doi.org/10.1023/A:1005603112688>
- Wang, S., Xu, Y., Lin, Z., Zhang, J., Norbu, N. y Liu, W. (2017). The harm of petroleum-polluted soil and its remediation research. *AIP Conference Proceedings*, 1864(1). <https://doi.org/10.1063/1.4993039>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Taniguchi, I. y Oda, K. (2021). *Ideonella sakaiensis*, PE-Tase, and Mhetase: From Identification of Microbial PET Degradation to Enzyme Characterization. *Methods in Enzymology*, 648: 187-205. <https://doi.org/10.1016/BS.MIE.2020.12.007>

- Zadzelovic, V., Wright, R. J., Walker, T. R., Avalos, V., Marín, P. E., Christie-Oleza, J. A. y Riquelme, C. (2023). Assessing the Impact of Chronic and Acute Plastic Pollution from Construction Activities and Other Anthropogenic Sources: A Case Study from the Coast of Antofagasta, Chile. *Marine Pollution Bulletin* 195: 115510. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2023.115510>
- Zahmatkesh Anbarani, M., Esmaeili Nasrabadi, A. y Bonyadi, Z. (2023). Use of *Saccharomyces cerevisiae* as new technique to remove polystyrene from aqueous medium: modeling, optimization, and performance. *Applied Water Science*, 13(8): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01970-x>

# Efecto del ultrasonido sobre las propiedades estructurales de películas biodegradables de almidón y fibras naturales

Anick Nahomi MOLINA CERVANTES•

Rocío de los Ángeles GARCÍA HERNÁNDEZ••

César Alberto ROLDÁN CRUZ•••

Pamela Celeste FLORES SILVA••••

Israel SIFUENTES NIEVES•••••

## Resumen

Los polímeros son uno de los materiales más importantes en la actualidad dadas sus características y procesabilidad, que les permiten emplearse en distintos sectores; no obstante, los problemas medioambientales que conlleva el uso de polímeros derivados del petróleo han impulsado la necesidad de usar fuentes renovables llamadas biopolímeros, entre los cuales se ha destacado el almidón debido a sus propiedades fisicoquímicas, principalmente, su abundancia y propiedades formadoras de película. Sin embargo, algunas de ellas limitan su uso en diversas aplicaciones, lo que ha motivado el desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras para incrementar sus propiedades funcionales. En este estudio se describe el efecto de la modificación por ultrasonido (2, 5 y 10 min) sobre las propiedades estructurales de películas biodegradables de almidón (arroz, maíz y papa) reforzadas con fibras de agave azul con el objetivo de evaluar los

---

• Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana región Xalapa (uv Xalapa). anick.naho@gmail.com

•• Doctorado en Ingeniería Química; Facultad de Ciencias Químicas, uv Xalapa. rocigarcia@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4333-2657>

••• Doctorado en Biotecnología, Facultad de Nutrición, Universidad Veracruzana región Veracruz. croldan@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8992-8176>

•••• Doctorado, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila. pam\_85@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8080-5663>

••••• Doctorado, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila. israel.sifuentes@ciqa.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4616-4161>

cambios producidos por la sonicación y la influencia de la fuente botánica de almidón sobre las propiedades de adherencia almidón-fibra.

**Palabras clave:** almidón, fibra de agave, material compuesto, ultrasónico, propiedades estructurales.

## Introducción

La necesidad de materiales biodegradables con los requerimientos que les permitan competir contra los polímeros derivados del petróleo ha impulsado el uso de biopolímeros como alternativa, entre los que se encuentra el almidón. Pese a las propiedades atractivas de dicho polisacárido, su elevada susceptibilidad al agua y baja resistencia que limita su uso, se ha hecho uso de materiales compuestos, los cuales buscan mejorar sus propiedades y contrarrestar dichas deficiencias (Zhu, 2015; Zwawi, 2021). Los materiales compuestos se integran por una fase continua y una dispersa en donde se emplean distintos tipos de reforzadores, entre los que se encuentran las fibras naturales debido a su baja densidad y costo económico (Atkin *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 2015). No obstante, tanto el almidón como las fibras naturales presentan componentes amorfos en su estructura supramolecular que entorpecen las interacciones entre ambos e impiden el reforzamiento del material. Más aún, existen diversos procedimientos químicos capaces de mejorar su unión, que implican el uso de agentes corrosivos y dañinos al medioambiente y a la salud (Rojas-Bringas *et al.*, 2021).

En contraposición, se ha optado por el empleo de métodos sostenibles, entre los que se encuentra la modificación por ultrasónico, la cual emplea ondas sonoras de alta frecuencia que incrementan la temperatura y presión del medio a partir de la cavitación acústica, cuya formación e implosión de burbujas puede fomentar las interacciones entre el almidón y la fibra e incrementar sus propiedades (Asrofi *et al.*, 2018). En este sentido, se ha reportado que el uso de ultrasónico en el almidón de jícama (*Pachyrhizus erosus*) y nanofibras obtenidas de frutos vacíos de palma aceitera, mejora las propiedades de interacción entre estos biopolímeros y el rendimiento de la película obtenida (Abrial, Anugrah *et al.*, 2018). Por todo lo anterior descrito, es fundamental dilucidar los distintos mecanismos que rigen la naturaleza de las interacciones entre ambas

moléculas para desarrollar materiales biodegradables con propiedades incrementadas capaces de competir contra los polímeros convencionales.

## Metodología

### Elaboración de películas biodegradables

Se elaboraron 15 suspensiones formadoras de película con 100 mL de agua destilada, 4 g de almidón granular de distintas fuentes botánicas (arroz, maíz y papa), 30 % p/p de fibras de agave y de glicerol. Posteriormente, las soluciones se calentaron a 70 °C durante 10 minutos hasta gelatinizar y se sonicaron empleando un equipo de ultrasonido con una punta ultrasónica de alta frecuencia operada a 20 kHz y 42 % de amplitud durante 2, 5 y 10 min manteniendo una temperatura en el medio de  $70 \pm 5$  °C. Posteriormente, las muestras se vertieron sobre placas acrílicas y se secaron a temperatura ambiente (25 °C) durante 48 h manteniendo una humedad relativa de 50 % hasta formar películas delgadas biodegradables, las cuales fueron desmoldadas y almacenadas para su posterior análisis (Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023).

### Caracterización morfológica, estructural, calorimétrica y mecánico-dinámica

El análisis morfológico se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido (SEM) operado a 15 kV y con un aumento de 500x. Asimismo, se realizó un análisis de difracción de rayos x en un difractómetro con una línea de radiación CuK $\alpha$  configurado con una potencia de 40 kV y 25 mA para mostrar imágenes con un rango angular de  $2\theta$  (5-50°, aproximadamente), con un paso angular de 0.05° y un tiempo de conteo por paso angular de 15 s. El índice de cristalinidad fue calculado partiendo de la ecuación 1, en donde A1 y A2, con unidades arbitrarias (u. a.), se encuentran referidas a las áreas cristalina y amorfas de los patrones de difracción de rayos x.

**Ecuación 1.** Índice de cristalinidad

$$I_c = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \times 100\%$$

Fuente: Elaboración propia con base en Sifuentes-Nieves *et al.*, 2021.

Por su parte, se analizó el orden molecular de las películas mediante el análisis de infrarrojos por transformada de Fourier, en el cual se empleó un espectrómetro para generar espectros con una resolución de 1 cm<sup>-1</sup> en un rango de barrido de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>. Las lecturas obtenidas se decovolucionaron haciendo uso de funciones gaussianas para la determinación de las relaciones 1047/1022 y 995/1022 (Lozano-Vazquez *et al.*, 2021).

La estabilidad de las muestras se evaluó con un analizador TGA Q5000 de TA Instruments, E. U. A., dentro del cual los especímenes ingresaron al equipo con un peso aproximado de 8 a 10 mg, en donde se calentaron en un rango de temperaturas de 50-700 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min y con un flujo de nitrógeno de 50 mL/min; se determinó la pérdida de peso a partir del cálculo de la diferencia de peso en los rangos de temperatura 50-100 °C (P. P. 1), 100-250 °C (P. P. 2) y 250-400 °C (P. P. 3) mediante el uso del software TA Instruments Universal Analysis 2000. De manera análoga, se estudiaron las transiciones térmicas de los materiales haciendo uso de un calorímetro en el que se colocaron muestras de 5-7 mg en bandejas de aluminio DSC herméticamente selladas las cuales fueron las cuales se calentaron desde 25 °C hasta 220 °C manteniendo una tasa de calor de 10 °C/min en el calorímetro. Las variables mencionadas previamente fueron calculadas empleando el programa STARE Version 9.30.

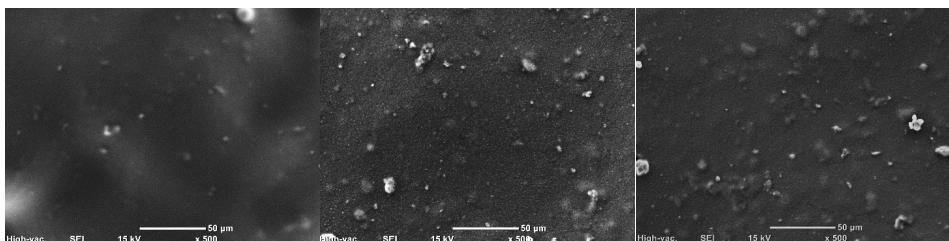
Finalmente, se realizaron pruebas mecánico-dinámicas empleando un equipo térmico mecánico dinámico Q800 de TA Instruments, E. U. A. en atmósfera de nitrógeno (20 ml/min) en cuyo interior se analizaron las muestras en un rango de temperaturas de 30-100 °C a una tasa de calentamiento de 5 °C/min y una frecuencia oscilatoria de 1 Hz, las cuales mantuvieron un peso aproximado de 8 mg.

## Resultados y discusión

### Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Después de 10 minutos de ultrasonido, las muestras a base de almidón de arroz (figura 1a), maíz (figura 1b) y papa (figura 1c) exhibieron superficies con una mayor homogeneidad sin poros o fisuras visibles, así como una mayor transparencia y un menor número de aglomeraciones; asimismo, se observó la desaparición de las líneas blanquecinas correspondientes a la unión interfacial entre la fibra y el almidón, lo que sugiere el incremento de las interacciones intermoleculares entre ambos polímeros y del compactamiento de los compuestos por efecto de la modificación. De acuerdo con Abral, Anugrah *et al.* (2018) y Abral, Putra *et al.* (2018), el aumento de la unión fibra-matriz en los biocompuestos es capaz de restringir el deslizamiento de las fracciones insolubles de las películas de almidón, obteniéndose la remoción de imperfecciones en la superficie y la mejora de las propiedades de tracción. No se notó evidencia alguna de la presencia de estructuras insolubles de almidón gelatinizado (*ghosts*) en ninguna de las películas sonicadas durante 10 min; no obstante, los materiales mostraron pequeñas partículas dispersadas por toda la superficie que se presume puedan tratarse de fragmentos sólidos producto de la disruptión de *ghosts*. La remoción de estas estructuras insolubles se atribuye a las ondas ultrasónicas de elevada velocidad generadas por el tratamiento, las cuales, a su vez, inducen altos gradientes de presión y fuerzas de cizallamiento en la solución formadora de película capaces de romper las fracciones insolubles de las películas de almidón y fibras de agave (García-Hernández *et al.*, 2017). Además, estudios previos informan que la remoción de dichas imperfecciones implica el incremento de las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los materiales (De Albuquerque *et al.*, 2014; Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023).

**Figura 1.** Imágenes SEM a 500 X de muestras de almidón de arroz (a), maíz (b) y papa (c) y fibras de agave tratadas durante 10 min.



Fuente: Elaboración propia.

## Difracción de rayos x (XRD)

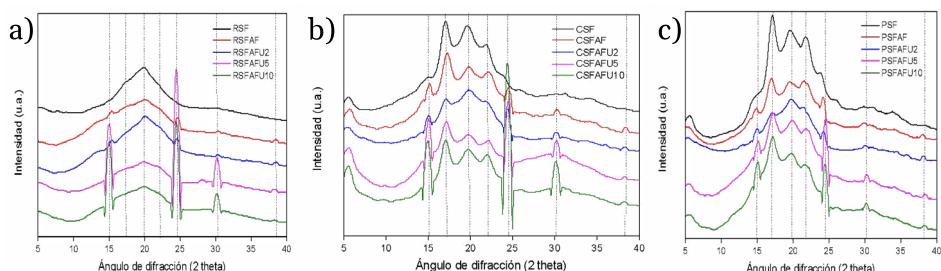
Los biocompuestos a base de almidón de arroz mostraron patrones de difracción del tipo A, además de una menor sensibilidad al tratamiento (indicado por la intensidad de sus picos), mientras que los elaborados a base de maíz y papa presentaron patrones típicos tipo B, en donde los almidones de papa denotaron las intensidades más bajas en los picos característicos de las curvas XRD; además, todas las muestras demostraron picos nuevos a  $2\theta=15^\circ, 24^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  y  $38^\circ$  debidos a la adición de fibras de agave (French, 2013; Pankaj *et al.*, 2015). Se puede observar en la tabla 1 que las películas de almidón de papa tratadas por 5 min y las de arroz y maíz sonicadas por 10 min mostraron las cristalinidades más altas, lo cual puede deberse al volumen de amilopectina (AMP) y amilosa (AM) en la matriz de las películas, los cuales indican indirectamente la disrupción de *ghosts* ocasionada por el tratamiento, puesto que de acuerdo con lo reportado por Abral *et al.* (2019), la desaparición de *ghosts* y la eventual liberación de mayores volúmenes de AMP es capaz de modificar ligeramente el ángulo de difracción de algunos picos presentes en el patrón de difracción de las muestras, como puede observarse en la figura 2. Dicho fenómeno podría relacionarse con la generación de nuevos enlaces de hidrógeno intermoleculares entre las cadenas cortas de AMP con la celulosa reactiva de las fibras. Pese a lo previamente discutido, las exposiciones prolongadas al ultrasonido podrían derivar en la depolimerización del almidón, disminuyendo la cristalinidad de las películas (Abral, Anugrah *et al.*, 2018; Abral, Putra *et al.*, 2018; Iida *et al.*, 2008; Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023; Qiang *et al.*, 2007; Zuo *et al.*, 2012).

**Tabla 1.** Índice de cristalinidad de muestras de almidón de arroz, maíz y papa antes y después del tratamiento

Muestra	(%)
RSF	25.07
RSFAF	23.92
RSFAFU2	24.92
RSFAFU5	43.84
RSFAFU10	36.79
CSF	22.08
CSFAF	28.08
CSFAFU2	49.96
CSFAFU5	34.87
CSFAFU10	45.69
PSF	16.83
PSFAF	22.09
PSFAFU2	29.68
PSFAFU5	27.26
PSFAFU10	22.95

Fuente: Elaboración propia.

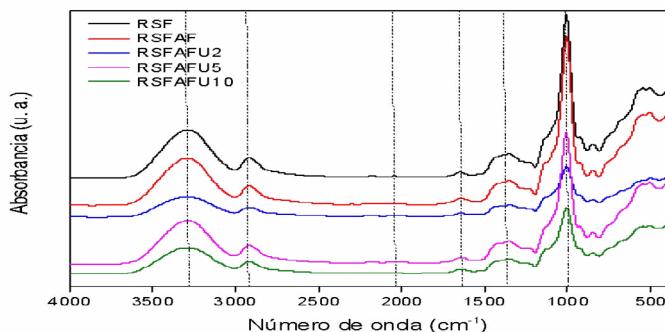
**Figura 2.** Difractogramas de muestras de almidón de arroz (a), maíz (b) y papa (c) y fibras de agave antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia.

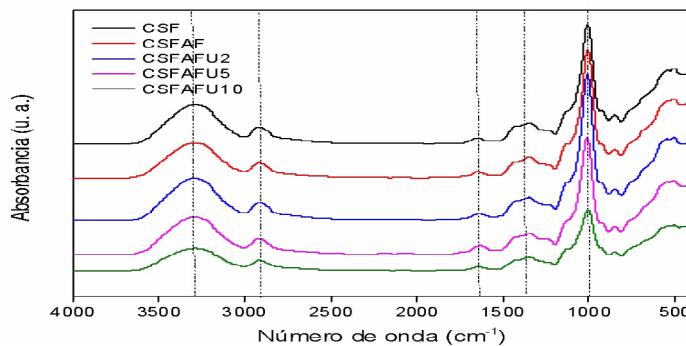
El espectro FTIR de las películas de almidones nativos de arroz, maíz y papa y de aquellas reforzadas con fibras de agave modificadas con ultrasónico se muestran en las figuras 3, 4 y 5, respectivamente.

**Figura 3.** Espectro FTIR de películas a base de almidón de arroz y fibras de agave antes y después del tratamiento



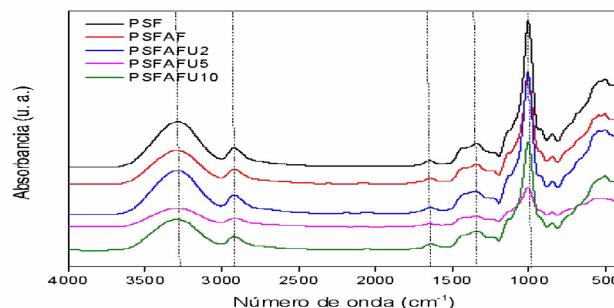
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.** Espectro FTIR de películas a base de almidón de maíz y fibras de agave



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Espectro ftir de películas a base de almidón de maíz y fibras de agave



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 se enlistan las relaciones R(1047/1022) y R(995/1022) de las películas de almidón y fibras de agave nativas y ultrasonicadas.

**Tabla 2.** Variación de las relaciones 1047/1022 y 995/1022

Muestra	1047 / 1022	995 / 1022
RSF	0.21	1.04
RSFAF	0.23	1.06
RSFAFU2	0.46	1.69
RSFAFU5	0.21	0.94
RSFAFU10	0.40	1.33
CSF	0.29	1.48
CSFAF	0.28	1.26
CSFAFU2	0.22	1.07
CSFAFU5	0.26	1.09
CSFAFU10	0.33	1.58
PSF	0.23	1.37
PSFAF	0.26	1.32
PSFAFU2	0.19	1.05
PSFAFU5	0.76	3.06
PSFAFU10	0.24	1.42

Fuente: Elaboración propia.

En general, las muestras presentaron una disminución de las relaciones R(1047/1022) y R(995/1022) en tiempos prolongados de ultrasonido mayores a 5 min (a excepción de CSFAFU10). Ello señala una disminución en la alineación de las cadenas de almidón en comparación con las muestras control. Lo anterior sugiere que el empleo de tiempos de ultrasonido reducidos podría aumentar el ordenamiento intermolecular relacionado con el incremento de la densidad de dobles hélices de almidón y el número de interacciones almidón-fibra. Por su parte, las discrepancias entre las relaciones R(1047/1022) y R(995/1022) e índices de cristalinidad entre cada fuente botánica señalan diferencias entre las fuerzas de enlace de los cristalitos de almidón y contenido de AM y AMP, como se ha puntualizado en el análisis XRD (Abral *et al.*, 2019; Jambrak *et al.*, 2010). Además, la cavitación ultrasónica generada por el tratamiento, al ser capaz de incrementar los sitios activos de la superficie de las fibras

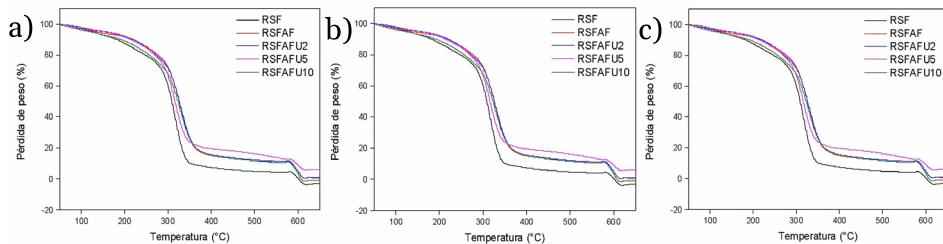
(celulosa cristalina y grupos OH fenólicos oxidados de lignina), remover grupos OH del almidón y dispersar las fibras en la matriz, promovería la generación de un mayor número de interacciones en la interfaz y de una estructura más compacta que limita el volumen de agua que puede absorber el almidón y restringe la movilidad de las cadenas del polímero y el alineamiento de las hélices dobles, como ha sido reportado por Sifuentes-Nieves, Yáñez Macías *et al.* (2021).

Aunado a ello, diversos autores han informado que la adición de plastificantes limita la alineación de las cadenas de almidón por efecto de la interacción entre ambas moléculas (García *et al.*, 2000), por lo que se propone que el glicerol y las fibras de agave puedan entorpecer la organización de las dobles hélices de la molécula de almidón, disminuyendo la cristalinidad de corto alcance de las muestras RSFAFU10, CSFAFU2 y PSFAFU2, lo cual afecta sus propiedades funcionales. Una explicación adicional recae en los hallazgos encontrados por García-Hernández *et al.* (2017), en cuyo estudio se informa que las dobles hélices que se encuentran contenidas en los dominios gelatinizados de las películas son especialmente susceptibles a la cavitación ultrasónica, por lo que el tratamiento podría repercutir negativamente el orden helicoidal, lo cual se ve reflejado en la disminución de la relación  $R(995/1022)$  respecto al tiempo (Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023).

### **Análisis termogravimétrico (TGA)**

Existen tres etapas de pérdida de peso que pueden distinguirse en un gráfico TGA, las cuales se presentan en la figura 6, así como en la tabla 3 para cada muestra. La primera de ellas se encuentra en el intervalo de temperaturas 30-100 °C, que corresponde a la evaporación y pérdida de agua de las películas; la región 100-250 °C indica la volatilización del plastificante, y finalmente la sección 250-400 °C se relaciona con la descomposición del almidón y la fibra, es decir, la estabilidad de la película (Abral, Anugrah *et al.*, 2018; Asrofi *et al.*, 2018).

**Figura 6.** Curvas de secado de muestras de almidón de arroz (a), maíz (b) y papa (c) y fibras de agave antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Porcentajes de pérdida de peso de películas de almidón (arroz, maíz y papa) reforzadas con fibras de agave antes y después del tratamiento.

Muestra	Pérdida de agua (%)	Pérdida de plastificante (%)	Pérdida de peso de la película (%)
RSF	1.688	15.57	60.13
RSFAF	3.800	15.54	61.82
RSFAFU2	2.325	12.79	69.26
RSFAFU5	2.773	12.58	65.07
RSFAFU10	3.912	14.55	66.05
CSF	1.710	14.27	71.90
CSFAF	1.468	14.68	66.49
CSFAFU2	1.651	12.71	68.29
CSFAFU5	2.260	7.067	77.21
CSFAFU10	1.259	15.17	68.79
PSF	1.873	23.77	62.78
PSFAF	1.295	13.30	70.11
PSFAFU2	1.976	16.11	66.96
PSFAFU5	1.527	17.68	61.65
PSFAFU10	1.781	15.05	67.10

Fuente: Elaboración propia

El ultrasonido fomentó mejorías en todas las películas; no obstante, se mostraron variaciones en la susceptibilidad al tratamiento respecto a la fuente botánica del almidón y al tiempo de tratamiento, las cuales se

deben principalmente a los distintos tipos de cristalinidad del almidón. En general, los materiales de almidón de papa presentaron mayor susceptibilidad al tratamiento debido al patrón cristalino tipo B, el cual posee la particularidad de contener un núcleo helicoidal hidratado, es decir, se tienen más moléculas de agua en el núcleo de los cristales que, al someterse al ultrasonido, disociarán el agua en radicales libres que se dispersarán en el seno de la solución. Tal disrupción de moléculas de agua podría resultar en el entrecruzamiento de las interacciones entre el almidón y la fibra de agave, además de reorganizar las cadenas de AM en hélices dobles cristalinas que originan cristalitos de largo y corto alcance, promoviendo un empaquetamiento helicoidal más compacto (Senanayake *et al.*, 2014; Sifuentes Nieves, 2019; Thomas y Atwell, 1999).

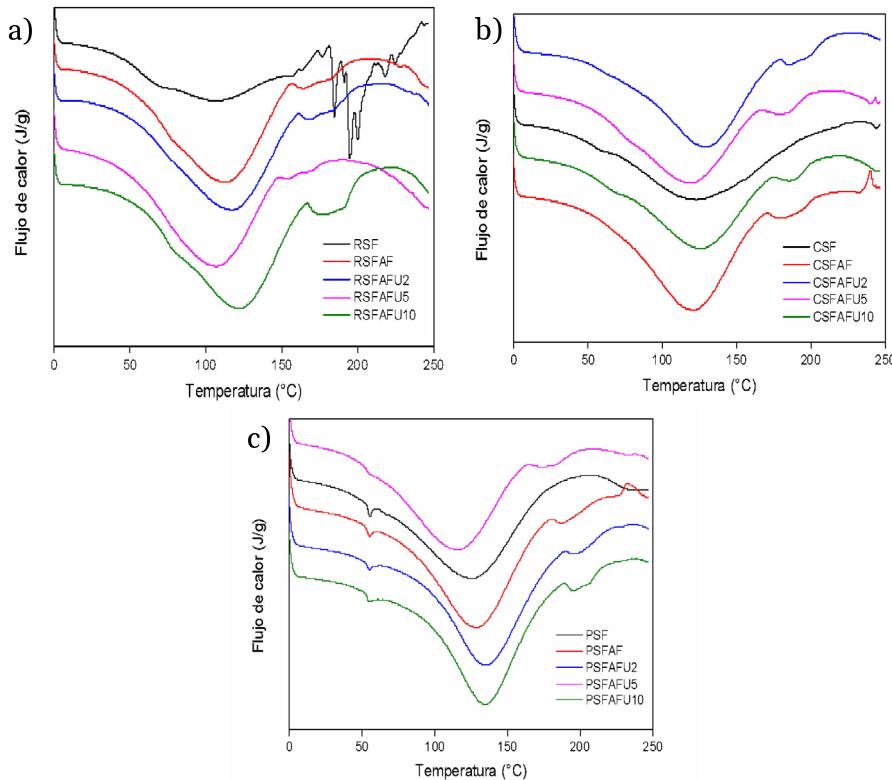
La mejoría en la resistencia térmica de los materiales después de la ultrasonificación se atribuye a la activación de sitios de reacción en la superficie de la celulosa y a la liberación de un mayor contenido de AMP debido a la disrupción de *ghosts* por efecto de la cavitación (Gadhe *et al.*, 2006; Qiang *et al.*, 2007). Ello, aunado a la dispersión de las fibras en el seno de la dispersión debido a las ondas ultrasónicas, fomenta la generación de un mayor número de enlaces de hidrógeno de las fibras de agave con moléculas de almidón y glicerol obstaculizando la degradación de los polímeros, como fue señalado por Sifuentes-Nieves, Yáñez Macías *et al.* (2021). Estas nuevas interacciones y la reducción de moléculas de agua helicoidales derivan en la obtención de microestructuras más compactas con una plastificación más uniforme y un menor volumen de defectos. A su vez, el alto grado de compactamiento de las muestras limita el movimiento de las cadenas de las moléculas de almidón, agave y glicerol, conduciendo al aumento de la resistencia térmica (Abral *et al.*, 2019; García-Hernández *et al.*, 2017). Cabe resaltar que la exposición prolongada a las ondas ultrasónicas podría generar el efecto contrario al hidrolizar las regiones cristalinas de los materiales, como señalan diversos autores (Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023).

### **Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

Se generaron termogramas DSC en donde se analizó la temperatura de fusión ( $T_m$ ), entalpía de fusión ( $\Delta H_m$ ), temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la diferencia de temperaturas inicial y final del endoterma

( $\Delta T$ ). La figura 7 presenta los termogramas referentes a las muestras a base de almidón de arroz, maíz y papa antes y después del tratamiento.

**Figura 7.** Curvas DSC de muestras de almidón de arroz (a), maíz (b) y papa (c) y fibras de agave antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

El tratamiento de ultrasonido incrementó el punto de fusión de todas las muestras, lo cual mejoró la estabilidad térmica de las películas. Este fenómeno se atribuye a la mejora de la dispersión de las fibras en la matriz de almidón debido a las vibraciones inducidas por el tratamiento, lo que fomenta la formación de un mayor número de enlaces fuertes de hidrógeno en la interfaz fibra-matriz y, a su vez, genera una estructura más

compacta (Asrofi *et al.*, 2018; García-Hernández *et al.*, 2017); más aún, el compactamiento de las muestras restringe la movilidad de las cadenas de los biopolímeros, por lo que se obtienen materiales con una mayor resistencia térmica (Liu y Zhang, 2006), lo que concuerda con lo observado en un estudio previo realizado por Abral *et al.* (2019).

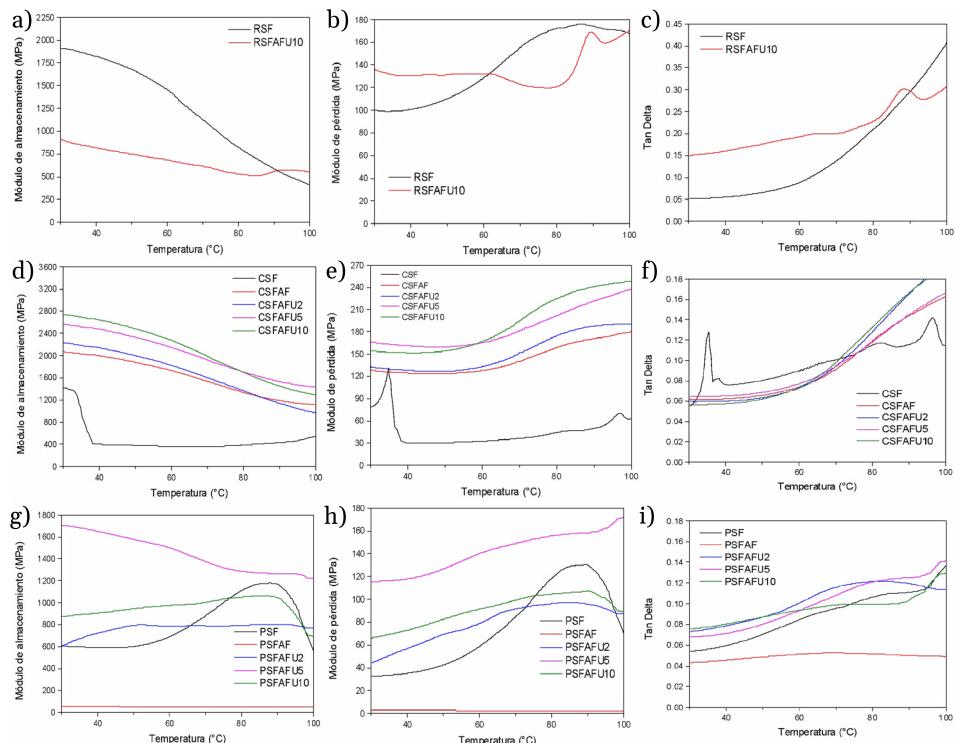
Las películas de almidón nativo de maíz y papa presentaron los valores de  $\Delta H_m$  más elevados en comparación con las muestras sometidas al tratamiento, en donde la muestra control PSF mostró la  $\Delta H_m$  más elevada (156.89 J/g), seguido de CSF (140.26 J/g) y RSF (63.214 J/g); este comportamiento sugiere que dichos compuestos de almidón puro poseen la mayor proporción de cristalitos mejor definidos y un mayor grado de ordenamiento. Después del tratamiento se observaron valores reducidos de  $\Delta H_m$  para las películas de almidón de maíz y papa, mientras que los materiales a base de arroz incrementaron su entalpía de fusión. La disminución de  $\Delta H_m$  en los materiales sonicados se relaciona con la dispersión de las fibras de agave en la matriz de almidón que puede generar imperfecciones en la estructura de las muestras al suministrarles energía, provocando la reducción de la cristalinidad y entalpía de fusión, como fue observado en un estudio realizado por Osman *et al.* (2020). Este comportamiento podría deberse a la formación de enlaces de hidrógeno en la interfaz fibra-matriz; es decir, el tratamiento de ultrasonido entorpece la reasociación de las moléculas de almidón en hélices cristalinas al fomentar las interacciones entre los grupos OH de la celulosa superficial de las fibras y las cadenas largas de almidón, reduciendo el número de grupos hidroxilo “libres” que puedan interaccionar con otras moléculas adyacentes, lo que es concordante con los valores observados de  $T_g$  en las muestras. Además, se propone que la cavitación inducida por las ondas ultrasónicas podría producir radicales libres en el agua que ocasionen el entrecruzamiento de ambos polímeros. En ese sentido, la derivatización sería capaz de interrumpir la generación de enlaces de H en la región cristalina y reducir el requerimiento de energía para la fusión de los cristalitos (Senanayake *et al.*, 2014; Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023; Thomas y Atwell, 1999).

## Análisis mecánico-dinámico (DMA)

La figura 8a, 8b y 8c presenta las curvas referentes al módulo de almacenamiento ( $E'$ ), módulo de pérdida ( $E''$ ) y factor de pérdida ( $\tan \delta$ ) de las películas a base de almidón de arroz antes y después del tratamiento. Por su parte, la figura 8d, 8e y 8f muestran el comportamiento mecánico dinámico de los materiales a base de maíz, y la figura 8g, 8h y 8i, de las muestras a base de papa. Cabe destacar que, para el caso de las muestras de arroz, se analizaron únicamente la película control RSF y la muestra sonicada durante 10 min (RSFAFU10) a causa de la fragilidad de los materiales.

**Figura 8.** Resultados DMA de muestras de almidón de arroz (8a, 8b y 8c), maíz (8d, 8e y 8f), papa (8g, 8h y 8i) y fibras de agave antes y después del ultrasonido.

(a) Módulo de almacenamiento, (b) Módulo de pérdida, (c)  $\tan \delta$



Fuente: Elaboración propia.

Las películas a base de almidón de arroz demostraron poseer mayores propiedades viscosas después de haber sido sometidas al tratamiento; esto es, la película RSFAFU10 presentó un módulo de almacenamiento menor (figura 8a) y valores para el módulo de pérdida (figura 8b) y  $\tan \delta$  (figura 8c) mayores en comparación con la muestra control, lo cual sugiere que el material ultrasonicado poseerá menor rigidez y deformaciones retardadas en el tiempo y una mejor capacidad de amortiguamiento cuando este es expuesto a una carga. Dicho comportamiento viscoso se relaciona con la disrupción de estructuras granulares remanentes de amilopectina debido a las ondas ultrasónicas, las cuales le confieren de rigidez y estabilidad mecánica a las películas, por lo que la disrupción de *ghosts* podría afectar negativamente los valores de  $E'$  y, en consecuencia, disminuir la elasticidad de los materiales a base de arroz, como fue señalado en un estudio previo realizado por García-Hernández *et al.* (2017) y Xie *et al.* (2008).

Del mismo modo, las exposiciones prolongadas al tratamiento podrían resultar en la activación de moléculas de almidón libres con una elevada movilidad de cadena, ocasionando la disminución de las propiedades elásticas y estructurales de las películas biodegradables de almidón de arroz (Abrial, Anugrah *et al.*, 2018). Pese a ello, el ultrasonido pareció mejorar las interacciones entre el almidón y la fibra de agave al incrementar los valores de  $E''$  y  $\tan \delta$ . Ello sugiere un alto cizallamiento molecular interno que deriva en la pérdida de mayores cantidades de energía térmica, probablemente ocasionada por el aumento del compactamiento de las muestras. Las vibraciones ultrasónicas, al mejorar la dispersión de las fibras en la matriz de almidón, fomenta la generación de enlaces de hidrógeno en la interfaz fibra-matriz, provocando la disminución de la movilidad molecular y la obtención de una estructura más compacta (Asrofi *et al.*, 2018).

Los compuestos a base de almidón de papa mostraron una tendencia similar a la de los materiales de almidón de maíz; el tratamiento de ultrasónico incrementó significativamente el módulo de almacenamiento (figura 8g), módulo de pérdida (figura 8h) y  $\tan \delta$  (figura 8i) de las muestras en comparación con la película control (PSF), en donde la película tratada durante 5 min (PSFAFU5) mostró los valores de  $E'$  y  $E''$  más elevados, mientras que el compuesto sonicado durante 2 min (PSFAFU2) denotó el  $\tan \delta$  más alto con valores de gran similitud con la muestra PSFAFU5. El comportamiento de dichos parámetros sugiere la obtención de materiales de gran elasticidad, estructura homogénea y compacta, y de elevada

capacidad de amortiguar cargas; estas características se atribuyen a la viscosidad del almidón de papa, la cual fue la de menor magnitud entre las fuentes botánicas empleadas en este estudio. La baja viscosidad del almidón de papa favoreció la formación e implosión de burbujas cavitacionales producto de las ondas ultrasónicas, efectuándose la remoción un mayor número de *ghosts* y la liberación de numerosas cadenas de AMP que resultan en la formación de enlaces fuertes de hidrógeno con moléculas contiguas de glicerol y celulosa principalmente (Abra, Anugrah *et al.*, 2018; Sifuentes-Nieves *et al.*, 2023).

## Conclusiones

El análisis estructural de las películas biodegradables de almidón reforzadas con fibras de agave azul evidencia que la modificación por ultrasonido permitió incrementar sus propiedades estructurales; sin embargo, estas dependen de la fuente botánica del almidón, es decir, de su viscosidad y contenido de amilopectina. Las pruebas morfológicas, estructurales y mecánico-dinámicas señalan que la disruptión de *ghosts* y la disminución del contenido de lignina y hemicelulosa superficial de las fibras resultan en el incremento de la adhesión almidón-fibra debido a la lixiviación de moléculas de amilopectina, aumentando de este modo el ordenamiento molecular y cristalinidad de los materiales. Así, los resultados obtenidos han podido establecer que la modificación por ultrasonido de películas biodegradables de almidón de diferentes fuentes botánicas reforzadas con fibras de agave azul conlleva la mejora de la adhesión almidón-fibra, especialmente en los gránulos con una mayor proporción de AM y baja viscosidad dado que presentan mayores oportunidades de interactuar con el agave, como es el caso del almidón de maíz y papa.

## Referencias

- Abra, H., Anugrah, A. S., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. y Muslimin, A. N. (2018). Effect of nanofibers fraction on properties of the starch based biocomposite prepared in various ultrasonic powers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116: 1214-1221. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.067>

- Abral, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugiarti, E., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A. y Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. *Food Hydrocolloids*, 93: 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.012>
- Abral, H., Putra, G. J., Asrofi, M., Park, J. W. y Kim, H. J. (2018). Effect of vibration duration of high ultrasound applied to bio-composite while gelatinized on its properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40: 697-702. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.019>
- Asrofi, M., Abral, H., Putra, Y. K., Sapuan, S. M. y Kim, H. J. (2018). Effect of duration of sonication during gelatinization on properties of tapioca starch water hyacinth fiber biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108: 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.165>
- Atkin, N. J., Abeysekera, R. M. y Robards, A. W. (1998). The events leading to the formation of ghost remnants from the starch granule surface and the contribution of the granule surface to the gelatinization endotherm. *Carbohydrate Polymers*, 36(2-3): 193-204. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(98\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00002-2)
- De Albuquerque, M. D. F., Bastos, D. C. y Simão, R. A. (2014). Surface Modification of Starch Films by Plasma. *Macromolecular Symposia*, 343(1): 96-101. <https://doi.org/10.1002/MASY.201300199>.
- French, A. D. (2013). Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs. *Cellulose*, 21(2): 885-896. <https://doi.org/10.1007/S10570-013-0030-4>.
- Gadhe, J. B., Gupta, R. B. y Elder, T. (2006). Surface modification of lignocellulosic fibers using high-frequency ultrasound. *Cellulose*, 13(1): 9-22. <https://doi.org/10.1007/S10570-005-9018-Z>
- García, M. A., Martino, M. N. y Zaritzky, N. E. (2000). Microstructural Characterization of Plasticized Starch-Based Films. *Starch/Stärke*, 52(4): 118-124. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200006\)52:4%3C118::AID-STAR118%3E3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200006)52:4%3C118::AID-STAR118%3E3.0.CO;2-0)
- Garcia-Hernandez, A., Vernon-Carter, E. J. y Alvarez-Ramirez, J. (2017). Impact of ghosts on the mechanical, optical, and barrier properties of corn starch films. *Starch - Stärke*, 69(1-2). <https://doi.org/10.1002/STAR.201600308>
- Iida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A. y Kozuka, T. (2008). Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization

- zation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2): 140-146. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2007.03.029>
- Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Bosiljkov, T., Čvek, D., Tripalo, B. y Gelo, J. (2010). Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(1): 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.051>
- Liu, D. y Zhang, L. (2006). Structure and Properties of Soy Protein Plastics Plasticized with Acetamide. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291(7): 820-828. <https://doi.org/10.1002/MAME.200600098>
- Lozano-Vazquez, G., Alvarez-Ramirez, J., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E. J. y Hernández-Marín, N. Y. (2021). Characterization of Corn Starch-Calcium Alginate Xerogels by Microscopy, Thermal, XRD, and FTIR Analyses. *Starch-Stärke*, 73(7-8). <https://doi.org/10.1002/star.202000282>
- Osman, A. F., Ashafee, A. M. T. L., Adnan, S. A. y Alakrach, A. (2020). Influence of Hybrid Cellulose/Bentonite Fillers on Structure, Ambient, and Low Temperature Tensile Properties of Thermoplastic Starch Composites. *Polymer Engineering and Science*, 60(4): 810-822. <https://doi.org/10.1002/pen.25340>
- Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N. N., O'Neill, L., Tiwari, B. K., Bourke, P. y Cullen, P. J. (2015). Dielectric barrier discharge atmospheric air plasma treatment of high amylose corn starch films. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2): 1076-1082. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.04.027>
- Pereira, P. H. F., Rosa, M. de F., Cioffi, M. O. H., Benini, K. C. C. de C., Milanes, A. C., Voorwald, H. J. C. y Mulinari, D. R. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites: a review. *Polímeros*, 25(1): 9-22. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>
- Qiang, H., Lin, L. y Xiong, F. (2007). Ultrasound effects on the structure and chemical reactivity of cornstarch granules. *Starch/Stärke*, 59(8): 371-378. <https://doi.org/10.1002/star.200700614>
- Rojas-Bringas, P. M., De-la-Torre, G. E. y Torres, F. G. (2021). Influence of the source of starch and plasticizers on the environmental burden of starch-Brazil nut fiber biocomposite production: A life cycle assessment approach. *Science of The Total Environment*, 769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144869>
- Senanayake, S., Gunaratne, A., Ranaweera, K. K. D. S. y Bamunuarachchi, A. (2014). Effect of hydroxypropylation on functional properties of different

- cultivars of sweet potato starch in Sri Lanka. *International Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1155/2014/148982>
- Sifuentes Nieves, I. (2019). *Cold plasma treatment effect on structural and functional properties of films made with high amylose starches* [Tesis doctoral]. Instituto Politécnico Nacional.
- Sifuentes-Nieves, I., Molina-Cervantes, A., Flores-Silva, P. C., Garza-Santibañez, A., Saucedo-Salazar, E., García-Hernández, A. y Hernández-Hernández, E. (2023). Structural performance and eco-efficiency assessment of biofilms obtained by a green Single-Step modification of starch and agave fibers. *Journal of Polymers and The Environment*, 31(11): 4829-4841. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02905-y>
- Sifuentes-Nieves, I., Yáñez Macías, R., Neira Velázquez, G., Velázquez, G., Garcia Hernandez, Z., Gonzalez Morones, P. y Hernández-Hernández, E. (2021). Biobased sustainable materials made from starch and plasma/ultrasound modified Agave fibers: Structural and water barrier performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193: 2374-2381. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.071>
- Thomas, D. J. y Atwell, W. A. (1999). Starch Modifications. En *Starches* (pp. 31-48). Eagan Press.
- Xie, F., Yu, L., Chen, L. y Li, L. (2008). A new study of starch gelatinization under shear stress using dynamic mechanical analysis. *Carbohydrate Polymers*, 72(2): 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.007>
- Zhu, F. (2015). Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch. *Trends in Food Science & Technology*, 43(1): 1-17. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.12.008>
- Zuo, Y. Y. J., Hébraud, P., Hemar, Y. y Ashokkumar, M. (2012). Quantification of high-power ultrasound induced damage on potato starch granules using light microscopy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(3): 421-426. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2011.08.006>
- Zwawi, M. (2021). A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. *Molecules*, 26(2). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26020404>.

# Extracción de biomoléculas de alto valor del *Sargassum* spp.

Celestino GARCÍA GÓMEZ•  
Itzel Celeste ROMERO SOTO•  
Elizabeth GARZA VALVERDE•••  
Elba GONZÁLEZ AGUAYO••••

## Resumen

Las macroalgas son organismos abundantes en los hábitats acuáticos. Dada su alta prevalencia, a menudo dan lugar a problemas ambientales, lo que conduce a complicaciones en la salud humana y a la mortalidad de animales acuáticos. Con el propósito de abordar esta temática, se han explorado varios campos de estudio, incluyendo alimentos, farmacéuticos y cosméticos, para utilizar *Sargassum* spp. Los biocompuestos, incluidos polisacáridos, fenoles y aminoácidos, entre otras sustancias, han ganado considerable interés debido a diversas bioactividades, incluyendo propiedades antivirales, antibacterianas y antitumorales. En la actualidad, se emplean una variedad de métodos de extracción para obtener del *Sargassum* spp., biocompuestos como alginatos, fucoidanos y laminarinas. En este texto este trabajo presenta un análisis sistemático de la extracción optimizada del *Sargassum* spp. Se identificaron un total de 1559 artículos sobre el tema con un creciente aumento en los últimos años, y se reportan las revistas con mayores publicaciones en el tema. La importancia de la extracción de biomoléculas del *Sargassum* spp., en el campo de la ciencia es evidente por su amplia gama de aplicaciones.

• Doctorado en Ciencias con especialidad en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). celestino.garcia@uanl.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4885-4350>

•• Doctorado en Ciencias con especialidad en Biotecnología, ITSON. itzel.romero@cunorte.udg.mx; <https://orcid.org/0000-0001-8669-3781>

••• Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería en Industrias Alimentarias. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. elizabeth.garzava@uanl.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0004-3474-5403>

•••• Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Unidad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas. elba.gonzalez@cunorte.udg.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8377-1334>

**Palabras clave:** *Sargassum spp.*, biomoléculas, extracción, optimización.

## Introducción

La reciente propagación de algas en playas ha llamado la atención sobre el problema mundial del poco control de la presencia de algas. Este problema es causado por el alga flotante *Sargassum spp.*, que afecta principalmente a las aguas de África Occidental y el Caribe (Gray *et al.*, 2021). Se ha mencionado que la abundancia de nutrientes en el océano contribuye al aumento de biomasa dicha alga, la cual bloquea las playas, lo que es negativo para la vida marina porque impide que la luz llegue al fondo del mar, debido a la gran acumulación de biomasa. Se incluyen cuestiones económicas como la disminución del turismo y la alteración de las prácticas de pesca locales. Se han buscado diferentes aplicaciones para abordar el problema de *Sargassum spp.*, como la extracción de sus biomoléculas, su utilización como fuente de alimentos, como bioestimulante agrícola, en la biorremediación de aguas residuales y como una fuente limpia de energía (Gray *et al.*, 2021). Las grandes superficies de las macroalgas les permiten absorber grandes cantidades de dióxido de carbono. La mayoría de este gas se convierte principalmente en polisacáridos, que desempeñan un papel crucial en el ciclo del carbono, tales como laminarinas, alginatos, carragenanos y fucoidanos, que están entre los polisacáridos más prominentes (Zhang *et al.*, 2020). Estos tienen un gran potencial para el uso biomédico en productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos funcionales (Silva *et al.*, 2023).

Encontrar el método de extracción más eficaz y optimizar los parámetros operacionales clave para mejorar el rendimiento y la composición bioquímica es crucial para obtener tales biocompuestos (Ciko *et al.*, 2018). Métodos como la extracción con fluidos supercríticos, líquidos presurizados, disolventes eutécticos profundos, líquidos iónicos, agua subcrítica, ultrasonidos, enzimas y por microondas se utilizan para la extracción de biomoléculas del *Sargassum spp.*. Los fucocoloides son carbohidratos obtenidos de algas, entre ellas, el *Sargassum spp.*; tal es el caso de fucoidan, alginato y laminarin (Jesumani *et al.*, 2019). Estos compuestos poseen propiedades biológicas que incluyen neuroprotectores, antioxidantes, anticancerígenos, anticollagenasa y actividad antibacteriana. Los fucoides son los principales constituyentes bioactivos de *Sargassum spp.*; consisten

principalmente en monómeros de fucosa. La composición química de los fucoides está influenciada por diversos factores, incluyendo la especie, la ubicación geográfica de la extracción y las circunstancias ambientales (Hanjabam *et al.*, 2019). Los fucoides tienen actividades antibacterianas, antivirales, antioxidantes, anticancerígenas y antitumorales (Hanjabam *et al.*, 2019). Los alginatos son compuestos formados por la combinación del ácido algínico y sus derivados con sales  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$  y  $\text{Ba}^{+2}$ . La función principal de esta sustancia es contribuir a la integridad estructural de la pared celular, gracias a sus características fisicoquímicas, como su capacidad para formar geles y su viscosidad. Las investigaciones han demostrado que el ácido algínico inhibe la asimilación de metales tóxicos dentro del cuerpo, sirve como un biocompuesto que previene la neurodegeneración, baja los niveles de colesterol y funciona como fibra dietética, por lo que otorga beneficios para la salud (Nesic *et al.*, 2023). La laminarina es un polisacárido lineal biodegradable y no tóxico. Este biocompuesto exhibe capacidades multifuncionales, incluyendo actividades antitumorales, antioxidantes y antiinflamatorias, así como efectos prebióticos (Cui *et al.*, 2021).

Dadas las características fisicoquímicas de los biocompuestos derivados de las plantas, múltiples industrias, incluyendo la alimentación, medicina y cosmética están mostrando un interés creciente en utilizarlos para diversos bienes. El objetivo de este estudio es realizar un análisis exploratorio-descriptivo utilizando una revisión sistemática con herramientas de metaanálisis. El software Publish o Perish v8 fue utilizado, junto con los descriptores o palabras clave previamente seleccionados, para compilar, sistematizar, analizar y resumir la información pertinente para evaluar las posibles aplicaciones inmediatas del *Sargassum* spp., a nivel industrial.

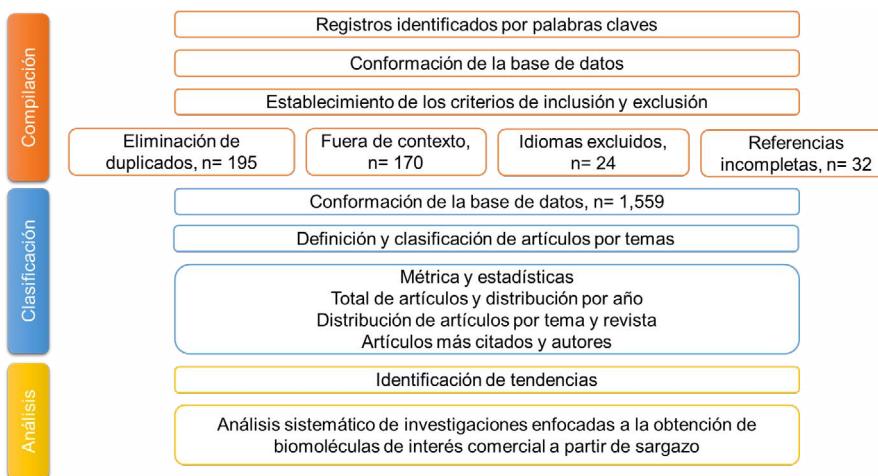
## Metodología

Se realizó una revisión sistemática-crítica con herramientas de metaanálisis para integrar objetivamente los resultados de los estudios empíricos sobre biomoléculas de alto valor del *Sargassum* spp., y sus aplicaciones. La base de datos fue creada a través del software Publish o Perish®, que agregó las publicaciones de 1971 a 2023. Se utilizó la base de datos de Google Académico y Crossref mediante el uso de palabras clave o descrip-

tores, previamente seleccionadas, con los siguientes términos de búsqueda en inglés: *Sargassum, extraction y optimization*.

La figura 1 muestra el diagrama metodológico. Se recogieron un total de 1980 artículos, de los cuales se eliminaron documentos duplicados ( $n=195$ ), artículos que no eran pertinentes para el tema ( $n = 170$ ), artículos escritos en otros idiomas que el inglés (mandarín, ruso y árabe) ( $N=24$ ) y artículos con referencias incompletas ( $N = 32$ ). En última instancia, se compiló una base de datos que consistió en 1559 artículos, que luego se utilizó para realizar un análisis bibliométrico, identificar los temas primarios y elegir artículos para destacar ciertos elementos.

**Figura 1.** Diagrama de la revisión sistemático-crítica utilizando herramientas de metaanálisis, desde la compilación hasta el análisis



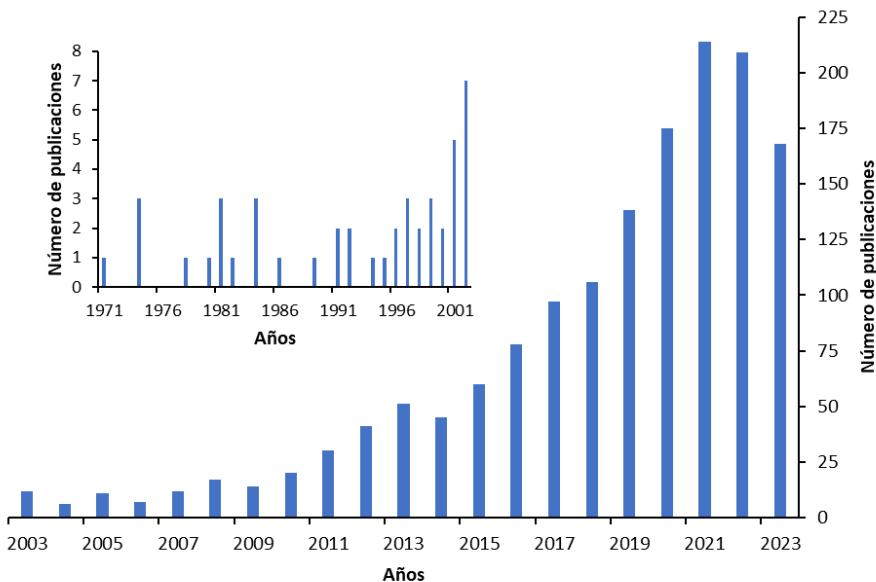
Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la base de datos se tomaron en cuenta los indicadores bibliométricos, tales como los datos numéricos y estadísticos, que incluyen el total de artículos y su distribución por años, así como la distribución de artículos por temas (temas principales y tendencias), autores y artículos más citados. Además, el análisis cualitativo centrado en el uso de *Sargassum spp.*, para la obtención optimizada de bioproductos de interés industrial, extracciones con resultados positivos y principales resultados.

## Resultados y discusión

### Investigaciones sobre la obtención de biomoléculas del *Sargassum spp.*

**Figura 2.** Distribución y frecuencia de artículos sobre extracción de biomoléculas del *Sargassum spp*



Fuente: Elaboración propia.

Desde 1971, se ha observado un aumento constante en las investigaciones. Las publicaciones en el primer período (1971-2002) no superaron las 10 publicaciones; en el segundo período (2003-2012), hubo 3.54 veces más publicaciones que en el primer período, sin superar las 50 publicaciones anuales, y en el último período (2013-2023) hubo 7.88 veces más publicaciones que en el segundo período. Es importante mencionar que el último período registró un total de 1,341 artículos, lo que equivale a 86 % de las publicaciones seleccionadas. Además, de los artículos totales, 29 han sido citados más de 200 veces, los cuales representan 1.86 % de la base de datos, siendo cinco los artículos con más de 400 citas. El artículo

de 2011 titulado “Important Determinants for Fucoidan Bioactivity: A Critical Review of Structure-Function Relations and Extraction Methods for Fucose-Containing Sulfated Polysaccharides from Brown Seaweed” (doi: 10.3390/md9102106) ha recibido 741 citas.

La revista *Algal Research* ha publicado el mayor número de artículos, es decir, 37 (tabla 1). Es una revista de alto impacto ( $Fi= 5.1$ ) de la editorial Elsevier que pertenece al primer cuartil en las temáticas de agronomía y ciencias de los cultivos. Además, las revistas con la mayor cantidad de artículos publicados incluyen *Algal Research*, *Marine Drugs*, *Carbohydrate Polymers*, *Molecules*, *Journal of Applied Phycology*, *Alimentos*, *China Journal of Chinese Matera Medica*, *Journal of Applied Phycology*, *International Journal of Biological Macromolecules*, *Industrial Crops and Products*, *Antioxidants* y *Food Chemistry*.

**Tabla 1.** Revistas con al menos 10 artículos publicados en el período analizado

Revistas	Cantidad de artículos	Editorial
Algal Research	37	Elsevier
Marine drugs	35	MDPI
Carbohydrate Polymers	26	Elsevier
Molecules	24	MDPI
Journal of Applied Phycology	22	Springer
Foods	16	MDPI
China Journal of Chinese Matera Medica	15	Elsevier
International journal of biological macromolecules	15	Elsevier
Industrial Crops and Products	13	Elsevier
Antioxidants	10	MDPI
Food Chemistry	10	Elsevier

## Extracción de biomoléculas del *Sargassum spp.*

Recientemente, el proceso de extracción de biomoléculas ha cambiado de métodos tradicionales a métodos innovadores. Estos métodos de extracción influyen significativamente en las características y las actividades biológicas de los biocompuestos, lo que conduce a una mejora general en el proceso de extracción, al estudiar factores como la temperatura, tipo de solventes, pretratamientos y otras variables específicas. La optimización

de las condiciones de extracción utilizando metodología tradicional (un factor a la vez) es un procedimiento difícil, laborioso y demorado. Por lo tanto, se han aplicado métodos empíricos basados en metodologías estadísticas para superar este problema y lograr un aumento de la producción y la calidad de las moléculas bioactivas deseadas. Una metodología de superficie de respuesta es un sofisticado enfoque estadístico y matemático utilizado en el campo de la ingeniería para optimizar y mejorar las condiciones mediante el análisis de las interacciones entre variables independientes y variables de respuesta. En esta metodología se utiliza una ecuación no lineal junto con otros diseños, es decir, el diseño compuesto central o Box-Behnken para ajustar las respuestas experimentales.

Mohammed *et al.* (2020) reportaron un proceso de aprovechamiento y extracción de *Sargassum spp.*, para a obtención de alginato de sodio y el uso de biomasa en un biopolímero. Este trabajo optimizó el proceso de extracción mediante la utilización de un diseño de superficie de respuesta Box-Behnken en combinación con la extracción multiobjetivo con el propósito de lograr un mayor rendimiento y pureza del producto. Las condiciones óptimas reportadas fueron de 12,63 mL de una solución de 3.75 % (p/v)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , calentada a 80 °C durante seis horas. Esto dio como resultado un rendimiento de 20 % en una sola etapa de extracción. Un proceso de dos etapas resultó en un rendimiento total de 28 %, que es uno de los mayores rendimientos documentados para el género *Sargassum*. Además, la temperatura y duración de extracción tuvo un impacto significativo en el rendimiento de la misma. La precipitación resultante dio un producto refinado de 24 %, con una pureza de 92 %. Un proceso de blanqueamiento no tuvo un impacto notable en la cantidad y pureza del alginato, pero aumentó su blancura y redujo su peso molecular y viscosidad. El análisis utilizó técnicas de resonancia magnética nuclear y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier confirmó que la sustancia extraída era alginato de sodio con una relación M/G de 0.45, lo que aumentó su capacidad para formar geles.

Nogueira *et al.* (2022) realizaron un estudio a través de un diseño Box-Behnken para examinar cómo el pH, la temperatura y la duración del tratamiento alcalino afectan la cantidad y la viscosidad-peso molecular promedio de alginato a partir de *Sargassum cymosum*. Las condiciones óptimas (temperatura: 80 °C, pH 10 y tiempo de reacción de 90 minutos) resultaron en un rendimiento de 45 % y un peso molecular de 207 KDa.

El pH ejerció la influencia más significativa. El aumento del pH llevó a un incremento simultáneo en la viscosidad dinámica, una pérdida en la capacidad antioxidante y la formación de alginatos con un color más claro.

En un estudio utilizaron un diseño compuesto central para optimizar el procedimiento de extracción de polisacáridos sulfatados crudos con fucosa de *Sargassum fusiforme*. Se emplearon cuatro variables, como el pH de la solución, la temperatura de extracción, la relación de líquido a biomasa y el tiempo de extracción. Las respuestas empleadas en este estudio incluyeron el rendimiento y contenido de fucosa, la tasa de proliferación de las células de médula y la proliferación inducida por lipopolisacáridos de esplenocitos. Estos parámetros se midieron utilizando indicadores químicos y bioanalíticos. Las condiciones óptimas de extracción generaron un valor de pH de 3.5, temperatura de extracción de 100 °C, la relación entre el líquido y biomasa de 15 mL/g y un período de extracción de 2.5 horas. El extracto tuvo el potencial de aumentar el crecimiento de las células de médula, particularmente la proliferación de linfocitos inducida por lipopolisacáridos *in vitro*. Esto indicó que el extracto tuvo un efecto inmunomodulador en los linfocitos B, lo que demostró un prometedor inmunostimulante en las industrias de alimentos funcionales y farmacéuticas (Fu et al., 2016).

En un trabajo (Liu et al., 2012) se utilizó un diseño Box-Benhnken para optimizar el proceso de preparación de extractos de *Sargassum spp.*, con enzimas. Los resultados indicaron que la concentración de la enzima fue 2.05 %, la relación de enzimas de 1.98, la temperatura de la hidrólisis de 55 °C, el tiempo de hidrólisis fue de 64 minutos, y el contenido de azúcares reductores final fue de 0.832 %, lo que resultó en un alto grado de hidrólisis, estabilidad y viabilidad.

Guo et al. (2012) emplearon la metodología de diseño compuesto central para optimizar extracción asistida por microondas de *Sargassum polycystum* C. Agardh en glicol de etileno utilizando  $H_2SO_4$  como catalizador. Los factores independientes de relación glicol de etileno-biomasa, temperatura y contenido de catalizador fueron estudiadas y las condiciones ideales fueron determinadas como una relación glicol de etileno-biomasa de 18.50:1 (%p/p), una temperatura de 170 °C, un período de reacción de 15 minutos, un contenido de catalizador de 9.6 % (catalizador/glicol de etileno, %p/p) y una potencia de microondas de 400 W. Estas condiciones resultaron en un rendimiento del extracto de 87 %. Los bio-oleos gene-

rados consistieron principalmente de éster de metilo de ácidos grasos y moléculas de alkanos con cadenas de carbono que variaron de C17 a C20.

Javed *et al.* (2022) utilizaron un diseño compuesto central de cuatro factores para optimizar el proceso de extracción asistida por microondas y alcanzar los niveles altos de actividad antioxidante en *Sargassum fusiforme* para DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) (inhibición: 28,01 %), ABTS (2,2'-azinobis [3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico]-sal de diamonio) (inhibición: 36,07 %). Estas condiciones óptimas de extracción se lograron con 47.67 % de etanol, 2.96 minutos de extracción, 139 °C y 600.00 watts. Además, se identificaron 79 metabolitos secundarios en la biomasa. Entre estos, cinco compuestos fenólicos (isopropil 3-(3,4-dihidroxifenil)-2-hidroxipropanoato, 3,4-dihydroxyphenylglycol, escopoleamina, ácido cafeico 4-sulfato, y glucosa), dos flavonoides (4',7-dihidróxiisoflavaona y naringenina), tres florotanninas (diphlorethohydroxycarmalol, dibenzodioxin-1,3,6,8-tetraol, y fucofloreto) y dos otros compuestos (dihidrossifenilalanina y 5-hidroxibenzofuran-2), los cuales mejoraron la capacidad antioxidante del extracto.

Talib *et al.* (2018) evaluaron la presión y la temperatura, en el proceso de extracción de *Sargassum spp.*, utilizando dióxido de carbono supercrítico. Se utilizó un diseño compuesto central en donde las condiciones ideales fue una presión de 4500 psi y una temperatura de 65 °C. El rendimiento máximo de extracción obtenido fue de 2.7 mg-extracto/g de biomasa utilizando condiciones óptimas. El rendimiento del extracto fue analizado posteriormente utilizando cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. El análisis reveló que *Sargassum spp.*, contenía esterolos, ácido pentadecanoico, 14-éster metil, 9-hexadecenoico, éster metilo y fitol, los cuales son compuestos que poseen propiedades bioactivas y exhiben efectos antimicrobianos.

Chester *et al.* (2017) reportaron la eficiencia de la extracción de polisacáridos y polifenoles de *Sargassum henslowianum* mediante ultrasónidos, además de la actividad biológica del extracto. Las condiciones de extracción se optimizaron utilizando un diseño Box-Behnken, y la actividad antioxidante de los extractos se evaluó, al igual que inhibición de la  $\alpha$ -glucosidasa y ensayos de citotoxicidad en células. Los parámetros más favorables para la extracción de polisacáridos fue un período ultrasónico de 40 minutos, una potencia ultrasónica de 330 watts, una relación sólido-líquido de 1:36 g/mL. El rendimiento de extracción obtenido en estas

condiciones fue de 12 %. Los parámetros óptimos para la extracción asistida por ultrasonido de los polifenoles totales fue un tratamiento ultrasónico de 102 minutos, con una potencia ultrasónica de 377 watts utilizando alcohol a una concentración de 62 %. El rendimiento de extracción en estas condiciones fue de 11 %. El ensayo antioxidante, la inhibición de la  $\alpha$ -glucosidasa y un ensayo de citotoxicidad en células indicaron que los polifenoles tuvieron una actividad más fuerte que los polisacáridos.

## Conclusiones

La presión actual para adquirir recursos naturales para la subsistencia, biomateriales, productos farmacéuticos, entre otros, ha llevado al deterioro del ambiente, incluyendo la contaminación, el aumento de enfermedades y al surgimiento de nuevos virus y pandemias. Aprovechar el valor de los recursos naturales, como las macroalgas, puede ofrecer una solución para la creación de nuevos bioproductos, como alimentos, productos farmacéuticos y biomateriales. La presencia cada vez mayor de *Sargassum* spp. en las zonas costeras ha representado un importante desafío medioambiental, que ha llevado a la desaparición de diversas especies marinas, así como a graves problemas en el turismo y la salud humana. En consecuencia, esto ha provocado considerables pérdidas económicas mundiales. El proceso de extracción de biomoléculas influye significativamente en los rendimientos de los compuestos bioactivos. En conclusión, los productos derivados de *Sargassum* spp., presentan variaciones entre diferentes lotes debido a estas características. Se necesitan más investigaciones para confirmar la estabilidad y seguridad de los extractos y compuestos de *Sargassum* spp., a pesar de la existencia de varios artículos que muestran sus bioactividades y diversas aplicaciones. En los próximos años, los recursos oceánicos tienen el potencial de ser utilizados como recursos naturales sostenibles, renovables y abundantes que se pueden aprovechar para la alimentación, medicamentos y los suministros necesarios de personas.

## Referencias

Chester, K., Zahiruddin, S., Ahmad, A., Khan, W., Paliwal, S. y Ahmad, S. (2017). Bioautography-based Identification of Antioxidant Metabolites of *Sola-*

- num nigrum* L. and Exploration. Its Hepatoprotective Potential Against D-Galactosamine-Induced Hepatic Fibrosis in Rats. *Pharmacognosy Magazine*, 13(62): 179-188. [https://doi.org/10.4103/pm.pm\\_359\\_18](https://doi.org/10.4103/pm.pm_359_18)
- Ciko, A. M., Jokić, S., Šubarić, D. y Jerković, I. (2018). Overview on the application of modern methods for the extraction of bioactive compounds from marine macroalgae. *Marine Drugs*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/MD16100348>
- Cui, Y., Zhu, L., Li, Y., Jiang, S., Sun, Q., Xie, E., Chen, H., Zhao, Z., Qiao, W., Xu, J. y Dong, C. (2021). Structure of a laminarin-type  $\beta$ -(1→3)-glucan from brown algae *Sargassum henslowianum* and its potential on regulating gut microbiota. *Carbohydrate Polymers*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117389>
- Fu, Z., Li, H., Liu, H., Hu, S., Li, Y., Wang, M. y Guan, H. (2016). Bioassay-guided extraction of crude fucose-containing sulphated polysaccharides from *Sargassum fusiforme* with response surface methodology. *Journal of Ocean University of China*, 15(3): 533-540. <https://doi.org/10.1007/s11802-016-2897-9>
- Guo, J., Zhuang, Y., Chen, L., Liu, J., Li, D. y Ye, N. (2012). Process optimization for microwave-assisted direct liquefaction of *Sargassum polycystum* C. Agardh using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 120: 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.013>
- Gray, L. A., Bisonó León, A. G., Rojas, F. E., Veroneau, S. S. y Slocum, A. H. (2021). Caribbean-Wide, Negative Emissions Solution to *Sargassum* spp. Low-Cost Collection Device and Sustainable Disposal Method. *Phycology*, 1(1): 49-75. <https://doi.org/10.3390/phycology1010004>
- Hanjabam, M. D., Kumar, A., Tejpal, C. S., Krishnamoorthy, E., Kishore, P. y Ashok Kumar, K. (2019). Isolation of crude fucoidan from *Sargassum wightii* using conventional and ultra-sonication extraction methods. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100200>
- Javed, A., Naznin, M., Alam, M. B., Fanar, A., Song, B. R., Kim, S. y Lee, S. H. (2022). Metabolite Profiling of Microwave-Assisted *Sargassum fusiforme* Extracts with Improved Antioxidant Activity Using Hybrid Response Surface Methodology and Artificial Neural Networking-Genetic Algorithm. *Antioxidants*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/antiox1112246>
- Jesumani, V., Du, H., Pei, P., Zheng, C., Cheong, K. L. y Huang, N. (2019). Unravelling property of polysaccharides from *Sargassum* sp. as an anti-wrinkle

- and skin whitening property. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140: 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.027>
- Liu, S., Zhang, S. y Jiao, W. (2012). Optimization of sargassum extracts preparation with complex enzyme by response surface methodology. *Advanced Materials Research*, 550-553: 1653-1658. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.550-553.1653>
- Mohammed, A., Rivers, A., Stuckey, D. C. y Ward, K. (2020). Alginate extraction from *Sargassum* seaweed in the Caribbean region: Optimization using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116419>
- Nesic, A., De Bonis, M. V., Dal Poggetto, G., Ruocco, G. y Santagata, G. (2023). Microwave Assisted Extraction of Raw Alginate as a Sustainable and Cost-Effective Method to Treat Beach-Accumulated Sargassum Algae. *Polymers*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/polym15142979>
- Nogueira, M. T., Chica, L. R., Yamashita, C., Nunes, N. S. S., Moraes, I. C. F., Branco, C. C. Z. y Branco, I. G. (2022). Optimal conditions for alkaline treatment of alginate extraction from the brown seaweed *Sargassum cymosum* C. Agardh by response surface methodology. *Applied Food Research*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100141>
- Silva, A., Soares, C., Carpêna, M., Oliveira, P. G., Echave, J., Chamorro, F., Donn, P., Mansour, S. S., Barroso, M. F. y Prieto, M. A. (2023). Assessment of Nutritional Profile of *Sargassum muticum* Alga from the Spanish Coastline. *Biology and Life Sciences Forum*, 26(1). <https://doi.org/10.3390/foods2023-15028>
- Talib, N., Ahmad, M. R., Kadir, M. I. A., Ismail, K. y Rahim, A. F. C. (2018). Optimization of supercritical CO<sub>2</sub> natural dye extraction from brown seaweed (*Sargassum Sp.*) via response surface methodology. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(3): 105-108. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.11.15939>
- Zhang, R., Zhang, X., Tang, Y. y Mao, J. (2020). Composition, isolation, purification and biological activities of *Sargassum fusiforme* polysaccharides: A review. *Carbohydrate Polymers*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115381>

# Efecto antioxidante de glicoconjungados de extracto de vísceras de pollo y glucosa

Juan Bautista FLORES QUEZADA\*  
Alma Guadalupe VILLA LERMA\*\*  
Roberto RODRÍGUEZ RAMÍREZ\*\*\*  
Rigoberto PLASCENCIA JATOMEA\*\*\*\*  
Maritza ARELLANO GIL\*\*\*\*\*

## Resumen

Es sabido que los antioxidantes disminuyen las consecuencias adversas de los radicales libres en el organismo humano. Las vísceras, residuos significativos en la industria avícola, contienen proteínas con potencial para generar compuestos antioxidantes por la reacción con monosacáridos mediante la reacción de Maillard. El objetivo del estudio fue analizar la capacidad antioxidante del extracto proteico de vísceras de pollo sometido a glicación con sistemas proteínas-glucosa. Se realizó hidrólisis autolítica de las vísceras y se cuantificó la proteína soluble. Se generaron glicoconjungados combinando el extracto con glucosa en proporciones (1:1, 1:2 y 1:3 p/p). Estos glicoconjungados se caracterizaron con FTIR, y su capacidad antioxidante se evaluó mediante ensayos DPPH, ABTS y FRAP. En la caracterización por FTIR se notaron cambios en la banda de la Amida I a 1637 cm<sup>-1</sup>, posiblemente ligados a la formación de productos de la reacción de Maillard. Todos mostraron capacidad antioxidante; los tratamientos 1:3 tuvieron los valores más altos de TEAC con 1.33 mmol/mL, 17.91 mmol/mL y 0.51 mmol/mL en DPPH, ABTS y FRAP, respectivamente. Una excepción fue el ensayo DPPH, donde el extracto proteico calentado sin glucosa presentó TEAC de 2.49 mmol/mL. Los glicoconjungados obtenidos tienen potencial antioxidante, lo que protege contra daño oxidativo y enfermedades crónicas.

\* Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

\*\* Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, ITSON.

\*\*\* Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, ITSON.

\*\*\*\* Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, ITSON.

\*\*\*\*\* Departamento de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, ITSON.

**Palabras clave:** glicación, potencial antioxidante, vísceras de pollo.

## Introducción

Es bien conocido que los antioxidantes desempeñan un papel crucial en la mitigación de las reacciones de oxidación en el organismo, las cuales generan radicales libres peligrosos. Su contribución es fundamental para prevenir enfermedades crónicas degenerativas, entre las que destacan las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, la obesidad y el cáncer. Estas afecciones representan desafíos importantes para el sistema de salud y la sociedad en general (Jamanca-Gonzales y Alfaro-Cruz, 2017).

Para finales de 2023, se espera que la producción de pollo en México crezca 3 % en comparación con 2022, con lo cual se alcanzaría una producción de 3.76 millones de toneladas (Unión Nacional de Avicultores, 2023). Las vísceras representan aproximadamente 30 % de los residuos generados en la industria avícola (Anuar *et al.*, 2017). Las vísceras de pollo, que incluyen hígado, corazón y molleja, son una fuente importante de proteínas, con contenido de 11 %, 12 % y 15 % respectivamente. Estas proteínas, en presencia de azúcares reductores y vía reacción de Maillard (RM), nos permitirían obtener compuestos antioxidantes beneficiosos.

La reacción de Maillard tiene lugar durante la elaboración y almacenamiento de alimentos en el momento que el grupo carbonilo de una aldosa o cetosa interactúa con el grupo amino de aminoácidos, péptidos o proteínas (Hiroshi *et al.*, 2020). Esta interacción resulta en la formación de diversos productos iniciales, intermedios y finales, que a su vez, son responsables de características organolépticas deseadas en los alimentos. Además, estos productos contribuyen a propiedades biológicas beneficiosas para el organismo y propiedades tecnofuncionales necesarias para el diseño y desarrollo de alimentos.

Se han realizado estudios sobre la actividad antioxidante de la reacción de Maillard, con aplicaciones en la calidad y seguridad alimentaria. Esta fomenta la salud y facilita el desarrollo de productos más estables y nutritivos (Feng *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2019; Nooshkam *et al.*, 2019). Es fundamental controlar la RM debido a que sus productos son responsables de sabores, aromas, colores y la formación de compuestos dañinos y bioactivos (Mottram *et al.*, 2002; Mondaca-Navarro *et al.*, 2019). Determinar la actividad antioxidante es esencial para mejorar la RM y determinar los

factores que influyen en los productos generados, siendo relevantes para el desarrollo de nuevos productos. En nuestra investigación, hemos examinado actividades biológicas en sistemas simples de aminoácidos y azúcares, centrándonos específicamente en la evaluación de la capacidad antioxidante y quelante de los productos de la reacción de Maillard (PRM) en condiciones similares a las del procesamiento de alimentos. Utilizamos aminoácidos como cisteína, glicina, isoleucina y lisina, combinados con diferentes azúcares como fructosa o glucosa (Mondaca-Navarro *et al.*, 2019).

En este estudio hemos utilizado un modelo de proteína de vísceras de pollo y glucosa. Optamos por utilizar el hidrolizado de vísceras de pollo debido al desafío actual que implica aprovechar los desechos avícolas. A pesar de su potencial, las vísceras suelen ser menospreciadas y rechazadas debido a factores como su sabor, textura, preferencias culturales y preocupaciones sobre la higiene alimentaria. Esta actitud negativa conlleva a su desecho indiscriminado y genera un impacto ambiental considerable. Sin embargo, los hidrolizados de vísceras de pollo ofrecen una alternativa más eficiente, ya que a través de la RM podemos obtener aditivos alimentarios con propiedades biológicas y valor agregado. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial antioxidante del extracto proteico de vísceras de pollo glicado vía reacción de Maillard mediante sistemas proteína-glucosa.

## Metodología

### Insumos y materias primas

El proyecto fue realizado en el Instituto Tecnológico de Sonora, en el Laboratorio de Bioingeniería y Biotecnología Enzimática. Se usaron reactivos grado alto, entre los cuales D-(+)-Glucosa, 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), ácido 2,2'-acino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS), 2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina (TPTZ), Cloruro de hierro (III) ( $FeCl_3$ ) y TROLOX (ácido ( $\pm$ ) -6- hidroxi -2,5,7,8-tetrametilcromano-2- carboxílico) se obtuvieron de Sigma-Aldrich. Las vísceras de pollo, que consistían en hígado, corazón y molleja, fueron adquiridas de un mercado local (Ciudad Obregón, Sonora, México) y congeladas a  $-20^{\circ}C$  hasta su posterior uso.

## Hidrolizado de proteínas por autolisis

Las vísceras trituradas se mezclaron con agua destilada (40 %; pH 2.8) y se agitaron durante 3 horas a 150 rpm y 55 °C. El homogeneizado resultante fue centrifugado a 20000 g por 15 min; después, se recobró el sobrenadante y se procedió a la neutralización mediante NaOH 4 M, siguiendo el protocolo descrito por Jamdar y Harikumar en 2008.

## Determinación de proteína soluble

Se mezclaron 20 µL del hidrolizado proteico de vísceras de pollo (HPVP) con 280 µL del reactivo Bradford; después, la mezcla se transfirió a una microplaca de 96 pozos (NUNC MicroWell) y se registró su absorbancia por espectrofotometría (Thermo Scientific Multiskan Go) a 595 nm de longitud de onda. El estándar fue graficado utilizando concentraciones de 1, 0.8, 0.4, 0.2 y 0.1 mg/mL de albúmina de suero bovino (Bradford 1976).

## Preparación de glicoconjugados por reacción de Maillard

El HPVP se mezcló con glucosa en proporciones 1:1, 1:2 y 1:3 (m/m) (tabla 1). La mezcla se calentó en un horno de precisión a 90 °C durante 3 horas. Posteriormente, la reacción se mitigó sumergiendo la mezcla en agua a aproximadamente 0 °C (Rodríguez-Ramírez, *et al.*, 2018).

**Tabla 1.** Descripción de las muestras

Codificación	Definición
HPVP-0	Hidrolizado proteico crudo
HPVP-12	Hidrolizado proteico calentado
HPVP-G (1:1)	Hidrolizado proteico y glucosa proporción 1:1
HPVP-G (1:2)	Hidrolizado proteico y glucosa proporción 1:2
HPVP-G (1:3)	Hidrolizado proteico y glucosa proporción 1:3

Fuente: Elaboración propia.

## **Espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

Se empleó espectrofotometría de infrarrojo de transformada de Fourier (Thermo Scientific Nicolet iS50) configurado con ATR. Los espectros se adquirieron en el rango de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$  y 64 escaneos. Se registró un espectro de fondo antes de cada medición de muestra.

## **Análisis de actividad antioxidante**

### *Ensayo DPPH*

Este ensayo se basa en la capacidad del DPPH de aceptar un átomo de hidrógeno de un antioxidante lo que deriva en su reducción. Esto conlleva a un cambio de color de su solución de morado a amarillo. En este contexto, el potencial reductor de los antioxidantes puede observarse en presencia de DPPH, registrando la disminución de su absorbancia. Para el ensayo, se combinaron 200  $\mu\text{L}$  de muestra (diluida en agua destilada 10 veces) con 800  $\mu\text{L}$  de una solución (en metanol) de DPPH 0.2 mM. Posteriormente, los ensayos se incubaron a temperatura ambiental y oscuridad durante 30 minutos. La mezcla se transfirió a una microplaca de 96 pozos (NUNC MicroWell) y se registró su absorbancia (520 nm) en un espectrofotómetro Thermo Scientific Multiskan Go. El testigo se elaboró igual, pero llevó agua en lugar de la porción representativa. Los datos de reducción se reportaron en TROLOX equivalente. El estándar fue graficado utilizando concentraciones de 25, 75, 125, 175 y 225  $\mu\text{mol}/\text{mL}$  de TROLOX (Mondaca-Navarro *et al.*, 2017).

### *Ensayo ABTS*

Este ensayo se fundamenta en la interacción entre un antioxidante y el radical catión ABTS $\bullet+$ . En presencia del radical ABTS $\bullet+$ , un antioxidante puede transferir electrones a este último, neutralizándolo y actuando como un agente reductor. Como resultado se puede registrar la decoloración del tono verde azulado del radical ABTS $\bullet+$  a su forma reducida cuando está en presencia de antioxidantes. La solución del radical catiónico ABTS $\bullet+$

se obtuvo incorporando 0.0384 g de ABTS a una solución de persulfato de potasio (2.45 mM) y aforando hasta alcanzar un volumen final de 10 mL. Posteriormente, se procedió a ajustar la absorbancia de la solución hasta alcanzar el valor de  $0.70 \pm 0.02$  a 734 nm. Para llevar a cabo el ensayo, se combinaron 10  $\mu$ L de muestra (diluida en agua destilada 100 veces) con 100  $\mu$ L del reactivo ABTS+ y se incubaron en condiciones de oscuridad durante 5 minutos. La mezcla se transfirió a una microplaca de 96 pozos (NUNC MicroWell) y se registró su absorbancia en un espectrofotómetro Thermo Scientific Multiskan Go a 734 nm. La muestra de referencia fue procesada igual, pero llevó agua en lugar del modelo original. La capacidad antioxidante se reportó equivalente de TROLOX. El estándar fue graficado utilizando concentraciones de 25, 75, 125, 175 y 225  $\mu$ mol/mL de TROLOX (Mondaca-Navarro *et al.*, 2017).

#### *Ensayo FRAP*

El poder antioxidante reductor de hierro (FRAP por su nomenclatura en inglés) es un ensayo colorimétrico que se basa en la reducción del ion férrico ( $Fe^{3+}$ ) al estado ferroso ( $Fe^{2+}$ ), generando un complejo coloreado con el compuesto de 2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina (TPTZ). Si se contrasta con ABTS y DPPH, ambos requieren un radical para su neutralización y reducción respectivamente. Cada ensayo aborda la capacidad antioxidante desde diferentes perspectivas, ofreciendo versatilidad para evaluar las muestras.

Para utilizar la técnica FRAP se preparó una solución de trabajo mezclando 25 mL de una solución acetato amortiguadora (0.3 M y pH de 3.6) con 2.5 mL de TPTZ (0.01 M que fue disuelta en HCl 0.04 M) y 2.5 mL de solución  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  (0.02 M). Para llevar a cabo el ensayo se mezclaron 25  $\mu$ L de muestra con 1 mL de una solución de trabajo. La mezcla se transfirió a una microplaca de 96 pozos (NUNC MicroWell) y se registró su absorbancia en un espectrofotómetro Thermo Scientific Multiskan Go a una longitud de onda de 593 nm. El testigo de referencia fue elaborado bajo las mismas condiciones, pero la muestra fue cambiada por agua en su lugar. La actividad antioxidante fue reportada como TROLOX equivalente. El estándar fue graficado utilizando concentraciones de 100, 200, 300, 400, y 500  $\mu$ mol/mL de TROLOX (Cecchini y Fazio, 2020).

## Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis de varianza de una sola vía para comparar las medias de % inhibición de la muestra analizada. Las diferencias significativas fueron determinadas con un P-valor  $<0.05$  con la prueba LSD Fisher mediante el software estadístico Statgraphics Plus 5.1. Los resultados se reportaron como promedios y se incluyeron las desviaciones estándar para indicar la variabilidad de los datos. Además, este proceso se realizó por triplicado en muestras diferentes.

## Resultados y discusión

### Contenido de proteína soluble

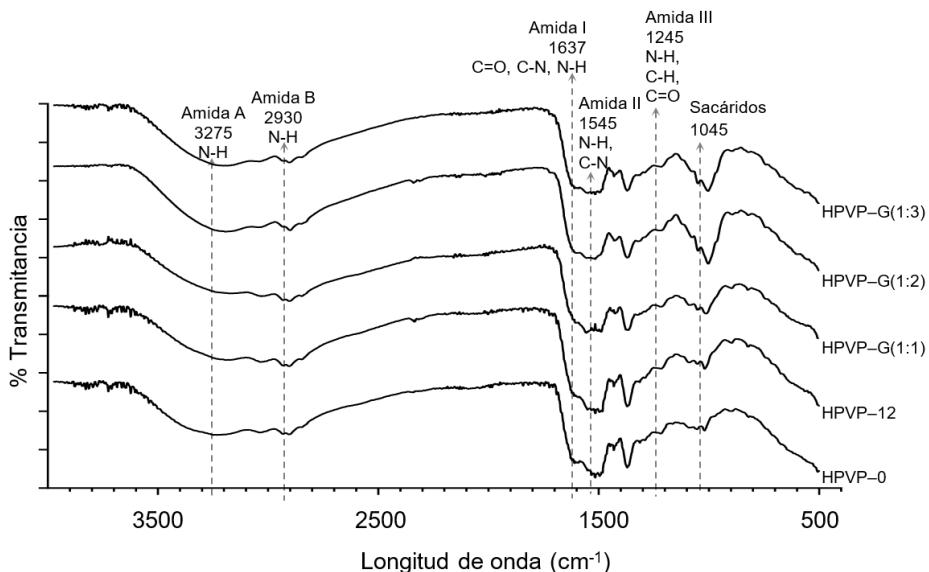
Se encontró que el contenido de proteína soluble del hidrolizado de vísceras de pollo fue 2.33 mg/mL.

### Espectros FTIR

La espectroscopia FTIR es un método utilizado frecuentemente en la caracterización de proteínas y carbohidratos. En la figura 1 se presentan los picos de transmitancia característicos de los hidrolizados y glicoconjungados obtenidos. Estos mostraron bandas características en las longitudes de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ) de amida A (3275), amida B (2930), amida I (1637), amida II (1545), amida III (1245) y sacáridos (1045). La huella química del FTIR también se puede emplear para analizar la interacción entre el extracto proteico y la glucosa. En el análisis de la banda de la amida I a  $1637 \text{ cm}^{-1}$  es crucial para comprender los procesos de glicación y la formación de productos de la reacción de Maillard en sistemas biológicos. En el contexto de la reacción de Maillard, que implica la interacción entre azúcares reductores y grupos amino de proteínas, los cambios en la intensidad de esta banda son indicativos de la formación de enlaces covalentes entre el grupo amino de las proteínas y el grupo carbonilo de los azúcares reductores (Han *et al.*, 2017). Estos cambios reflejan la glicación y la transformación de las moléculas HPVP y glucosa, un proceso que conduce a la formación de nuevos productos glicoconjungados. Por lo tanto, la observación de cambios en la intensidad de la banda de la amida I proporciona

evidencia directa de la progresión de la reacción de Maillard y la formación de productos avanzados de glicación en los sistemas HPVP-G estudiados.

**Figura 1.** Cambio de los espectros infrarrojos de la transformada de Fourier de mezclas de hidrolizados de vísceras de pollo y glucosa glicoconjungadas



Fuente: Elaboración propia.

## Actividad antioxidante

### *Inhibición del radical DPPH*

El ensayo de reducción del radical libre DPPH se utiliza ampliamente para determinar la actividad antioxidante de glicoconjungados obtenidos mediante la reacción de Maillard (Mondaca-Navarro *et al.*, 2019). En la tabla 2 se aprecian los efectos del hidrolizado de vísceras de pollo glicoconjungado y crudo sobre el DPPH. A medida que la concentración de glucosa aumentó, la capacidad antioxidante también se incrementó significativamente, alcanzando valores de 0.84, 1.17 y 1.33 mmol/mL para HPVP-G (1:1), HPVP-G (1:2) y HPVP-G (1:3), respectivamente. Sin embargo, el hidrolizado

calentado en ausencia de glucosa, HPVP-12, presentó la mayor capacidad reductora. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Xiong *et al.*, 2020, quienes reportaron los efectos de los hidrolizados de proteína de hígado de pollo con xilosa bajo condiciones de la reacción de Maillard. Se encontró que la captación de radicales libres DPPH de los productos de la reacción de Maillard obtenidos de proteína, hidrolizado proteico e hidrolizado sonicado fue significativamente mayor ( $P < 0.01$ ) que la de los sustratos de proteína o hidrolizado sin glicar. Estos resultados sugieren que los productos de la reacción de Maillard poseen actividad antioxidante, independientemente de las condiciones específicas de la reacción y los sustratos utilizados.

#### *Inhibición del radical ABTS*

La actividad reductora del radical ABTS<sup>+</sup> se reflejó en valores de 16.91 y 17.16 mmol/mL en los hidrolizados de vísceras de pollo sin glucosa, HPVP-0 y HPVP-12, respectivamente. En cuanto a los glicoconjungados, los niveles de actividad antioxidante equivalente de TROLOX oscilaron entre 16.2 y 17.91 mmol/mL, con lo cual se evidenció el mayor aumento en el tratamiento HPVP-G (1:3). Se observó que el incremento en la concentración de glucosa conllevó a un aumento en la propiedad antioxidante (tabla 2). Considerando estos hallazgos, se pueden discutir los resultados del estudio realizado por Jamdar *et al.* (2012), que examinó las propiedades antioxidantes de fracciones peptídicas de hidrolizado de proteína de vísceras de aves de corral. Aunque las fracciones >10 kDa y 3-10 kDa no mostraron diferencias significativas en la actividad reductora, la fracción <3 kDa exhibió una actividad eliminadora significativamente mayor de 794.6 mMTEAC/mg. Estos resultados sugieren que el peso molecular de los péptidos puede influir en su capacidad antioxidante, lo que respalda la importancia de considerar la composición y la estructura de los productos obtenidos de la reacción de Maillard en la evaluación de su actividad antioxidante.

#### *Poder antioxidante reductor férrico*

La actividad antioxidante de todos los sistemas de hidrolizado proteico de vísceras de pollo se evaluó indirectamente mediante su potencial de transformar el Fe<sup>+3</sup> a Fe<sup>+2</sup> por reducción. La tabla 2 presenta las variaciones

en el poder reductor de los hidrolizados y glicoconjugados obtenidos, en relación con su concentración de glucosa. Se observó un incremento en el FRAP a medida que la concentración de glucosa aumentaba. Entre los tratamientos, se destacó que HPVP-G (1:3) exhibió un poder reductivo, equivalente de TROLOX, significativamente mayor con 0.51 mmol/mL.

Como se cita, diversos autores (Xiong *et al.*, 2020; Jamdar *et al.*, 2012) han investigado proteínas como origen de péptidos con propiedades antioxidantes que podrían contrarrestar los efectos de la constante producción de especies reactivas de oxígeno en los sistemas biológicos. Estos resultados complementan los hallazgos de nuestra investigación, ya que también evidencian el potencial antioxidante de los extractos de vísceras de aves de corral. Además, resaltan un incremento en la actividad reductora, específicamente en proteínas glicoconjugadas, en contraste con los extractos sin glicar. Esto refuerza la validez y la relevancia de los efectos antioxidantes asociados a los extractos de las vísceras de pollo modificadas vía reacción de Maillard.

**Tabla 2.** Actividad antioxidante de los glicoconjugados de HPVP-G

Tratamiento	FRAP	ABTS	DPPH
HPVP-0	0.25±0.04 <sup>a</sup>	16.91±0.65 <sup>ab</sup>	0.46±0.07 <sup>a</sup>
HPVP-12	0.19±0.00 <sup>b</sup>	17.16±1.02 <sup>ab</sup>	2.49±0.00 <sup>b</sup>
HPVP-G (1:1)	0.32±0.01 <sup>c</sup>	16.2±0.78 <sup>a</sup>	0.84±0.07 <sup>c</sup>
HPVP-G (1:2)	0.42±0.02 <sup>d</sup>	16.31±0.7 <sup>a</sup>	1.17±0.06 <sup>d</sup>
HPVP-G (1:3)	0.51±0.03 <sup>e</sup>	17.91±3.68 <sup>b</sup>	1.33±0.06 <sup>e</sup>

Columna con diferente letra presenta diferencia significativa. Resultados en equivalente de TROLOX (mmol/mL).  
Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

La glicación del HPVP-G obtenida mediante pardamiento no enzimático proveyó compuestos con potencial antioxidante, lo que permite sugerir su posible uso como ingrediente para el desarrollo de alimentos con funcionalidad bioactiva.

## Referencias

- Anuar, M. A. K., Narashid, N. H. H., Salleh, M. M. y Yahya, A. (2017). Conversion of chicken viscera into protein hydrolysate for palatant production. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(4), 606-611. <http://dx.doi.org/10.11113/mjfas.v0n0.615>
- Cecchini, S. y Fazio, F. (2020). Assessment of total antioxidant capacity in serum of healthy and stressed hens. *Animals*, 10(11). <https://doi.org/10.3390-2Fani10112019>
- Chen, K., Zhao, J., Shi, X., Abdul, Q. y Jiang, Z. (2019). Characterization and antioxidant activity of products derived from xylose–bovine casein hydrolysate maillard reaction: Impact of reaction time. *Foods*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/foods8070242>
- Feng, J., Berton-Carabin, C. C., Fogliano, V. y Schroën, K. (2022). Maillard reaction products as functional components in oil-in-water emulsions: A review highlighting interfacial and antioxidant properties. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.008>
- Han, M. M., Yi, Y., Wang, H. X. y Huang, F. (2017). Investigation of the Maillard reaction between polysaccharides and proteins from longan pulp and the improvement in activities. *Molecules*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/molecules22060938>
- Hiroshi, H., Guemra, S., Bosso, A., de Pádua, É. y Rodrigo Ito, L. (2020). Reducción de proteínas y glucosa por reacción de Maillard en leche con lactosa hidrolisada. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(1), 14-21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000100014>
- Jamanca-Gonzalez, N. C. y Alfaro-Cruz, S.C. (2017). *Antioxidantes en los alimentos*. Universidad Nacional de Barranca, Editorial. <https://hdl.handle.net/20.500.12935/17>
- Jamdar, S. N. y Harikumar, P. (2008). A rapid autolytic method for the preparation of protein hydrolysate from poultry viscera. *Bioresource Technology*, 99(15), 6934-6940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.023>
- Jamdar, S. N., Rajalakshmi, V. y Sharma, A. (2012). Antioxidant and ace inhibitory properties of poultry viscera protein hydrolysate and its peptide fractions. *Journal of Food Biochemistry*, 36(4), 494-501. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2011.00562.x>
- Mondaca-Navarro, B. A., Ávila-Villa, L. A., González-Córdova, A. F., López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., Campas-Baypoli, O. N. y Rodríguez-

- Ramírez, R. (2017). Antioxidant and chelating capacity of Maillard reaction products in amino acid-sugar model systems: applications for food processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(11), 3522-3529. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8206>
- Mondaca-Navarro, B. A., Ramírez, R. R., Lerma, A. G. V., Villa, L. A. Á. y Pardo, G. D. (2019). Glycation of Animal Proteins Via Maillard Reaction and Their Bioactivity. En R. A. Marc, A. Valero Diaz y G. D. Posada Izquierdo (eds.), *Food Processing*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.9037>
- Mottram, D. S., Wedzicha, B. L. y Dodson, A. T. (2002). Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 419(6906), 448-449. <https://doi.org/10.1038/419448a>
- Nooshkam, M., Varidi, M. y Bashash, M. (2019). The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems. *Food Chemistry*, 275, 644-660. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.083>
- Rodríguez-Ramírez, R., Mondaca-Navarro, B.A., Torres-Arreola, W., Ávila-Villa, L.A., Chalas-Vega, Z., Avilés-Velázquez, N. S. y Mondaca-Fernández, I. *Determinación de citotoxicidad y actividad antimicrobiana sobre Staphylococcus aureus de glicoproteínas de origen animal*. XX Congreso Internacional Inocuidad de Alimentos. Nuevo Vallarta, Nayarit, 1, 2 y 3 de noviembre de 2018.
- Unión Nacional de Avicultores. (2023). Expectativas 2023. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://una.org.mx/#:~:text=Expectativas%202023,respecto%20a%20la%20de%202022>
- Xiong, G. Y., Chen, X., Zhang, X. X., Miao, Y., Zou, Y., Wang, D. Y. y Xu, W. M. (2020). Process optimization and the relationship between the reaction degree and the antioxidant activity of Maillard reaction products of chicken liver protein hydrolysates. *Poultry science*, 99(7), 3733-3741. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.03.027>

# Propuesta de plan de mantenimiento en la planta Gestamp II

Diego Iván MÉNDEZ PÉREZ•

Bertha María Rocío HERNÁNDEZ SUÁREZ••

Rocío de los Ángeles GARCÍA HERNÁNDEZ•••

Epifanio ZÁRATE MORALES••••

Bertha Irina MONTES GALINDO•••••

## Resumen

En este trabajo se desarrolla el caso de la planta Gestamp II en Puebla, empresa de origen español dedicada al diseño, desarrollo y fabricación de componentes metálicos para automóviles, la cual presenta baja calidad en su fabricación de puertas debido a deficiencias en su mantenimiento, por lo cual requiere implementar estrategias que permitan mantener los equipos en óptimas condiciones. Con el mantenimiento productivo total (TPM) se desarrollaron tareas que aseguran confiabilidad y calidad en los productos, además de disminuir las fallas y el tiempo de paro en la producción. Al centrarse en los pilares de mantenimiento autónomo y capacitación se asegura que el personal operativo obtenga mejores herramientas que los ayude a desempeñarse en su área de trabajo con la ayuda de los procedimientos y programas diseñados.

**Palabras clave:** mantenimiento, TPM, ingeniería, calidad.

---

• Maestría en Ingeniería de la Calidad, Universidad Veracruzana (uv). zs21000459@estudiantes.uv.mx

•• Doctorado en Educación, Facultad de Ciencias Químicas región Xalapa, uv, Xalapa. berthernandez@uv.mx.

••• Doctorado en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, uv Xalapa. rocigarcia@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0003-4333-2657>

•••• Doctorado en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, uv Xalapa epmorales@uv.mx, <https://orcid.org/0000-0001-7148-9235>.

••••• Maestría en Ingeniería de la Calidad, Universidad Veracruzana, uv. bmontes@uv.mx.

## Introducción

Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevas tecnologías para la industria, buscando la mejora continua de los procesos. Es el caso del mantenimiento, el cual es indispensable para garantizar instalaciones eficientes, eficaces y seguras (Palencia, 2011). El desarrollo de estrategias de mantenimiento permitirá disminuir los paros no planeados derivados de las fallas ocasionadas y consecuentemente asegurar la entrega de producción conforme a lo establecido con el cliente. La finalidad del trabajo es proponer un plan de mantenimiento sistemático una vez que se identifiquen las causas de falla del equipo a través de un análisis de los datos históricos del equipo, entrevistas a personal técnico, exámenes y la aplicación de herramientas estadísticas aplicadas a la ingeniería de la calidad.

## Metodología

Para desarrollar la propuesta de un plan de mantenimiento sistemático basado en la metodología del mantenimiento productivo total se detallan las herramientas utilizadas en cada fase (figura 1).

**Figura 1.** Fases metodológicas



Fuente: Elaboración propia.

## **Fases de la metodología**

### *Identificación de las fallas*

Con el propósito de identificar el proceso productivo que la empresa ejecuta actualmente y las fallas inherentes, se elaboró un diagrama de proceso con la intención de identificar en qué parte del proceso ocurren las fallas. Posteriormente, se aplicó un cuestionario a los técnicos de mantenimiento y operadores de producción en su área de trabajo para conocer aspectos del equipo, como fallas recurrentes, tiempo de operación y frecuencia de mantenimientos. Después, se solicitaron las bitácoras de mantenimiento con la finalidad de identificar los tipos de fallas de la máquina, la cantidad y los tiempos perdidos en la línea de producción registrados. La información recabada es necesaria para realizar el análisis de causas de cada falla.

### *Análisis de las fallas*

Con la finalidad de involucrar a todas las áreas del proceso que intervienen en las fallas, se realizó una lluvia de ideas para establecer las causas que originan las fallas del equipo, clasificándolas dentro de diagramas de Ishikawa. Posteriormente, se construyó una tabla de análisis de impactos con la finalidad de medir las consecuencias de las fallas. En esta tabla se establecen como parámetros la frecuencia, causas, consecuencias, el impacto al personal, a las instalaciones y a la producción. Con la información obtenida se pudo construir una matriz de criticidad donde se indican con color rojo las fallas más críticas, con amarillo las importantes y con verde las prescindibles. Con el análisis de las causas, se elaboró el análisis de modo y efecto de falla (AMEF) para identificar los modos de fallas funcionales, sus efectos en el proceso y las acciones recomendadas para revertirlos.

### *Condiciones de operación actuales*

Para determinar las condiciones de operación actuales y evaluarlas se aplicó la metodología de las 8D's, donde se formó un equipo de trabajo conformado por supervisores de producción, mantenimiento, seguridad e higiene, así como personal operativo, siendo los encargados de propor-

cionar datos técnicos del equipo, bitácoras de producción, manuales de fabricantes, planos, conformación de equipos de operación, así como las tareas de mantenimiento actuales, elementos importantes de la estructura del plan de mantenimiento actual.

En hojas de recopilación de datos se documentaron el día, turno de trabajo, falla, tiempo de paro, operador y técnico de mantenimiento a cargo del equipo, con el propósito de obtener el tiempo medio entre fallos, tiempo medio de reparación y disponibilidad del equipo mensualmente. Con el procesamiento de estos datos se representaron los indicadores para observar la variabilidad mensualmente y proceder a proponer las mejoras correspondientes en la propuesta del plan de mantenimiento.

### *Elaboración de la propuesta de plan de mantenimiento*

Para llevar a cabo la propuesta de plan de mantenimiento se consideran elementos como los objetivos de mantenimiento, análisis de riesgos para las actividades, procedimiento de inicio de operación, programas de mantenimiento específico para el equipo y sus componentes, además de un programa de capacitación de tres niveles dirigido a los operadores y técnicos de mantenimiento. Dentro de las actividades propuestas en el plan de mantenimiento se consideran las siguientes:

- a) Elaboración de un check list diario para revisar condiciones de encendido de la máquina, limpieza, condiciones ambientales y de seguridad.
- b) Mejora de habilidades de los operadores.
- c) Planeación de las tareas y frecuencias de mantenimientos.
- c) Inspecciones diarias para verificar el cumplimiento de las actividades.

### **Resultados y discusión**

Un proceso industrial empieza por la etapa de diseño, donde es de suma importancia la planificación. Luego se pasa a la implementación, donde se recomienda seguir los procedimientos de aseguramiento de la calidad, como lo son supervisión, evaluación y revisión. Dentro de las actividades inherentes se encuentran las actividades de mantenimiento dedicadas a la prevención y corrección de fallas, pero debido al uso inadecuado de las maquinarias o equipos se puede afectar la calidad del proceso. Genichi

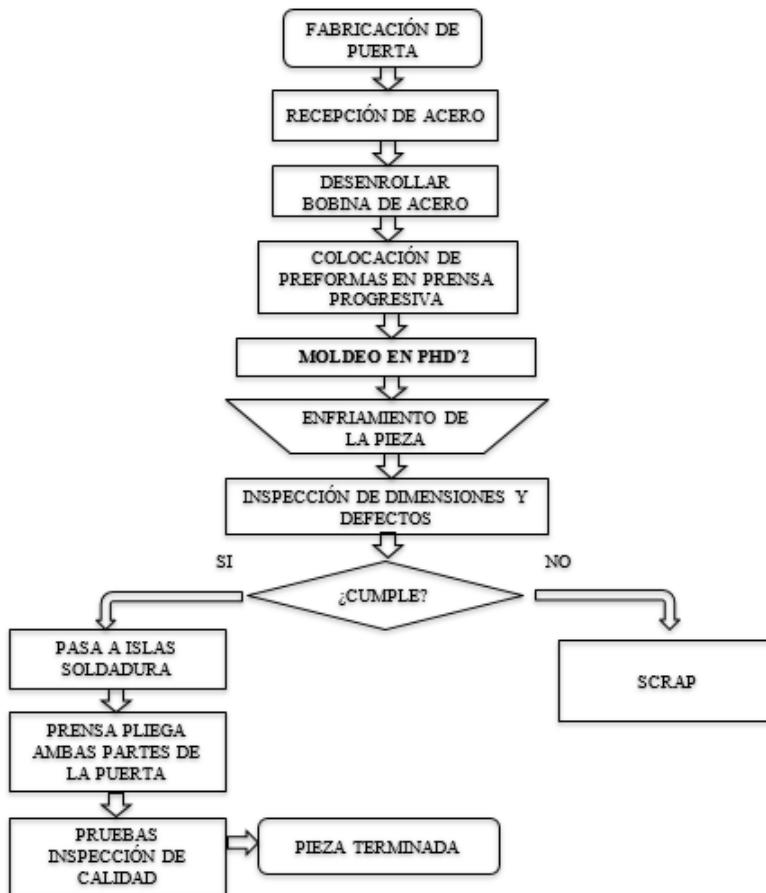
Taguchi gurú de la calidad refiere a este tipo de situaciones como factores de ruido, ya que pueden causar variabilidad en el desempeño de un sistema o producto; sin embargo, estos factores de ruido pueden controlarse cuidando la eficiencia del proceso con un plan de mantenimiento adecuado.

A continuación, se muestran los resultados organizados en cuatro fases, identificación de las fallas, análisis de las causas, determinación de las condiciones de operación actuales y, por último, la elaboración del plan de mantenimiento.

## **Identificación de las fallas**

En el proceso de fabricación de la pieza la etapa de moldeo es uno de los pasos fundamentales para alcanzar las propiedades y dimensiones que se requieren para la elaboración de puertas. Consta de tres etapas: la primera es el calentamiento de la máquina hasta alcanzar la temperatura de 900 °C durando aproximadamente 20 minutos; la segunda etapa requiere que la temperatura sea constante durante 35 minutos para moldear a las dimensiones requeridas, la tercera etapa es el enfriamiento, que dura aproximadamente 90 minutos. Posteriormente, las piezas son inspeccionadas por los operadores para que pasen a las islas de soldadura, donde continua el proceso de plegado de la puerta o sean desechadas si encuentran alguna anomalía (figura 2).

**Figura 2.** Diagrama de flujo del proceso de fabricación de puertas



Fuente: Elaboración propia

Habidin *et al.* (2019) refieren la aplicación de cuestionarios con el personal operativo para recopilar información específica indispensable para un mantenimiento autónomo. Las fallas más comentadas fueron sobrecalentamiento del equipo, motores parados y motores aterrizados. En cuanto al mantenimiento de la máquina, se le realiza principalmente uno correctivo, dejando fuera completamente al predictivo por la desorganización en las tareas. Además, no existen procedimientos o instruc-

tivos para realizar tareas de mantenimiento; sin embargo, se consideran capaces de llevar a cabo algunas como la lubricación, reapriete de conexiones y ajustes de la máquina. Realizarlas permitiría optimizar los procesos y perder menos tiempo al momento de reestablecer la máquina. A partir de la revisión de las bitácoras de mantenimiento de 2021 y 2022 se obtuvieron las fallas recurrentes del equipo PHD2 (tabla 1).

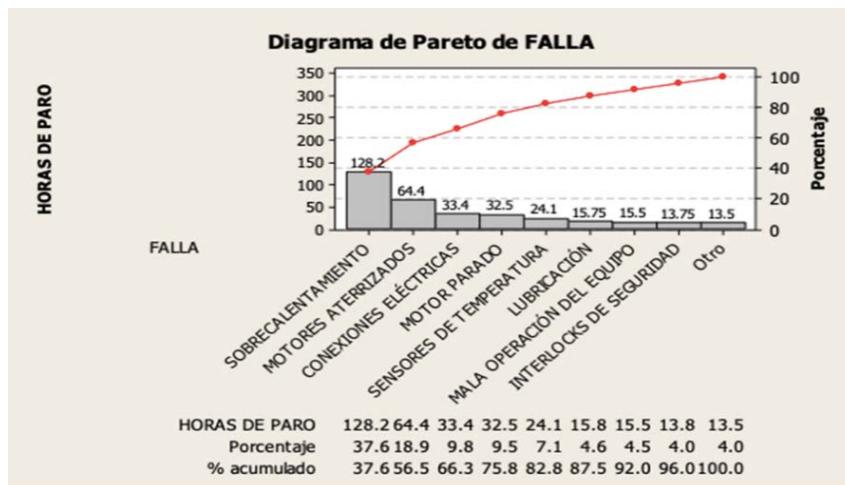
**Tabla 1.** Fallas recurrentes equipo PHD2

Falla	2021		2022	
	Frecuencia	Tiempo paro (hrs)	Frecuencia	Tiempo paro (hrs)
Sobrecalentamiento	169	60.9	200	67.3
Motor parado	110	13.1	116	19.4
Motor aterrizado	40	29.5	39	34.9
Falla de sensores de temperatura	81	12.1	79	12
Falta de lubricación	51	5.85	62	9.9
Mala operación del equipo	54	5.9	69	9.6
Falla en interlocks de seguridad	51	6.25	60	7.5
Falta de verificación de parámetros	49	5.8	60	7.7
Fallas en las conexiones eléctricas	33	14	37	19.4
<b>Total</b>	<b>638</b>	<b>153.4</b>	<b>722</b>	<b>187.7</b>

Fuente: Elaboración propia.

Se identificaron nueve tipos de falla, que deben clasificarse en dos categorías: inherentes a la máquina y sistemas de control de los operadores (González Ajuech, 2017). Se consideran como inherentes a la máquina el sobrecalentamiento, el motor parado, el motor aterrizado y las fallas en conexiones eléctricas, principalmente por ser relacionadas con el tiempo de utilización de la máquina. Las fallas restantes son correspondientes al sistema de control de los operadores debidas al inadecuado manejo del equipo.

Con la ayuda del diagrama de Pareto se visualiza de manera gráfica el comportamiento de las horas de paro por las fallas inherentes que representan 75.8 % de las horas totales de paro (figura 3).

**Figura 3.** Diagrama de Pareto de horas de paro por falla

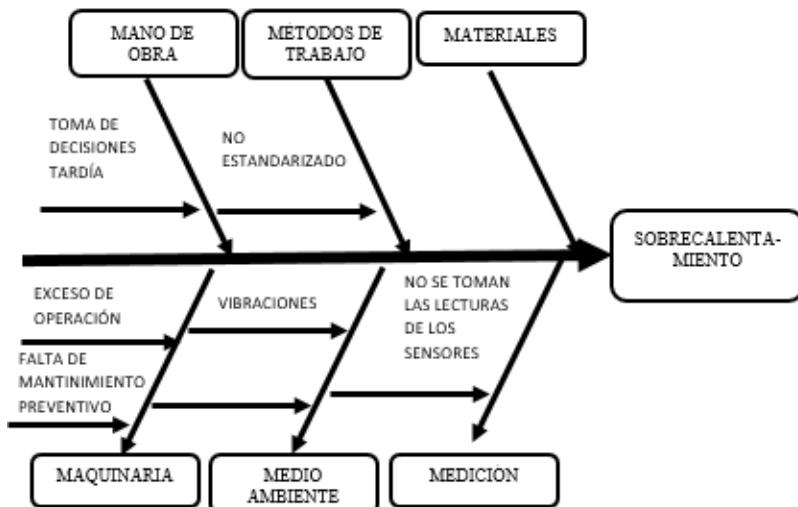
Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificando las fallas del equipo PHD2, es indispensable conocer las causas que las originan.

### Análisis de las causas

En el entendido de que a través del diagrama de Ishikawa se puede encontrar las causas reales de la falla y así resolver los problemas de calidad en el equipo o sistema, como refieren Purwanto y Jaquin (2019), el sobrecalentamiento se produce principalmente por el exceso de operación, resultado de pasar por alto las horas de operación permitidas seguido del nulo mantenimiento preventivo. A su vez, no contar con un método de trabajo establecido provoca que los operadores no desempeñen las actividades de revisión del equipo (figura 4).

**Figura 4.** Diagrama de causas, fallas por sobrecalentamiento



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, los cuatro parámetros para la obtención de la tabla de análisis de impactos fueron la frecuencia de la falla, el impacto al personal, a las instalaciones y a la producción, siendo clasificados del 1 al 5 respecto al impacto económico y la cantidad de tiempo que se para la línea de producción (tabla 2).

**Tabla 2.** Fragmento de tabla análisis de impactos

Falla	Causa	Frec.	Consecuencia	Pers.	Insta.	Produ.	Total	Factor
Sobrecalentamiento	Exceso de tiempo de operación (2 horas diarias)	317	Desgaste de equipo, disminución de ciclo de vida, alteración de especificaciones del producto.	3	5	5	13	4,121
Motor parado	Exceso de tiempo de operación (2 horas diarias)	196	Se detiene la línea de producción, desgaste de equipo, disminución de ciclo de vida.	1	3	4	8	1,568

Motor aterrizado	Exceso de tiempo de operación (2 horas diarias)	66	Se detiene línea de producción, costos extras de mantenimiento.	3	5	5	13	858
------------------	---	----	---	---	---	---	----	-----

Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar gráficamente la clasificación de las fallas se presenta la matriz de criticidad (tabla 3). Se consideró una ocurrencia de cinco veces en un turno de trabajo por falla para su representación, lo cual demuestra que las fallas inherentes a la máquina son las más críticas, ya que desde la primera ocurrencia se tiene detenida la producción.

**Tabla 3.** Matriz de criticidad

Frecuencia	5								
	4								
	3								
	2								
	1								
	Falta de lubricación	Falla en <del>interlocks</del> de seguridad	Falta de verificación de niveles	Falla en sensores de temperatura	Mala operación del equipo	Falla en conexiones eléctricas	Motor parado	Motor aterrizado	Sobre calentamiento por tiempo de operación

Fuente: Elaboración propia.

En el AMEF se representa que en las funciones del proceso todas las fallas involucran a la producción. En cuanto a los efectos de las fallas, los más comunes son la detención de la línea de producción, los costos adicionales de mantenimiento, el desgaste del equipo y las alteraciones en las especificaciones del producto. Dentro de las causas se resaltó el exceso de operación, la falta de mantenimiento preventivo/predictivo y la falta de capacitación. Por parte de los controles actuales destacan la sobrecarga de trabajo al equipo, la falta de procedimientos y controles inexistentes (tabla 4).

**Tabla 4.** Fragmento de análisis del modo y efecto de fallo equipo PHD2

ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE FALLO GESTAMP II											
Página de		Producto/pieza/sistema/proceso		LINEA PHD2		Fecha realización:		22/10/2022		Fecha revisión:	
Participantes:		Ing. Diego Iván Méndez Pérez		Responsable		Ing. Néstor Cruz Alarcón		Responsable		Ing. Christian Rafael Morales Garrido Rev.:	
FUNCION DEL PROCESO	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFFECTO(S) DE LA FALLA POTENCIAL	S	CAUSA / MECANISMO DE LA FALLA POTENCIAL	O	CONTROLES ACTUALES	D	N P R	ACCIONES RECOMENDADAS	RESPONSABILIDAD Y FECHA PROMETIDA	ACCIONES TOMADAS
Producción	Sobre-calentamiento	-Alteración de especificaciones del producto	10	Exceso de tiempo de operación	8	Sobrecarga de trabajo al equipo	1	8	Equilibrar programa de líneas de producción.	Jefe de producción	Propuesta de plan de mantenimiento.
Producción	Motor aterrizado	-Detiene la línea de producción -Costos adicionales de mantenimiento	10	Exceso de tiempo de operación	8	Sobrecarga de trabajo al equipo	1	8	Equilibrar programa de líneas de producción.	Jefe de producción	Propuesta de plan de mantenimiento.
				Alteraciones en la energía eléctrica	7	No existe, se aplica mantenimiento correctivo	1	7	Programa de mantenimiento preventivo.	Jefe de mantenimiento	Propuesta de plan de mantenimiento.
				Falta de mantenimiento preventivo	7	No existe, se aplica mantenimiento correctivo	1	7	Incluir el mantenimiento predictivo.	Jefe de mantenimiento	Propuesta de plan de mantenimiento.
Producción	Motor parado	-Detiene la línea de producción -Desgaste del equipo	8	Exceso de tiempo de operación	8	Sobrecarga de trabajo al equipo	1	6	Equilibrar programa de líneas de producción.	Jefe de producción	Propuesta de plan de mantenimiento.
				Alteraciones en la energía eléctrica	7	No existe, se aplica mantenimiento correctivo	1	6	Programa de mantenimiento preventivo.	Jefe de mantenimiento	Propuesta de plan de mantenimiento.
				Falta de mantenimiento preventivo	8	No existe, se aplica mantenimiento correctivo	1	4	Incluir el mantenimiento predictivo.	Jefe de mantenimiento	

Fuente: Elaboración propia.

Entre las acciones recomendadas se encuentran contar con un plan de mantenimiento sistemático que incluya tareas preventivas y predictivas que permitan anticipar las fallas y un programa de capacitación que involucre la realización de tareas de mantenimiento básicas a través de los operadores de producción.

### Condiciones de operación actuales

Los datos utilizados para la obtención de los indicadores indican el comportamiento de las fallas en todo el año operacional (tabla 5).

**Tabla 5.** Datos anuales para obtener indicadores de mantenimiento

Mes	Número de fallas		Tiempo disponible (horas)		Tiempo de paro (horas)		Disponibilidad	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Enero	44	51	450	468	12	14.4	97.33 %	96.92 %
Febrero	55	64	432	432	14.4	15.5	96.67 %	96.41 %
Marzo	52	57	468	486	12.3	14.5	97.39 %	97.02 %
Abril	44	51	468	468	11.15	14.5	97.62 %	96.90 %
Mayo	50	59	450	468	11.45	16.7	97.46 %	96.43 %
Junio	52	60	468	468	12.7	16.7	97.29 %	96.43 %
Julio	54	62	468	468	12.4	17	97.35 %	96.37 %
Agosto	56	63	450	486	14.1	17.9	96.87 %	96.32 %
Septiembre	54	57	468	468	12.8	18.2	97.26 %	96.11 %
Octubre	55	62	468	468	12.8	13.5	97.26 %	97.12 %
Noviembre	56	63	450	450	13	14.1	97.11 %	96.87 %
Diciembre	66	73	468	432	14.4	14.7	96.92 %	96.60 %
<b>Total</b>	<b>638</b>	<b>722</b>	<b>5508</b>	<b>5562</b>	<b>153.4</b>	<b>187.7</b>		

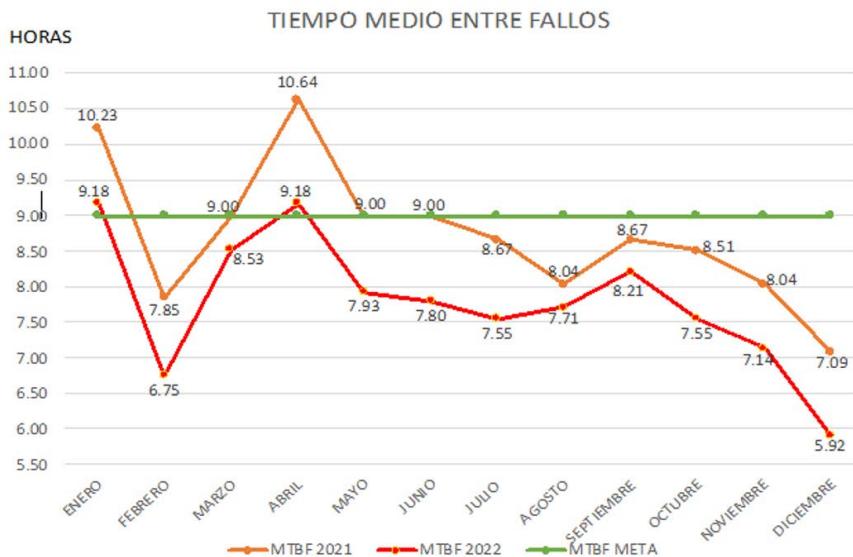
Fuente: Elaboración propia.

La medición del tiempo medio entre fallos y el tiempo medio de reparación es utilizado para mejorar la disponibilidad de las líneas de producción, lo cual es de gran ayuda para determinar los puntos críticos del año como lo menciona Ribeiro *et al.* (2019).

#### *Tiempo medio entre fallos (MTBF)*

En el MTBF se observó un comportamiento inestable a lo largo de las evaluaciones, estando en la mayoría de los meses por debajo del MTBF meta; sin embargo, en el último trimestre del año la tendencia del índice decae alcanzando un valor de falla cada 5.92 horas, lo cual coincidió con el periodo de incremento de pedidos reportado por el departamento de producción (figura 5).

**Figura 5.** Tiempo medio entre fallos equipo PHD2

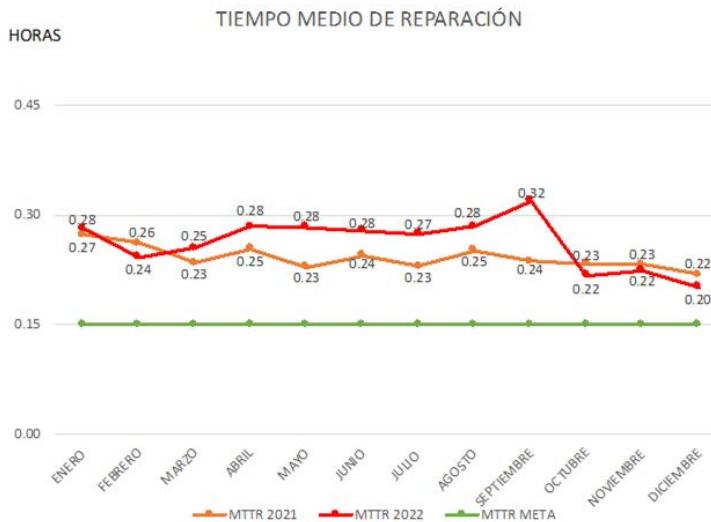


Fuente: Elaboración propia.

### *Tiempo medio de reparación (MTTR)*

En cuanto al MTTR se observó un comportamiento estable en las actividades de reactivación, aunque por encima del tiempo esperado de 0.15 horas (figura 6). En ambos años las reparaciones por sobrecalentamiento y motores aterrizados fueron las que más tardaron en ser restablecidas debido a la falta de insumos en almacén.

**Figura 6.** Tiempo medio de reparación equipo PHD2

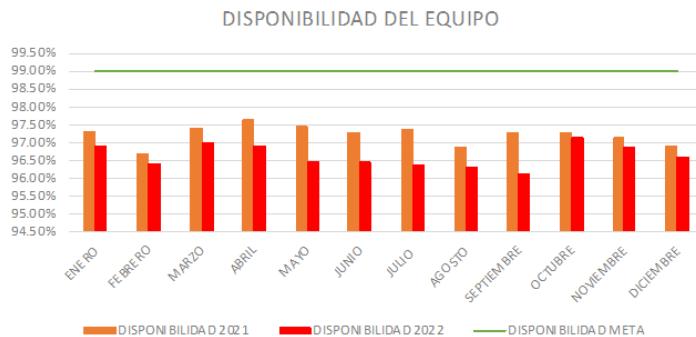


Fuente: Elaboración propia

### Disponibilidad del equipo

Con respecto a la disponibilidad del equipo, se observó una reducción en el porcentaje, debido al incremento de fallas y el aumento de los tiempos de reparación (figura 7).

**Figura 7.** Disponibilidad del equipo PHD2

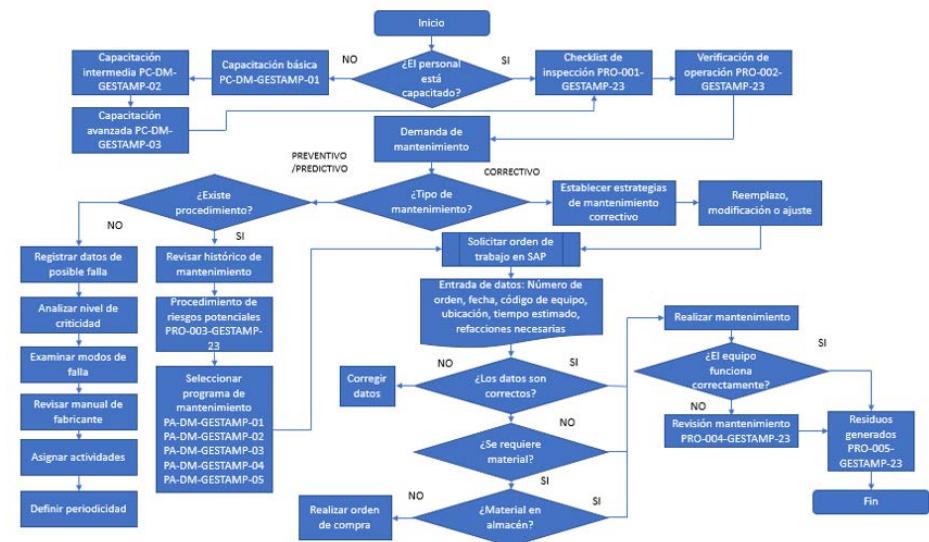


Fuente: Elaboración propia.

Para mejorar la disponibilidad, los operadores y técnicos de mantenimiento deben adquirir los conocimientos necesarios que permitan operar de manera correcta el equipo, así como prevenir fallas a través del mantenimiento preventivo y predictivo.

## Plan de mantenimiento

Purwanto y Jaquin (2021) señalan que con la combinación de los pilares de mantenimiento autónomo y capacitación del TPM se pueden reducir los tiempos de paro. A su vez, Habidin *et al.* (2019) mencionan que la constante supervisión de los operadores y su involucramiento en los mantenimientos permite que puedan suplir a los especialistas de mantenimiento en algunas tareas. Con esto se planea incorporar su participación dentro del plan de mantenimiento, que está integrado por procedimientos, programas de capacitación y programas de mantenimiento, los cuales son llevados sistemáticamente. Inicia con el llenado del *check list* de inspección inicial diaria o con la codificación PRO-001-GES-23, que utiliza parámetros de operación que deben ser llenados por el operador en turno y tiene como finalidad prevenir y detectar fallas antes de la operación. Durante la operación se utiliza el procedimiento PRO-002-GES-3 para verificar los parámetros de temperatura, lubricación y revisión de los interlocks de seguridad. Antes de realizar actividades de mantenimiento preventivo/predictivo se sigue el procedimiento de análisis de riesgos potenciales PRO-003-GES-23 para posteriormente seleccionar el programa de mantenimiento a utilizar PA-DM-GES 001 a 005. Para la revisión de las actividades se utiliza el procedimiento de revisión de mantenimientos PRO-004-GES-23, en el que se revisa el estado operativo del equipo y el seguimiento al trabajo realizado. Una vez finalizado se realiza el procedimiento de los residuos generados como se indica en el PRO-005-GES-23, en el que se identifican los residuos, se separan y se registra en una bitácora la cantidad generada para poder darles una disposición final. Los procedimientos descritos son parte del sistema de mantenimiento propuesto (figura 8).

**Figura 8.** Sistema de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia.

Para lograr la efectividad del mantenimiento y de los equipos es necesaria la capacitación y el desarrollo de los trabajadores. En este sentido, la propuesta del plan de mantenimiento incluye el programa de capacitación que se llevará a cabo en un periodo de nueve meses dividido en niveles trimestrales: básico (PC-DM-GES-01), intermedio (PC-DM-GES-02) y avanzado (PC-DM-GES-03), en los que se abordarán los temas de mantenimiento, seguridad e higiene y comunicación para la ejecución de todos los procedimientos.

Dentro de los programas de mantenimiento propuestos para cada elemento del equipo se tienen actividades de carácter preventivo y predictivo que deben de realizarse a lo largo del año operativo, los cuales deben incluir la periodicidad y las observaciones presentadas (figura 9). Algunas de las actividades preventivas incluyen la lubricación de motores, limpieza, verificación de temperatura, reapriete de conexiones eléctricas, así como reemplazo de rodamientos, interlocks de seguridad y sensores. En el caso de las labores de mantenimiento predictivo, se incluye el análisis de vibra-

ciones en motores, el análisis de lubricantes y las termografías con la finalidad de determinar su estado operativo.

**Figura 9.** Programa de mantenimiento anual motores eléctricos PA-DM-GES-23

Gestamp		ACTIVIDAD	UBICACIÓN	FRECUENCIA	BUEN ESTADO ✓ / MAL ESTADO ✗												PA-DM-GESTAMP-02
No.	ACTIVIDAD				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	LIMPIEZA EXTERIOR	PHD'S	SEMANAL														
2	COMPROBAR LUBRICACIÓN	PHD'S	SEMANAL														
3	DETECCIÓN DE VIBRACIONES	PHD'S	MENSUAL														
4	DETECCIÓN DE PUNTOS CALIENTES	PHD'S	MENSUAL														
5	COMPROBAR ESTADO DE RODAMIENTOS	PHD'S	TRIMESTRAL														
6	COMPROBAR RESISTENCIA DE AISLAMIENTOS Y PUESTA A TIERRA	PHD'S	TRIMESTRAL														

Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

En primera instancia, se logró definir el proceso para la elaboración de puertas con la aplicación de un diagrama de flujo, resaltando la etapa de moldeo e identificando las fallas del equipo de producción. Con ello se pudo comprender la operación y el comportamiento del equipo.

Asimismo, se analizaron las causas de las fallas y sus efectos con la aplicación del AMEF, con lo que se obtuvieron nueve modos de fallo, jerarquizados a través de un análisis de criticidad y determinando los que repercuten directamente en la producción de puertas. Se determinó que la mayoría de las fallas ocurren por falta de inspección, es decir, con la adecuada capacitación y supervisión pueden ser evitadas. Con los resultados de los indicadores de mantenimiento se determinó la variabilidad de la producción a través del tiempo, y se identificó que cada año incrementan las fallas conforme sube la producción; además, el porcentaje de las fallas aumentó respecto al año anterior debido a la falta de acciones correctivas.

Finalmente, se diseñó la propuesta de plan de mantenimiento considerando los modos de fallo críticos, proponiendo las tareas y frecuencias a partir de las especificaciones del fabricante y tomando en cuenta

los conocimientos empíricos del personal operativo. Se precisó que con la inclusión del programa de capacitación en el plan de mantenimiento se desarrollarán habilidades y conocimientos en el personal que podrán evitar gastos agregados por alguna reparación o sustitución de componentes del equipo. Con la implementación del plan de mantenimiento la empresa logrará evitar paros no planeados, así como las fallas que puedan deteriorar el equipo y reducir su vida útil. De igual modo, la empresa disminuirá sus costos de mantenimiento, aumentará la satisfacción del cliente al realizar las entregas a tiempo fomentando una cultura de mantenimiento autónomo y mejora continua.

## Referencias

- González Ajuech, V. L. (2017). *Mantenimiento: técnicas y aplicaciones industriales*. Grupo Editorial Patria. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://elibro.net/es/ereader/bibliotecauv/40508?page=24>.
- Habidin, N. F., Hashim, S., Fuzi, N. M., Salleh, M. I., Mustaffa, W. S. W. y Hudin, N. S. (2019). The implementation of total productive maintenance in Malaysia automotive industry. *Research in World Economy*, 10(5), 89-95. <https://doi.org/10.5430/rwe.v10n5p89>
- Palencia, O. G. (2011). *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Principios fundamentales*. Ediciones de la U.
- Purwanto, C. y Jaqin, C. (2021). *Improving curing process productivity in the tire industry using OEE, TPM and FMEA methods*. 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management at Singapore, March. Recuperado el 24 de abril de 2024 de <https://www.ieom-society.org/singapore2021/papers/1152.pdf>
- Ribeiro, I. M., Godina, R., Pimentel, C., Silva, F. J. G. y Matias, J. C. O. (2019). Implementing TPM supported by 5S to improve the availability of an automotive production line. *Procedia Manufacturing*, 38(1), 1574-1581. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.128>

# Experiencia profesional: el caso de un centro holístico de bienestar

Adriana Elizabeth MORALES SÁNCHEZ•

Xóchitl Citlalli MORALES GONZÁLEZ••

Víctor Vladimir VEGA MORALES•••

## Resumen

El Centro Holístico de Bienestar (Cenhobi) se apertura en respuesta a las necesidades de atención de desarrollo social y de acceso a la salud integral manifestadas por la comunidad tonalteca en tiempos de la pandemia provocada por COVID-19. Dicho centro logró integrar un equipo interdisciplinario que ofrece servicios de salud psicológica, nutricional, terapia física y rehabilitación, cosmetología, reiki, biomagnetismo, masajes holísticos, yoga, danza aérea, karate y zumba. También se imparten talleres en el área de la salud y recibe prestadores de servicio social y practicantes de áreas afines. El Cenhobi ha logrado atender a cientos de personas de la comunidad tonalteca, del área metropolitana de Guadalajara, de Jalisco, de México y de Estados Unidos, en modalidades presenciales y servicios que se pueden otorgar en línea (nutrición y psicología) brindando bienestar a sus clientes, se han logrado cumplir los fines establecidos.

**Palabras clave:** terapia alternativa, centro holístico, bienestar.

## Introducción

El término *holístico* se retoma en el sentido más amplio desde la medicina holística o integrativa, que está centrada en la persona y no en la

---

• Pasante de la Licenciatura en Psicología. Centro Universitario del Norte (CUNorte) y Centro Universitario de Arte Arquitectura y Diseño (CUAAD) de la Universidad de Guadalajara (UDG). xochitlmorales7950@alumnos.udg.mx, <https://orcid.org/0009-0003-1768-9668>

•• Pasante de la Licenciatura en Psicología. CUNorte y CUAAD, UDG. xochitlmorales7950@alumnos.udg.mx, <https://orcid.org/0009-0003-1768-9668>

••• Doctorado en Ciencias de la Salud en el Trabajo. CUNorte y CUAAD, UDG. adriana.morales@academicos.udg.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0000-7555>

enfermedad, lo que supone tener conocimientos sobre su cuerpo, sus antecedentes, su estado mental, su ánimo, sus condiciones de vida y su entorno social. Es indispensable una entrevista detallada, la comprensión de la cultura, las raíces, creencias, sistema de valores y el estilo de vida del paciente. La información recabada será imprescindible para la elección del tratamiento y proponer un plan mediante estrategias que aseguren cambios saludables a medida de cada solicitante. Las mejoras en el más amplio sentido de salud estarán basadas en el compromiso y el esfuerzo que lograrán el binomio paciente/terapeuta holístico (Matveikova, 2013).

Existen diversas prácticas de terapias enfocadas en prevenir la enfermedad o restaurar la salud de las personas. La medicina alternativa hace alusión a las prácticas y productos para la mejora de la salud que no forman parte de la medicina convencional o alópata. Cuando esas prácticas se conjugan con la medicina alópata se conoce como medicina complementaria (Medicina alternativa: remedios naturales para la salud, 2020). Algunas técnicas de terapias alternativas conocidas a nivel mundial son la homeopatía, la acupuntura, la fitoterapia, el reiki, la hidroterapia o la ozonoterapia, la quiropráctica, masajes holísticos, biomagnetismo, aromaterapia, yoga y meditación entre otras.

En un estudio realizado en estudiantes de ciencias de la salud en España se reportó que una gran proporción de los participantes de fisioterapia y enfermería (33 [82.5 %] y 151 [76.7 %], respectivamente) consideraron la necesidad de integrar en la práctica de diversas áreas de la salud convencional las terapias alternativas y complementarias (TAC). Por su parte, en el caso de los estudiantes de farmacia y medicina, 110 (63,6 %) y 108 (55,4 %) atribuyeron los beneficios de las TAC solo al efecto placebo. Sin embargo, en todas las disciplinas los participantes (en mayor medida los de fisioterapia y enfermería) solicitaron formación específica sobre las TAC en el currículum formativo universitario y estimaron como relevante el diseño de herramientas de información o educación sobre estas a los pacientes. Los resultados de este trabajo hacen evidente la necesidad de capacitar al personal de salud sobre las medidas de autocuidado y las medicinas alternativas. Estos conocimientos pueden mejorar la relación médico-paciente e impactar positivamente en el tratamiento. Asimismo, los resultados de esta investigación permiten comprender mejor los conceptos que tienen las personas sobre salud y enfermedad y las razones para acudir a los diversos sistemas médicos. Sin embargo,

todavía tenemos que aprender mucho sobre las necesidades, las expectativas y las demandas de las personas que buscan esta ayuda (Ballesteros-Peña y Fernández-Aedo, 2015).

Las terapias alternativas, aunque nos son reconocidas de manera científica, han demostrado su vigencia a través de los años. La bibliografía nacional e internacional cuenta con suficiente acervo referente al tema uso de estas o las complementarias. Hecho interesante es que se encuentra en ascendencia, es decir, que están siendo muy socorridos por personas con trastornos de depresión o ansiedad. En una investigación cuyo objetivo fue conocer los recursos terapéuticos y asistenciales que reciben pacientes con tratamientos alternativos para problemas emocionales, trastornos de ansiedad o depresión en la Ciudad de México, entre 2002 y 2007, los resultados de la misma evidenciaron la necesidad de capacitar al personal de salud sobre el uso de terapias alternativas, pues consideraban que los conocimientos adquiridos por el personal de salud impactarían de manera positiva en el tratamiento de los pacientes. En la conclusión se considera que existe un vacío de conocimientos en la comprensión de las necesidades, las expectativas y las demandas de las personas que recurren a este tipo de tratamientos y que es indispensable seguir investigando sobre esta temática (Berenzon Gorn *et al.*, 2009).

En otro sentido, el bienestar humano es el estado en que las personas tienen la capacidad y la posibilidad de llevar una vida que incluye motivos para valorarla. Esta es determinada por una diversidad de libertades instrumentales. El bienestar humano incluye tener seguridad personal y ambiental, acceso a bienes materiales para una vida digna, derecho a trabajo digno, buenas relaciones sociales, acceder a actividades recreativas y de ocio, buenas condiciones de salud física, mental y espiritual. Todo lo mencionado con anterioridad guarda una estrecha relación y subyace a la libertad para tomar decisiones y actuar en congruencia (Sen, 1982).

El concepto de bienestar es complejo. Existe un debate entre aspectos objetivos y subjetivos. Lo que se ha documentado se refiere al estado de equilibrio entre aspectos como la salud, la felicidad, la solvencia económica, la satisfacción, el crecimiento personal y aspectos socioculturales. En este sentido, la mayoría de países occidentalizados han propuesto políticas y programas en temas de salud, educación, ocio y recreación, entre otros, en la búsqueda para alcanzar los más altos estándares de la población en sentido de bienestar. Es importante resaltar que aspectos como

el nivel socioeconómico, la cultura, la edad y el género, por mencionar algunos, marcarán la diferencia para cubrir las expectativas.

Se encontraron algunos resultados importantes a resaltar en el presente capítulo. En un estudio realizado en México llamado la Encovid-19 se analizaron algunas variables relacionadas al bienestar de las personas en pandemia por COVID-19. Un dato que resalta sobre salud mental se refiere a la evolución del porcentaje de la población de 18 años o más con síntomas severos de ansiedad. Según nivel socioeconómico a través de la Escala Generalizada de Ansiedad, cuando hacen correlaciones entre las medidas de presión financiera, laboral y de ansiedad, se identificó que existe una asociación importante entre la ansiedad y las experiencias de reducción de ingreso, así como la pérdida de empleo en el hogar. Utilizaron mayo del 2021 como referencia para encontrar en la población total la prevalencia de síntomas severos de ansiedad, y fue de 31.4 %. Si alguien en el hogar había perdido su empleo, el porcentaje subía a 44.4 %. Además, si se reportaba que el ingreso del hogar se había reducido en 50 % o más, el porcentaje de síntomas de ansiedad fue de 42.5 %. Cabe señalar que cuando se presentaban ambas situaciones, la pérdida de empleo y de ingreso, la prevalencia de la ansiedad se incrementó hasta 52,7 %. En todos los casos reportados, cuando la entrevistada fue mujer, la presencia de síntomas de ansiedad se incrementó. Con lo anterior, se añade un factor más de vulnerabilidad a las mujeres (Teruel Belismelis y Perez Hernandez, 2021).

En otro estudio que fue dirigido a la población mayor de 18 años, con variables agrupadas en cinco categorías –perfil sociodemográfico, salud, descripción sobre el confinamiento, comunicación y expectativas para después de la cuarentena–, se incluyeron 17 países con una muestra de 1,066 sujetos. Los resultados mostraron que la población tenía miedo a enfermarse. Esto era lo más difícil de enfrentar. Se determinó que la autoridad sanitaria era la fuente de mayor credibilidad. Por el contrario, las redes sociales, la de menor. Los participantes consideraron significativo detener el deterioro de su salud, puesto que antes de los efectos del SARS-CoV-2, permitieron incrementar otros problemas de salud como sobrepeso y obesidad, diabetes, hipertensión, adicciones o estrés por condiciones laborales. Cabe destacar que también perciben que deben adquirir hábitos saludables, que el acceso al bienestar depende de sí mismos y que efectuar los cambios necesarios, por lo menos en el ámbito

familiar, mejorará su condición física y mental para mejorar sus estados de salud. En la población estudiada respecto de la salud y bienestar percibidos durante la cuarentena por la COVID-19 y de sus expectativas para cuando termine, establecen indicativos de valor para diseñar estrategias, con enfoque de mercadotecnia social, que impacten de manera positiva en las tácticas que se demandan para afrontar las nuevas realidades (Hernández Garnica y Suárez Lugo, 2021).

Por otra parte, se encontraron algunos antecedentes de proyectos relacionados a centros holísticos. En Ecuador el turismo de salud tiende al alza con incrementos anuales de demanda, pero este se encuentra en bajos niveles de desarrollado, por lo que existen escasos competidores y ofertantes. Al parecer, las crisis en la medicina moderna producto de la deshumanización de muchos procedimientos y costoso sentido económico está generando una aptitud de búsqueda de la medicina ancestral y tiende a su vez al crecimiento de este último sector. Dicho lo anterior, se considera que la operación de un centro de medicina holística y recreacional en la provincia de Imbabura es imprescindible. Se justifica por la demanda de estos servicios; también, por la aceptación de los turistas nacionales e internacionales dispuestos hacer uso de este y compartir experiencias de salud holística. Por último, apuntala hacia el rompimiento de barreras y a la entrada para negocios privados en esta rama (Rigail Vera, 2009).

En la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas se realizó un proyecto cuyo fin fue la apertura de un centro holístico de masajes relajantes con aromaterapia usando aceites esenciales. En el resumen se menciona que en Perú la población económicamente activa sufre de estrés y diferentes dolencias ocasionadas por actividades de la vida cotidiana. Con base a la investigación realizada, se evidenció el crecimiento anual de centros como spas. Consideraron factible que mediante estas prácticas se pueden prevenir enfermedades y padecimientos por medio de un procedimiento efectivo y oportuno (Flores Tello *et al.*, 2019).

Otro proyecto de centro holístico fue revisado. Este se orienta al estudio para la creación de un centro holístico para la salud en la Estancia Michoacán, municipio de Morelia, Michoacán. La idea se concibe a partir de la necesidad de implementar tratamientos medicinales más naturales, y plantean que sea un espacio abierto que esté en armonía con el medio ambiente, con el fin de apoyar a pacientes que padecen diversas enfermedades relacionadas al ritmo de vida actual, como el estrés, enfermedades

crónicas, entre otras. En el centro holístico pondrán realizar actividades que los aislen de ámbitos laborales y sociales que se viven dentro de las ciudades. Dichas actividades se orientan a técnicas medicinales para sanar el cuerpo, mente y espíritu, con el fin de mejorar el sistema inmunológico y brindar bienestar físico-mental. Es un proyecto arquitectónico que se desarrolla hacia las personas con el fin de satisfacer dichas necesidades, ofertando una variedad de posibilidades para encontrar el equilibrio a través de la oferta de productos, servicios, tratamientos, terapias complementarias, conferencias, los cuales permiten hacer un lugar ideal para lograr la renovación integral del ser humano. Será un espacio amigable con la naturaleza, conservando el ambiente que nos rodea y cuyo propósito es alejarlos de la ciudad. El fin último es que se liberen de problemas y tensiones, provocadas principalmente por el trabajo o por enfermedades (Murillo Torres, 2020).

Señalado lo anterior, se intenta incorporar un espacio en la comunidad tonalteca que procura incrementar el bienestar comunitario a través de la oferta de servicios holísticos que responda a las necesidades, de acuerdo a la idiosincrasia, al nivel socioeconómico y sociocultural de la población en cuestión. En noviembre del 2020 en plena pandemia, se comienzan a generar las ideas, primero atendiendo el perfil profesional de la doctora responsable del proyecto Cenhoobi, cuya experiencia en el área clínica de la psicología apuntalaba hacia la atención de la salud mental, con la firme intención de impactar sobre todo el bienestar de las y los clientes, pensando en el desmesurado incremento de padecimientos como ansiedad, estrés y depresión que se estaban manifestando por esos tiempos. Por su parte, se observó que el lugar es adecuado para ampliar la oferta de servicios que impacten en el bienestar humano. Entonces, se consideró indispensable brindar a las personas intervenciones holísticas e integrales que incrementen su bienestar y la calidad de vida.

El principal propósito es atender a la comunidad ofreciendo diversos servicios que aportan al bienestar. Entre los servicios que ha ofertado Cenhoobi desde mayo de 2021 hasta la actualidad, se encuentran los siguientes: psicoterapia, nutrición, terapia física y rehabilitación, podología, cosmetología, homeopatía, acupuntura, flores de bach, reiki, biomagnetismo, masajes holísticos (drenaje linfático, descontracturante, relajante, con ventosas, reductivos, etcétera). Además, se ofertan clases de danza aérea, yoga, zumba y karate (en modalidades infantiles, adoles-

centes y adultas). Se han llevado a cabo talleres de las áreas de terapia física y rehabilitación y de psicología; también se han captado prestadores de servicio social y practicantes profesionales en las áreas de terapia física y rehabilitación, así como en psicología clínica y educativa.

## **Metodología**

### **Plan de negocios**

#### *Introducción*

El proyecto surge como respuesta a la problemática de acceso a servicios de salud holísticos en la zona. Las personas buscan alternativas al modelo hegemónico médico, en el cual está sustentando principalmente los servicios de salud en el municipio de Tonalá, Jalisco, México. La intención es brindar servicios de salud, educación para la salud y desarrollo social con estrategias alternativas hacia estilos de vida saludables que avancen hacia el bienestar e incrementen la calidad de vida de la comunidad. Para este fin se define crear una organización, que en palabras de Daft (2011) es cualquier entidad dirigida a las metas bajo un sistema de actividades estructuradas y vinculadas al entorno.

#### *Justificación*

La etapa de confinamiento o cuarentena que se vivió por la enfermedad conocida como COVID-19 generó un fenómeno sin precedentes respecto a la experiencia de emociones displacenteras, así como reacciones individuales y sociales (Wind *et al.*, 2020). La depresión, la ansiedad y estados de crisis emocionales se presentaron casi de manera generalizada (Gao *et al.*, 2020). La experiencia del confinamiento, la exposición al contagio y la pérdida de un ser querido se consideraron como elementos disparadores de emociones desfavorables como angustia, insomnio, enojo, negación, incertidumbre, aislamiento y miedo (Torales *et al.*, 2020). La mejor manera de combatir lo antes mencionado es generando alternativas para atender las necesidades de bienestar que emergieron, sobre todo cumpliendo las disposiciones gubernamentales que imperaban en ese momento.

Entre los servicios de salud y de desarrollo social más solicitados en el municipio de Tonalá, Jalisco, México, durante la pandemia se encontraron los siguientes: atención psicológica, homeopatía, reiki, nutrición, fisioterapia, masajes holísticos, actividades de deporte o recreación como yoga, danza área, entre otros. Se observó mayor demanda que oferta en dichos servicios; por lo tanto, esa fue la problemática abordada y se dio respuesta a través de la oferta de los mismos en el Centro Holístico de Bienestar.

Existen varios aspectos de alcance para el proyecto: a) en la salud integral, b) en la educación por medio de talleres de dichas áreas y c) en el desarrollo social. Esto mediante la oferta de servicios para la promoción, prevención, tratamiento y rehabilitación respecto a los padecimientos (físicos, psicológicos, emocionales, comportamentales, espirituales). En cuanto a la educación, se hará por medio de talleres que aborden temáticas de salud integral. Por otra parte, en el rubro de desarrollo social, se ofertarán actividades de esparcimiento. Dichas estrategias se basan en la educación para la salud.

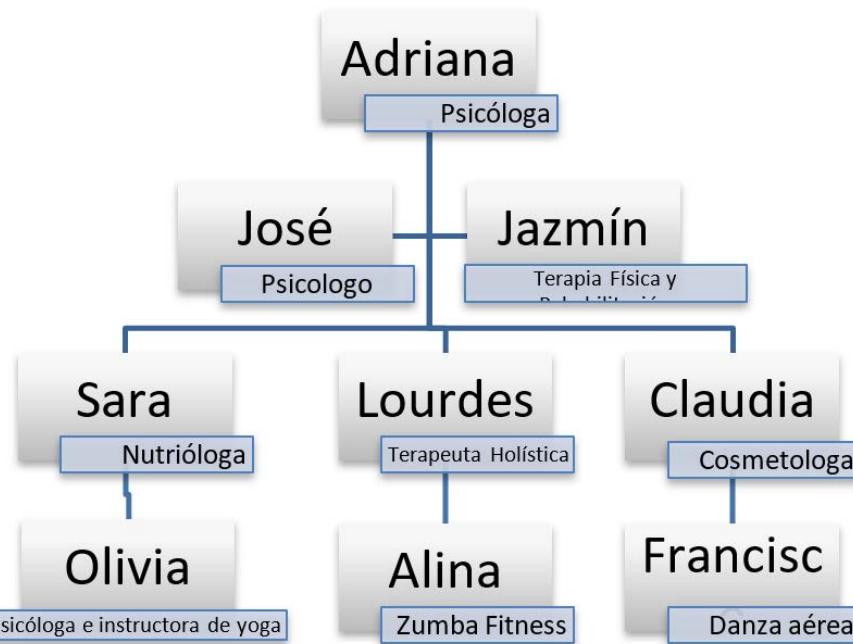
El precio al público fue considerado en un rango accesible en concordancia a los servicios conocidos dentro de la zona accesibles. La ubicación, al ser en una plaza comercial, favorece la competitividad del centro en cuanto al alcance a las personas y la ubicación estratégica. Este proyecto es factible porque se cuenta con la infraestructura y el financiamiento.

### *Datos generales*

Nombre o razón social: ADRIANA ELIZABETH MORALES SANCHEZ

Estructura de asociación: La estructura organizacional del Cenhoobi es de tipo horizontal, en el que se destaca solo el uso de una jerarquía con el cargo de la socia mayoritaria. Por otra parte, estarían los socios, quienes además aportan con una disciplina de trabajo de acuerdo a los requerimientos y servicios ofrecidos, mismo que se puede apreciar en la figura 1.

**Figura 1.** Estructura de asociación Cenohbi



Fuente: Elaboración propia.

### *Misión*

Prestar servicios de alta calidad, profesionistas que estén en permanente actualización, responsabilidad y honestidad durante la impartición de los servicios que contribuyan a la salud integral, al desarrollo humano y social.

### *Visión*

Ofrecer alternativas holísticas por parte de nuestro equipo de profesionales comprometidos con el bienestar humano, mediante modelos alternativos que atiendan necesidades de salud, educación y recreación de acuerdo al contexto actual.

## Valores

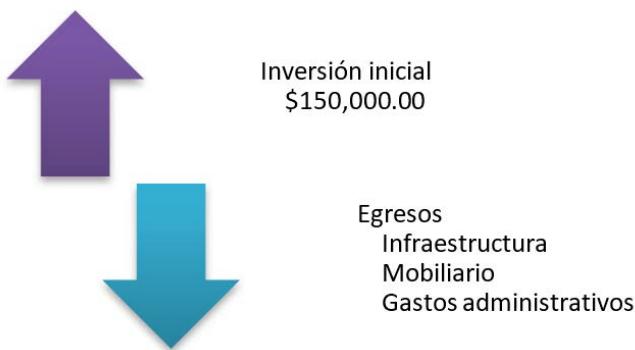
Compromiso, responsabilidad, respeto, honestidad, solidaridad, puntualidad.

## Plan administrativo

### *Inversión inicial y recursos de la empresa*

En cuanto a los recursos de este centro, la inversión inicial fue de 150,000.00 mxn. Aproximadamente, 26 % fue invertido en mobiliario; cerca de 13 %, en gastos administrativos, mientras que cerca de 61 % se destinaron a infraestructura por remodelación y adecuación de las instalaciones, tal como se puede apreciar en la figura 2.

**Figura 2.** Estructura de ingreso y egreso del Cenhobi



Fuente: Elaboración propia.

### *Recursos materiales y técnicos*

Entre los recursos materiales y técnicos disponibles para el Cenhobi, la mayor parte se concentra en el inmobiliario para habilitar los consultorios, así como los espacios de actividad física, siendo una pequeña parte de estos destinada a las funciones administrativas, tal como se desglosa en la figura 3.

**Figura 3.** Desglose de recursos materiales y técnicos



Fuente: Elaboración propia.

### *Recursos humanos*

En cuanto a los puestos del Cenhobi, podemos destacar el sistema jerárquico operativo, donde la responsable del centro y socia mayoritaria, así como algunos socios, también son operativos. Se cuenta con jerarquías menores para las actividades que no se cubren y con una plantilla completa que satisface las necesidades de recursos humanos generadas.

**Figura 4.** Diseño jerárquico Cenhoobi



Fuente: Elaboración propia.

## Herramientas de la planeación

### Análisis FODA

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"><li>-Se cuenta con un equipo de socios comprometidos, solidarios y responsables.</li><li>-Estructura organizacional</li></ul>	<p>Es un espacio que permite el desarrollo, profesional de los que laboramos ahí y un lugar de salud integral, espacio educativo y de recreación para los clientes.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Innovación</li><li>-Accesibilidad</li><li>-Demanda en alternativas holísticas</li></ul>
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"><li>-En cualquier momento se puede retirar algún socio, mientras encontramos a alguien del mismo perfil o similar, se tendrían pérdidas financieras y del recurso Humano.</li><li>-Especialización del perfil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Aumento de costo en la ubicación</li><li>-Solicitud de la ubicación por parte de los dueños</li><li>-Competencia en servicios</li></ul>

## Resultados y discusión

### Clientes atendidos

*Periodo que comprende mayo de 2021 a mayo de 2023*

Los clientes atendidos en el periodo de dos años en Cenhoobi en los diversos servicios se enumeran en la tabla número 1. Cabe señalar lo siguiente: para los clientes atendidos en el servicio de psicología, el total se refiere al número de personas que acudieron a este servicio y recibieron apoyo por alguna de las dos psicólogas o por el psicólogo, ya sea en terapia individual o de pareja. Cada cliente recibió diferente número de sesiones. El servicio de psicología estuvo abierto de lunes a sábado en turnos mixtos. El honorario fue de 300.00 pesos en m/n para quienes comenzaron su proceso terapéutico entre mayo de 2021 y el 31 de agosto de 2022 y hasta concluirlo. Para los pacientes que comenzaron su proceso a partir del primero de septiembre de 2022 el honorario fue de \$400.00 pesos en m/n.

En el caso del servicio de nutrición, se atendieron 250 clientes que acudieron en una o más ocasiones. El honorario fue de \$250 de mayo de 2021 al 31 de agosto de 2022. A partir del primero de septiembre de 2022 el honorario se estableció en \$300.00 pesos en m/n.

En el servicio de terapia física y rehabilitación se atendieron 215 pacientes que acudieron en una o más ocasiones al servicio. El honorario fue de \$300.00 pesos en m/n para quienes comenzaron entre mayo de 2021 y el 31 de agosto de 2022, para los pacientes que comenzaron su proceso a partir del primero de septiembre de 2022 el honorario fue de \$400.00 pesos en m/n.

Por lo que respecta al servicio de cosmetología, se atendieron 61 clientes que acudieron en una o más ocasiones. En este servicio los costos varían dependiendo el tratamiento que se requiere. Los precios fueron establecidos entre \$250.00 pesos en m/n y los \$400.00 pesos en m/n por servicio, y no han aumentado. Cabe mencionar que este servicio se comenzó a ofertar a partir de mayo de 2022.

La terapeuta holística atendió un total de 115 clientes en los servicios de biomagnetismo, reiki y masajes holísticos. Los precios por servicio también variaron dependiendo del tratamiento sugerido y se establecieron

a partir de \$250.00 y hasta \$300.00 pesos en m/n por sesión. Es importante añadir que estos servicios se incorporaron a partir de mayo de 2022.

En el caso del servicio de podología, se atendieron 28 clientes que acudieron en una o más ocasiones. El costo del servicio fue de \$250.00 pesos en m/n. Este servicio solo se ofertó a partir de julio del 2022 hasta noviembre del mismo año. Dicho servicio fue muy socorrido; sin embargo, la podóloga ya no pudo continuar en Cenhoobi, puesto que atiende en otros dos consultorios.

En el taller de yoga se atendieron 48 personas, de las cuales formaban parte de dos grupos, uno matutino y otro nocturno. Por lo regular estaba de manera constante ocho clientes en el turno matutino y seis en el turno nocturno. El costo de este taller de manera mensual fue de \$450.00 pesos en m/n, y no aumentó.

Por otro lado, en el taller de danza aérea se atendieron 86 clientes que formaron parte de dos grupos. Acudían martes y jueves de 19 a 20 horas menores de 13 años de edad y de 20 a 21 horas para personas de 13 años en adelante. Los grupos regularmente atendían por día entre 8 y 12 en el de menores y entre 6 y 10 en el de mayores. El costo de la mensualidad se mantuvo en \$450.00 pesos en m/n.

Para el caso de los clientes de zumba, estos acudieron en dos horarios matutino 8:30 am lunes, miércoles y viernes y horario nocturno a las 20 horas los mismos días. Se atendieron 61 clientes. Por lo regular, los grupos estaban conformados entre ocho y diez asistentes. La mensualidad era de \$320.00 pesos en m/n o pago por clase de \$35.00 pesos en m/n. Este servicio se ofertó a partir de agosto de 2022.

**Tabla 1.** Número de servicios prestados

Servicios prestados	Clientes mayo 2021 - mayo 2023
Psicología	298
Nutrición	250
Terapia física y rehabilitación	215
Cosmetología	61
Biomagnetismo	20
Reiki	38

Masajes holísticos	57
Podología	28
Taller de yoga	48
Taller de danza aérea	86
Taller de zumba	61
<b>TOTAL</b>	<b>1,162</b>

Fuente: Elaboración propia.

Si se simplifican los datos mostrados del periodo establecido, nos da una media aproximada de 48-49 servicios prestados de manera mensual, donde destacan los servicios de psicología, nutrición y terapia física y rehabilitación, abarcando 26 %, 21 % y 18 % respectivamente, mientras que el 35 % restante es absorbido por el resto de los servicios ofertados. Es destacable mencionar el crecimiento y respuesta positiva de aceptación del Cenhoobi, puesto que el registro base del primer año fue de un total de 518 servicios, aumentando en un 124 % con relación en su segundo año de operaciones.

Por último, se impartió un taller de manejo de emociones y se realizó evaluación cognitiva a cuatro adultos mayores por parte de las tres prestadoras de servicio social de la carrera de psicología del Centro Universitario del Norte (Cunorte); también, se trabajó con los practicantes de psicología clínica de Cunorte sobre el caso de un paciente, con la aprobación del consentimiento informado escrito por parte del mismo. Dentro de esta actividad se fortalecen ejes institucionales como la vinculación y formación de recursos humanos.

## Conclusiones

Los servicios prestados en Cenhoobi han respondido de manera significativa ante las demandas de la comunidad tonalteca en la contratación de los diversos servicios, como el caso de actividad física (yoga, danza aérea, zumba), talleres de terapia física y rehabilitación y psicológicos, masajes holísticos, cosmetología, podología, terapia física y rehabilitación, reiki, biomagnetismo; en los servicios de nutrición y psicológicos los alcances han sido nacionales e internacionales a través de la oferta virtual.

Un dato significativo que cabe resaltar es que muchos de los pacientes acudieron a más de dos servicios, y en algunos de esos casos se realiza trabajo de salud integral. Se trabajó de manera colaborativa para mejores resultados en los tratamientos. Los clientes mencionaron que es un excelente lugar y que no tiene que viajar lejos y a diferentes lugares en busca de los diferentes servicios, por lo que al obtener la media de los datos de los servicios prestados se ha logrado alcanzar el objetivo del plan de negocios establecido, esto a través de la oferta de los diversos servicios ofrecidos, así como el crecimiento de la demanda de los servicios.

## Referencias

- Ballesteros-Peña, S. y Fernández-Aedo, I. (2015). Conocimientos y actitudes sobre terapias alternativas y complementarias en estudiantes de ciencias de la salud. *Investigación en Educación Médica*, 4(16), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.riem.2015.07.002>
- Berenzon Gorn, S., Alanís Navarro, S. y Saavedra Solano, N. (2009). El uso de las terapias alternativas y complementarias en población mexicana con trastornos depresivos y de ansiedad: Resultados de una encuesta en la Ciudad de México. *Salud Mental*, 32(2), 107-115.
- Daft, R. L. (2011) *Teoría y diseño Organizacional* (10<sup>a</sup> edición). Cengage Learning. Recuperado el 7 de abril de 2024 en [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w23309w/Teoria\\_Diseno\\_Organizacional.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w23309w/Teoria_Diseno_Organizacional.pdf)
- Gao, J., Zheng, P., Jia, Y., Chen, H., Mao, Y., Chen, S., Wang, Y., Fu, H. y Dai, J. (2020). Mental health problems and social media exposure during COVID-19 outbreak. *Plos One*, 15(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231924>
- Flores Tello, E. C., Purizaca Sosa, R., Torres Cruz, E. R. y Torres Changana, V. A. (2019, 18 de febrero). *Plan de negocios para la implementación de un Centro Holístico* [Trabajo de grado para optar por el grado de bachiller en Administración de Empresas y Marketing]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Recuperado el 14 de septiembre de 2023 en <http://hdl.handle.net/10757/625527>
- <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625527>
- Hernández Garnica, C. y Suárez Lugo, N. (2021). Salud y bienestar en el tiempo de la pandemia del COVID-19. *Horizonte Sanitario*, 20(3), 395-406. <https://doi.org/10.19136/hs.a20n3.4229>

- Matveikova, I. (2013). *Salud pura: todas las claves detox de la medicina holística*. La Esfera de los Libros.
- Medicina alternativa: remedios naturales para la salud (2020, 13 de octubre). Veigler. Recuperado el 7 de abril de 2024 de <https://veigler.com/medicina-alternativa/#:~:text=Origen%20de%20la%20medicina%20alternativa,intr%C3%ADnseca%20del%20cuerpo%20para%20sanarse>
- Murillo Torres, E. A. (2020). *Centro holístico para la salud en La Estancia Michoacán* [Tesis]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado el 7 de abril de 2024 de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/11321](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/11321)
- Rigail Vera, F. J. (2009). *Plan de negocios para la creación del Centro de Medicina Holística y Recreacional Mishqui Samari (Dulce Descanso)*. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
- Sen, A. (1982) *Choice, Welfare and Measurement*. Blackwell.
- Teruel Belismelis, G. y Pérez Hernández, V. H. (2021). Estudiando el bienestar durante la pandemia de COVID-19: la Encovid-19. *Revista Mexicana de Sociología*, 83(especial), 125-167. <https://doi.org/10.22201/iis.01882503p.2021.0.60071>
- Torales, J., O'Higgins, M., Castaldelli-Maia, J. M. y Ventriglio, A. (2020). The outbreak of COVID-19 coronavirus and its impact on global mental health. *International Journal of Social Psychiatry*, 66(4), 317-320. <https://doi.org/10.1177/0020764020915212>
- Wind, T. R., Rijkeboer, M., Andersson, G. y Riper, H. (2020). The COVID-19 pandemic: The 'black swan' for mental health care and a turning point for e-health. *Internet Interventions*, 20. <https://doi.org/10.1016%2Fj.internet.2020.100317>

**Avances de la Ciencia y la Tecnología para  
el Desarrollo Sostenible. Tomo III**

Se terminó de editar noviembre de 2024 en  
los talleres gráficos de Prometeo Editores, S. A. de C. V.  
Libertad 1457, colonia Americana, C. P. 44160,  
Guadalajara, Jalisco, México.

Hecho en México / *Made in Mexico*

**Fuentes tipográficas utilizadas:**

Gelasio y Open Sans

ISBN: 978-607-581-406-3

A standard linear barcode representing the ISBN 978-607-581-406-3.

9 7 8 6 0 7 5 8 1 4 0 6 3