



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE  
COAHUILA



Journal of BioProcess and  
Chemical Technology

# Journal of Bioprocess and Chemical Technology

ISSN:2683-3271

Vol. 18, No. 36

Enero-Junio 2026



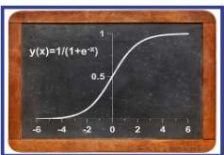
## Prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo

Fraire Hernández, M.F.\*, Girón Carrillo, J., Dávila Ochoa, E.J., Flores Chaires, L.A., Fraire Frausto, D.T., Delgadillo Escobedo, G., Domínguez Pérez, E., Rodríguez González, B., Alberto-Ayala A.



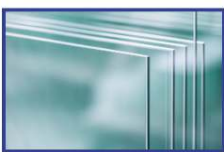
## Señal Fisieléctrica de semillas *Lens culinaris* en germinación con sustrato de hidrogel y agujas hipodérmicas como electrodos

Fuentes Martínez, L., García Duran, A., Esquivel Felix, R.\*, Rodríguez Abdala, V., Gómez Rodríguez, J., Bañuelos García, L., Cleva, M., Liska, D., Valdez Valdez, E.



## El Modelo de Gompertz en la Modelización de Fenómenos de Crecimiento Limitado: aplicaciones Interdisciplinarias en Contexto

Martínez-Ortiz, J., Ramírez-Hernández, L.\*, García-Reyna, M.\*, Badillo de Loera, J.



## Efecto de la concentración del ligante citrato ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ) en la adherencia de películas de CdS obtenidas por depósito en solución química sobre sustratos de vidrio utilizando el sistema $CdCl_2-Na_3C_6H_5O_7-NaOH-SC(NH_2)_2$

Rosas-Domínguez, C.J., Escalante-Bujanda, M.A., Sandoval-Sánchez, R.I., Vargas-Durazo, J.T., Corona-Martínez, D.O., García-Valenzuela, J.A.



## Propuesta para la Mejora De La Eficiencia del Proceso de Producción en un Obrador de Carnicería

Guirette-Barbosa, O.A., Correa- Aguado, M.H\*., Carrera-Escobedo, J.L., Zepeda-Valles, G., Reyes-Sánchez, J. de J., Cleva, M., Cardoso Pérez, M.





UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE  
COAHUILA



Journal of BioProcess and  
Chemical Technology

# Journal of Bioprocess and Chemical Technology

ISSN:2683-3271

Vol. 18, No. 36

Enero-Junio 2026



## Síntesis verde óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica* y su aplicación en la fotodegradación de colorantes

Quevedo Robles, R.V., Arce Barajas, A.G., Cota Leal, M.A., Ochoa Estrella, F.J., Luque Morales, P.A.\*



## D-alulosa, Un Alimento Funcional con Características Anticariogénicas: Revisión Bibliográfica

Cavazos López EN, Rubio Ríos A, Esquivel JC, Velázquez Manzanares M, De la Garza Ramos M, Flores Flores DA, Torres Reyes P



## Efecto Inhibitorio de Películas de Quitosano y Papaína Activadas con Plasma en *Streptococcus mutans*

Tascón-Acevedo, P.A., Reyes-Acosta, Y.K., Arredondo-Valdés, R., Reyes-Acosta, A.V., Segura-Ceniceros, E.P., Vargas-Segura, A.I.\*



JBCT-Journal of BioProcess and Chemical Technology, año 2026 Volumen 18, No. 36, enero-junio 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Coahuila. Boulevard Venustiano Carranza s/n, colonia República Oriente, C.P. 25280, tel.: (844)111 2133; jbct@uadec.edu.mx. Editor Responsable Dra. N. Paola Meléndez Rentería. Reserva de Derechos al uso exclusivo No. 04-2022-021513073100-102. ISSN:(2683-3271), ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Universidad Autónoma de Coahuila, N. Paola Meléndez Rentería, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Fecha de última modificación, enero 2026.

Los autores que publican en esta revista conservan los derechos de autor de sus obras y otorgan al comité editorial el derecho exclusivo de primera publicación bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial (CC BY-NC). Esta licencia permite el uso, distribución, reproducción y adaptación del contenido sin fines comerciales, siempre que se otorgue el reconocimiento apropiado a los autores y a la fuente original de publicación. Queda estrictamente prohibido cualquier uso con fines comerciales sin autorización expresa y por escrito del titular de los derechos.

Authors who publish in this journal retain the copyright of their work and grant the editorial board the exclusive right of first publication under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license. This license permits use, distribution, reproduction, and adaptation of the content for non-commercial purposes, provided proper credit is given to the original authors and source of publication. Any commercial use is strictly prohibited without the express written consent of the copyright holder.



# JBCT

# Journal of BioProcess and Chemical Technology

## ISSN: 2683-3271

### **Editora en jefe:**

Dra. Norma Paola  
Meléndez Rentería

### **Editores Asociados:**

Dr. Jorge Carlos Ríos  
Hurtado  
Dr. Cristian Torres León  
QFB Fernando A. García  
Villarreal

### **Editores Invitados:**

Dr. Hector Antonio Durán  
Muñoz  
Dr. Oscar Cruz Dominguez

### **Consejo Editorial Administrativo:**

Dr. Luis Gutierrez Flores, Dr. David Castro Lugo, Dr. Arturo Rodríguez Vidal.

### **Comité Técnico:**

Juanita Imelda García Gómez, Miriam Delabra Mosivais

### **Consejo editorial nacional e internacional:**

Damaso Navarro Rodríguez Advances Materials  
Centro de Investigación en Química Aplicada; Lorenzo Pastrana Castro  
International Iberian Nanotechnology Laboratory; Lilia Arely Prado Barragán  
Universidad Autónoma Metropolitana; Deepak Kumar Verma  
Indian Institute of Technology; Virginia Guadalupe Nevárez Moorillón  
Universidad Autónoma de Chihuahua; Dr. Zainul Akmar Zakaria  
Universiti Teknologi Malaysia; Anna Ilina Universidad Autónoma de  
Coahuila; Liliana Serna Cock Universidad Nacional de Colombia; Jorge  
Enrique Wong Paz Universidad Autónoma de San Luis Potosí; Gisela Tubio  
Universidad Nacional de Rosario; José Juan Buenrostro Figueroa  
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.; Miguel Cerqueira  
International Iberian Nanotechnology Laboratory; Miguel Ángel Aguilar  
González Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-IPN; Sócrates  
Palacios Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL); Miguel Velázquez  
Manzanera Universidad Autónoma de Coahuila; Alessandra Napolitano  
University of Naples Federico II; Nagamani Balagurusamy Universidad  
Autónoma de Coahuila; José A. Teixeira University of Minho; Aide Saenz  
Galindo Universidad Autónoma de Coahuila; Sevastianos Roussos  
Mediterranean Instituto of Biodiversity and Ecology; Anilu Rubio Ríos  
Universidad Autónoma de Coahuila; Sabu Abdulhameed Kannur University;  
Claudia Magdalena López Badillo Universidad Autónoma de Coahuila;  
Shiburaj Sugathan  
Kannur University; Teresinha Silva Goncalves Universidade Federal de  
Pernambuco.

**Editora en jefe:**

Dra. Norma Paola  
Meléndez Rentería

**Editores Asociados:**

Dr. Jorge Carlos Ríos  
Hurtado  
Dr. Cristian Torres León  
QFB Fernando A. García  
Villarreal

**Editores Invitados:**

Dr. Hector Antonio Durán  
Muñoz  
Dr. Oscar Cruz Dominguez

**Información editorial**

**Dr. Cristóbal Noé Aguilar González**

Primer Editor y Fundador de JBCT y AQM - Acta Química Mexicana (nombre original de la revista)

**Dr. Raúl Rodríguez Herrera**

Segundo editor y co-fundador de JBCT y AQM - Acta Química Mexicana

**Dra. Rosa María Rodríguez Jasso**

Tercer Editora desde sus orígenes como AQM - Acta Química Mexicana

**Dra. Mónica L. Chávez González**

Cuarta editora, inicio de nombre como JBCT

**Otros editores y editoras de JBCT**

Dra. Adriana Carolina Flores Gallegos  
Dr. Leonardo Sepúlveda Torre  
Dr. Juan Alberto Ascacio Valdés

## Prólogo

En esta edición de nuestra revista JBCT, se presenta un conjunto de investigaciones que, desde distintas perspectivas disciplinares, ilustran la riqueza y diversidad del quehacer académico contemporáneo, articulando propuestas que van desde la innovación tecnológica aplicada a la salud hasta la optimización de procesos industriales y el desarrollo de alternativas sostenibles en química y alimentación. Este número es particular, ya que se trabajó en colaboración con editores invitados de la Universidad Autónoma de Zacatecas, quienes trabajaron arduamente durante todo el proceso editorial de los manuscritos y apoyaron significativamente al equipo de JBCT para la realización de este documento.

Así, el prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo constituye un esfuerzo por democratizar el acceso a dispositivos biomédicos mediante soluciones ingenieriles accesibles; mientras que el estudio sobre la señal fisiológica de semillas de *Lens culinaris* en germinación, con sustrato de hidrogel y agujas hipodérmicas como electrodos abre nuevas rutas para comprender la interacción entre sistemas biológicos y herramientas físicas de medición; en el ámbito de la modelización matemática, el análisis del Modelo de Gompertz en la modelización de fenómenos de crecimiento limitado: aplicaciones interdisciplinarias en contexto demuestra la capacidad de las ecuaciones para trascender fronteras disciplinares y convertirse en instrumentos de interpretación de la realidad. Por su parte, la investigación sobre el efecto de la concentración del ligante citrato ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ) en la adherencia de películas de CdS obtenidas por depósito en solución química sobre sustratos de vidrio utilizando el sistema  $CdCl_2-Na_3C_6H_5O_7-NaOH-SC(NH_2)_2$  refleja el rigor experimental necesario para perfeccionar materiales de relevancia tecnológica; en el terreno de la producción alimentaria, la propuesta para la mejora de la eficiencia del proceso de producción en un obrador de carnicería evidencia cómo la ciencia y la ingeniería de procesos pueden transformar prácticas tradicionales en modelos más sostenibles y competitivos; la química verde se hace presente en la síntesis de óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica*, una planta endémica de las zonas áridas, y su aplicación en la fotodegradación de colorantes, mostrando la pertinencia de alternativas respetuosas con el medio ambiente frente a los retos de la contaminación; finalmente, la revisión sobre la D-alulosa, un alimento funcional con características anticariogénicas al igual que la evaluación de películas de quitosano y papaína activadas con plasma subrayan la importancia de la investigación en nutrición y salud como motor de bienestar social.

En conjunto, estos trabajos no solo representan avances específicos en sus respectivos campos, sino que también constituyen un testimonio del compromiso de la comunidad científica con la generación de conocimiento interdisciplinario, aplicado y socialmente relevante, reafirmando que la ciencia, en todas sus manifestaciones, es un catalizador indispensable para el progreso y la transformación de nuestra sociedad.

Atentamente.

**Dra. N. Paola Meléndez Rentería**  
**Editora en Jefe de JBCT**

## Prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo

### Design and implementation of a low-cost advanced orthotic biosuit

Fraire Hernández, M. F.<sup>1\*</sup>, Girón Carrillo, J.<sup>1</sup>, Dávila Ochoa, E.J.<sup>1</sup>, Flores Chaires, L.A.<sup>1</sup>, Fraire Frausto, D.T.<sup>1</sup>, Delgadillo Escobedo, G.<sup>1</sup>, Domínguez Pérez, E.<sup>1</sup>, Rodríguez González, B.<sup>1</sup>, Alberto-Ayala A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, 98000 Zacatecas, Zac.

\*Corresponding Author: [miguelfraire@hotmail.com](mailto:miguelfraire@hotmail.com)

Recibido: 14 de enero de 2025

Aceptado: 7 de agosto de 2025

#### Resumen

La nueva revolución tecnológica aparece aproximadamente en el año 2011, y trae consigo una nueva tendencia en avances tecnológicos, abarcando amplios campos como la inteligencia artificial, robótica, vehículos autónomos, impresión 3D, biotecnología, ciencia de los materiales y almacenamiento de energía, la computación cuántica, por nombrar algunos. Esta revolución industrial trae consigo también cambios importantes en el campo de la medicina. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo. Para lo cual, se realiza en una primera etapa un análisis en el desarrollo de la estructura de la órtesis; dicha estructura esta enfocada a pacientes que padezcan lesiones traumáticas agudas, afecciones crónicas o para brindar un soporte a las articulaciones. Este trabajo tiene la finalidad de brindar una neuro-rehabilitación que conlleve a la mejora de estos padecimientos. La ciencia indica que la biomimética tiene como función imitar los patrones y estrategias de la naturaleza; en base a esto se buscó crear una herramienta capaz de emular los patrones de movimiento de una marcha o caminata. Este trabajo se fundamenta en los avances en materia de sensores, los cuales permiten a los robots comprender y responder de mejor manera a su entorno y dedicarse a una variedad más amplia de tareas. Entre los resultados importantes de este trabajo se encontro que en comparación con exoesqueletos comerciales y sistemas reportados en la literatura, el prototipo T.O.A. (traje ortésico avanzado) ofrece una solución accesible y modular, con un enfoque en la integración de materiales económicos y tecnología abierta. Si bien su rendimiento en términos de torque y precisión es menor que dispositivos industriales avanzados, cumple con los requerimientos básicos para rehabilitación funcional. Las pruebas mostraron que la latencia y precisión se encuentran dentro de rangos aceptables para este tipo de aplicaciones, lo que posiciona al T.O.A. como una alternativa viable para entornos con limitaciones presupuestales.

**Palabras clave:** Biotraje ortésico; Arduino; Articulaciones.

#### Abstract

The new technological revolution emerged around 2011, bringing a new wave of technological advancements across broad fields such as artificial intelligence, robotics, autonomous vehicles, 3D printing, biotechnology, materials science, energy storage, and quantum computing, to name a few. This industrial revolution also brought important changes to the field of medicine. Specifically, the objective of this work is to develop a preliminary prototype of a low-cost orthotic biosuit. To this end, an initial analysis is carried out during the development of the orthosis structure; this structure is focused on patients with acute traumatic injuries, chronic conditions, or those requiring joint support. This work aims to provide neurorehabilitation that improves these conditions. Science indicates that biomimicry imitates the patterns and strategies of nature; based on this, the goal was to create a tool capable of emulating the movement patterns of a gait. This work is based on advances in sensor technology, which enable robots to understand better and respond to their environment and perform a wider variety of tasks. Among the key results of this work was the finding that, compared to commercial exoskeletons and systems reported in the literature, the T.O.A. (advanced orthotic suit) prototype offers an affordable, modular solution, with a focus on integrating inexpensive materials and open technology. While its torque and precision are lower than those of advanced industrial devices, it meets the basic requirements for functional rehabilitation. Tests showed that latency and precision are within acceptable ranges for this type of application, positioning the T.O.A. as a viable alternative for budget-constrained environments.

**Keywords:** Orthotic Biosuit; Arduino; Joints.

## INTRODUCCIÓN

La implementación de distintos sistemas electrónicos para órtesis es ampliamente utilizado, debido a la necesidad imperante de la sociedad (Albornoz et al., 2019; García Cabezas, 2018). Además del rápido aumento poblacional de la tercera edad se ha observado un incremento en las consultas de traumatología y ortopedia por desgaste articular, ha derivado en un deterioro motriz y disminución del autocuidado, creando una necesidad de recurrir a nuevas tecnologías para solucionar estas deficiencias de salud. Estos dispositivos presentan costos elevados, por lo que pueden llegar a ser inaccesibles a la mayoría de este sector poblacional. Actualmente, existe una cantidad limitada de estudios al respecto de estos dispositivos, debido a su precio excesivo y al poco apoyo que se le brindan a este tipo de investigaciones, además de que su desarrollo es desafiante, por los problemas que surgen durante su integración.

Por otro lado, la neuro-rehabilitación es un proceso esencial para pacientes que han sufrido deterioro en su capacidad motriz, ya sea por envejecimiento, desgaste articular debido a actividades físicas intensas o como consecuencia de accidentes de tránsito. Sin embargo, muchos tratamientos actuales requieren supervisión constante y son costosos, lo que limita su accesibilidad. Ante esta necesidad, se propone el diseño de un dispositivo automatizado que, mediante ejercicios de repetición programados, contribuya a la rehabilitación física del paciente. Este tipo de tecnología permitiría mejorar la continuidad del tratamiento en el hogar, reducir la carga del personal médico y aumentar la eficacia del proceso de neuro-rehabilitación. De esta manera, se busca contribuir al desarrollo de soluciones accesibles, eficientes y adaptables para mejorar la calidad de vida de los pacientes (Solbeygen Agudelo et al., 2015; García Ríos et al., 2015).

Este tipo de dispositivos son conocidos como órtesis, y sirven de apoyo y soporte para el sistema neuromusculo-esquelético. Estos son capaces de corregir algún movimiento anormal o brindar soporte a alguna extremidad después de alguna deformación, disfunción o presencia de dolor dentro del sistema locomotor. Una Órtesis Robótica tiene como núcleo: actuadores, sensores y controladores. Formando un dispositivo mecatrónico externo diseñado para asistir, apoyar o corregir funciones

biomecánicas del cuerpo humano. Combinando la mecánica, electrónica y el control automático son los principales fundamentos de la ciencia Biónica. También es importante tomar en cuenta la marcha humana, la cual es una función motora compleja que permite el desplazamiento bípedo coordinado, sustentada en la interacción dinámica entre el sistema nervioso, muscular y esquelético. Comprender sus bases anatómicas y biomecánicas es esencial para el diseño de órtesis robóticas, ya que estas deben integrarse funcionalmente con el patrón de movimiento natural del cuerpo humano (Quinzaños Fresnedo et al., 2015; Barrera Sánchez et al., 2024)

Cabe mencionar que durante el ciclo de marcha, el cuerpo humano emplea de manera sinérgica una red de estructuras osteomusculares distribuidas en varios segmentos clave. La biomecánica de la marcha se enfoca en cómo los músculos, huesos y fuerzas externas interactúan para permitir una locomoción eficiente. El cuerpo humano emplea un sistema de palancas anatómicas para convertir la fuerza muscular en movimiento, lo que permite un desplazamiento eficaz con un gasto energético mínimo (Fajardo Zapata, 2015; Lelis et al., 2012).

También es necesario el concepto de palanca, la cual es una estructura rígida que rota alrededor de un punto fijo (fulcro) cuando sobre ella se aplica una fuerza interna (potencia) para vencer una resistencia. En términos funcionales, según la mecánica clásica. El análisis de la marcha se apoya en tres tipos de parámetros principales: (1) Cinemáticos: Describen el movimiento (ángulos articulares, velocidad, longitud del paso y cadencia). Esto claro sin considerar las fuerzas involucradas. (2) Cinéticos: Evalúan las fuerzas implicadas, como la reacción del suelo, la gravedad y los torques articulares.

Se refieren a las fuerzas externas involucradas para la generación del movimiento. (3) Electromiográficos (EMG): Registran la activación muscular en cada fase del Ciclo de marcha (Iravani et al., 2018). Permitiendo evaluar su sincronización y magnitud en las distintas fases del ciclo.

El avance biotecnológico ha impulsado significativamente la mejora en la calidad de vida de los seres humanos. La colaboración interdisciplinaria entre la medicina y la ingeniería ha permitido el desarrollo de

instrumentos cada vez más precisos (Bautista Bautista et al., 2024; Castillo González et al., 2022), no solo para diagnósticos médicos, sino también como herramientas complementarias en tratamientos y procesos de rehabilitación. El desarrollo de exotrajes robóticos tiene sus raíces en la mitad del siglo XX, específicamente durante la década de 1960. Una de las primeras iniciativas comerciales fue el proyecto Hardiman, desarrollado por la empresa estadounidense General Electric.

Este exotraje de cuerpo completo fue diseñado para incrementar la fuerza del usuario, permitiéndole levantar objetos pesados. Paralelamente, a finales de los años 60 y principios de los 70, instituciones como el Instituto Mihajlo Pupin en Serbia y la Universidad de Madison-Wisconsin en Estados Unidos exploraron la integración de esta tecnología para asistir a usuarios con distintas discapacidades motoras. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas y la falta de experiencia en ese entonces impidieron la concreción exitosa de estos proyectos, hasta que, con la madurez tecnológica alcanzada en el nuevo milenio, se retomaron estos desarrollos con mayor viabilidad. Inicialmente, el principal objetivo en la fabricación de exotrajes fue su aplicación industrial, con la intención de compensar la fatiga y aumentar la fuerza física de los trabajadores para optimizar procesos productivos. Aunque estos objetivos industriales no se alcanzaron plenamente, sentaron un precedente importante que sirvió como punto de partida para orientar el desarrollo de esta tecnología hacia aplicaciones ortopédicas y de asistencia humana en el siglo XXI. Con la entrada en el nuevo milenio, los exotrajes comenzaron a posicionarse como productos accesibles para usuarios con necesidades específicas. Uno de los primeros dispositivos en este sentido fue el Lokomat, desarrollado y distribuido por la empresa Hocoma AG. Este exoesqueleto fue diseñado para la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesiones de la médula espinal o que sufrieron accidentes cerebrovasculares. Desde 2001, el Lokomat se ha utilizado en hospitales y centros de rehabilitación a nivel mundial, evidenciando un avance significativo en la aplicación clínica de esta tecnología.

Durante la primera década del siglo XXI, el desarrollo tecnológico propició la aparición de múltiples laboratorios de investigación y compañías dedicadas a la innovación en este campo. A partir de 2010, surgieron

diversos prototipos con aplicaciones militares cuyo objetivo era aumentar la fuerza y resistencia de los soldados, conceptualizando la idea de “soldados mecanizados” que transforman el campo de batalla y abren nuevos horizontes tecnológicos. Entre estos prototipos destacan el Raytheon XOS y el Lockheed Martin HULC (Human Universal Load Carrier). El Raytheon XOS 1.0, financiado por DARPA y desarrollado por Sarcos, es un exotraje corporal completo capaz de aumentar la fuerza y resistencia del usuario, aunque su operación depende de un “cordón umbilical”, es decir, un cable conectado a una fuente de energía externa que limita su portabilidad.

Por otro lado, el HULC, originalmente desarrollado por Berkeley Bionics (actualmente Ekso Bionics) y adquirido posteriormente por Lockheed Martin, está diseñado para soldados que operan en terrenos montañosos o accidentados. Este exotraje hidráulico-robótico de tercera generación permite cargar pesos superiores a 90 kg, distribuyendo la carga al suelo mediante sus calzados especiales. A diferencia del Raytheon, el HULC es portátil y modular, pudiendo ser ensamblado o desmontado en aproximadamente 30 segundos, lo que le confiere mayor flexibilidad para su uso en campo. Gracias a estos avances tecnológicos, desde la década de 2000 se han desarrollado exotrajes específicamente orientados a la rehabilitación y asistencia humana, con sistemas portátiles y eficientes. La mayoría de estos dispositivos están dirigidos a usuarios con paraplejía, facilitándoles abandonar la silla de ruedas y recuperar la capacidad de caminar. Ejemplos destacados son el exoesqueleto ReWalk de ReWalk Robotics y el Indego de Parker Hannifin, basados en investigaciones realizadas en la Universidad Vanderbilt. Dentro de esta línea surgieron los exoesqueletos pasivos, sistemas que no requieren actuadores o motores para su funcionamiento (Ayala-Lozano et al., 2011; López et al., 2014). Su estructura se basa en mecanismos mecánicos (como resortes o elementos de soporte) que distribuyen el peso o carga útil, aliviando el esfuerzo físico del usuario. Estas órtesis robóticas se integran a través de arneses o estructuras ligeras que permiten al trabajador manipular herramientas o materiales pesados de forma más ergonómica, eficiente y segura. Su bajo costo, ligereza y simplicidad operativa los han convertido en una opción viable para múltiples industrias.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un prototipo preliminar de un biotraje ortésico de bajo costo para extremidades inferiores que busca asistir la marcha a bajas velocidades controlado por un sensor EMG (sensor de electromiografía).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El exoesqueleto desarrollado, denominado T.O.A. (Traje Ortésico Avanzado), constituye un dispositivo mecatrónico orientado a brindar soporte, asistencia y rehabilitación a usuarios con afecciones motoras en los miembros inferiores. Este prototipo parte de una reinterpretación funcional y estética de diseños previos, integrando principios actuales de automatización, control robótico y ergonomía. La estructura está construida mediante un núcleo de madera reforzado con armazones de PLA, buscando un equilibrio entre estabilidad estructural y bajo costo de fabricación. Esta selección responde a la necesidad de generar soluciones accesibles para entornos de salud pública de tercer nivel, donde los dispositivos comerciales suelen estar fuera del alcance presupuestal. Se privilegia así la funcionalidad sin sacrificar viabilidad económica.

El enfoque de diseño responde a una filosofía híbrida, combinando funcionalidades de los tres tipos principales de exoesqueletos para miembros inferiores: rehabilitación de la marcha, asistencia funcional y aumento de fuerza. Esto permite su aplicación en contextos terapéuticos y en tareas que requieren soporte ortésico continuo, adaptándose a las necesidades del usuario.

### Selección de materiales

Con base en los principios establecidos en el diseño general, se procedió a seleccionar los materiales y componentes que formarían parte del prototipo. Esta etapa implicó una evaluación técnica considerando criterios como resistencia mecánica, bajo peso, facilidad de manufactura, costo, compatibilidad con procesos de fabricación aditiva y capacidad de integración con sistemas de control.

Durante la etapa de prototipo se utilizó madera como base estructural, debido a su alta disponibilidad, facilidad de manipulación y bajo costo. Aunque no es

común en órtesis finales, resulta adecuada para validar conceptos mecánicos durante fases preliminares de diseño. Complementariamente, se empleó ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable utilizado en impresión 3D, para la fabricación de uniones, soportes y alojamientos. El PLA presenta buenas propiedades mecánicas y alta fidelidad dimensional, facilitando la integración rápida de diseños complejos sin recurrir a procesos industriales.

Se integraron dos rodamientos de bolas (baleros) en las articulaciones, seleccionados por su capacidad de reducir fricción y distribuir cargas, mejorando la eficiencia cinemática del conjunto. Para el accionamiento activo se utilizaron dos actuadores eléctricos lineales, capaces de convertir movimiento rotativo en desplazamiento lineal con suficiente fuerza para asistir la articulación de la rodilla. También se emplearon motores DC de 12 V y 20 RPM, acoplados a engranajes planetarios diseñados específicamente para el proyecto e impresos en PLA.

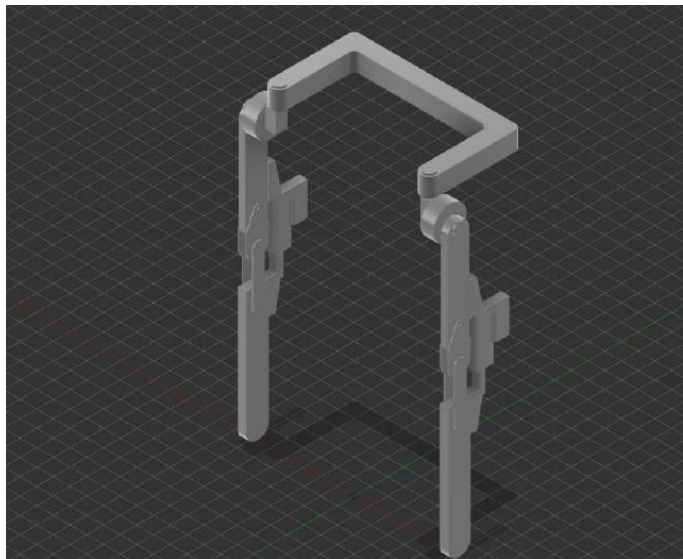
### Sistema de control y adquisición

El sistema se controla mediante una plataforma Arduino UNO R3, suficiente para lectura de sensores, generación de señales PWM y ejecución de rutinas básicas. Dos drivers L298 permiten el control bidireccional de los motores DC. La detección de intención de movimiento se logró con sensores electromiográficos (EMG) comerciales, capaces de adquirir señales musculares de superficie, procesarlas e integrarlas en esquemas de control bio-inspirado. Adicionalmente, Se utilizó una faja elástica ergonómica para mantener alineado el sistema al torso, tirantes y un cinturón de Kevlar para fijar la estructura a las piernas. Estos materiales fueron elegidos por su resistencia, bajo peso y flexibilidad.

### Modelado CAD del sistema

El modelo tridimensional del sistema (Figura 1, 2) fue desarrollado en software de diseño asistido por computadora (CAD), considerando un enfoque modular para facilitar tanto su impresión como su montaje. El diseño contempla una estructura femoral y tibial conectadas mediante un eje rotacional, con alojamientos específicos para motores, transmisiones y sensores. Las

uniones mecánicas fueron diseñadas para garantizar rigidez estructural sin comprometer la movilidad.

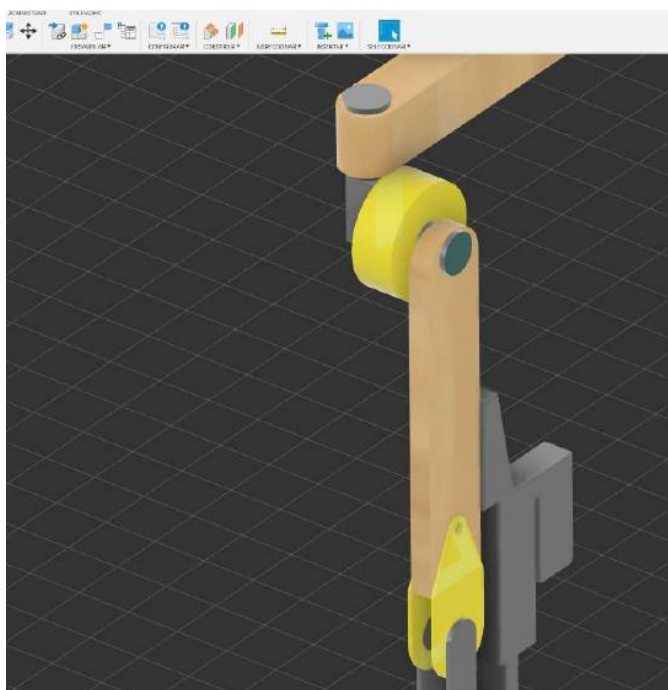


**Figura 1.** Vista isométrica del modelo CAD completo del T.O.A., mostrando la configuración general del sistema estructural y sus articulaciones.

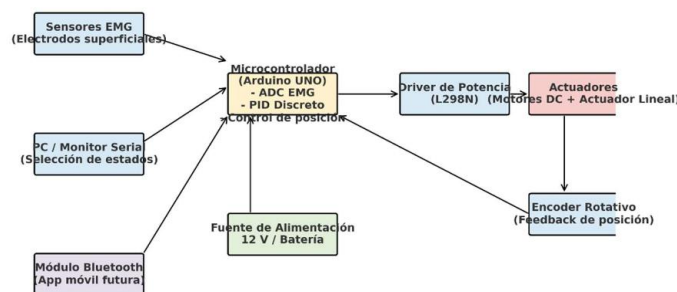
se integran mecánicamente mediante alojamientos personalizados diseñados en CAD y fabricados en PLA. Estos mecanismos están dispuestos de forma alineada al eje articular, permitiendo la transmisión de torque sin desvíos significativos ni pérdidas mecánicas apreciables. El diseño CAD fue optimizado para fabricación mediante impresión 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida), lo que implicó segmentar algunas piezas mayores y diseñar unions mecánicas tipo enclavamiento (dovetail) o ajuste por pernos. Las tolerancias se ajustaron a las limitaciones de impresión del PLA, considerando contracciones térmicas y posibles rebabas de material.

### Arquitectura general del sistema

El sistema electrónico fue concebido bajo una arquitectura distribuida en arduino (Figura 3), el cual es ampliamente utilizado (Guzmán-Fernández et al., 2021), en la cual un microcontrolador central coordina la lectura de sensores y el control de los actuadores a través de subsistemas conectados por buses de señal. Esta estructura permite una expansión modular, facilitando la incorporación de nuevos sensores o funciones sin rediseñar completamente la placa base.



**Figura 2.** Vista lateral del diseño CAD, con detalle del actuador lineal integrado en la estructura y su orientación respecto al eje de flexión de la rodilla.



**Figura 3.** Diagrama de bloques del sistema electrónico del T.O.A., mostrando la Interacción entre el microcontrolador, sensores EMG, drivers de potencia, actuadores y Fuente de alimentación

### Selección del microcontrolador

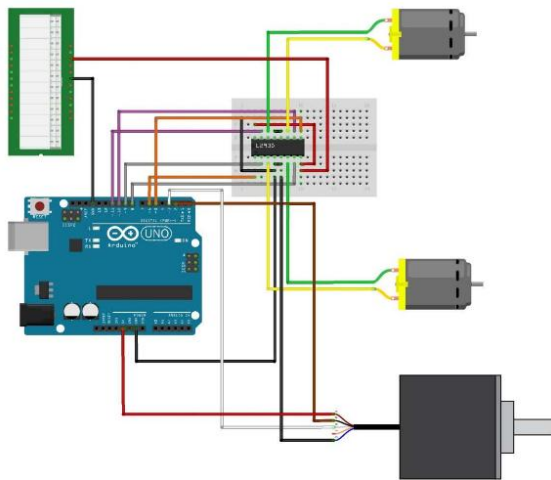
Se utilizó una placa Arduino UNO R3, basada en el microcontrolador ATmega328P, seleccionada por su facilidad de programación, amplia documentación y número suficiente de pines digitales y analógicos para las necesidades del prototipo. Esta plataforma también permite una integración directa con módulos como sensores EMG y drivers de motores sin requerir interfaces

El sistema de actuación incluye motores DC acoplados (Figura 2) a engranajes planetarios, los cuales

complejas. Las principales ventajas de esta selección fueron: (1) Compatibilidad con sensores analógicos (EMG) y señales PWM para control de motores. (2) Bajo consumo energético y alimentación sencilla mediante fuente de 12V. (3) Entorno de desarrollo accesible y flexible (Arduino IDE).

### Conexiones eléctricas y distribución de señales

El diseño del cableado (Figura 4) se realizó siguiendo principios de orden y protección eléctrica. Las señales analógicas provenientes de los sensores EMG fueron conectadas a los pines A0 y A1 del Arduino, mientras que las señales de salida PWM para los motores se asignaron a los pines digitales D9 y D10.



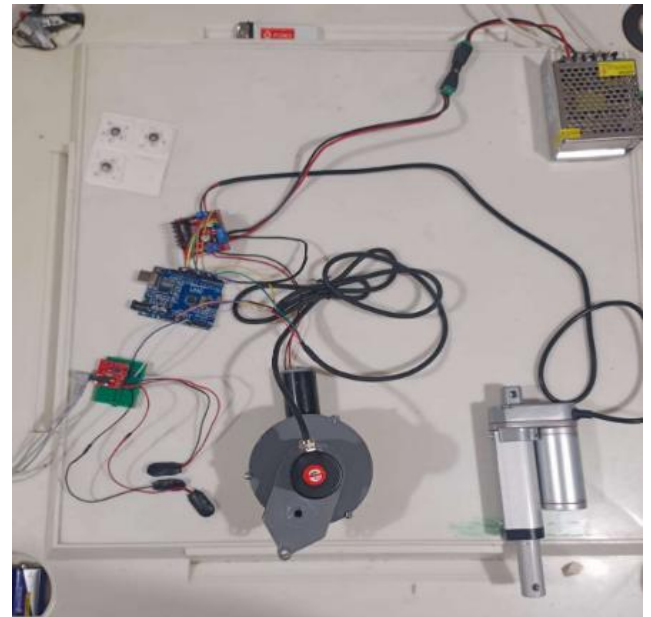
**Figura 4.** Esquema eléctrico simplificado del sistema, incluyendo conexiones entre Arduino, sensores EMG, drivers L298 y actuadores.

Los actuadores DC fueron controlados mediante dos módulos L298N, los cuales permiten el control bidireccional (hacia adelante y reversa) de motores de corriente directa. Además, se incorpora la protección térmica y contra sobre corrientes. Cada driver se conecta a un motor mediante un par de salidas H-Bridge, y recibe las señales PWM desde el Arduino para regular velocidad y dirección.

### Placas y montaje electrónico

Todos los componentes fueron montados sobre una base de acrílico aislante, ubicada en la parte trasera del exoesqueleto, a fin de mantenerlos protegidos y accesibles para mantenimiento. Se utilizaron zócalos para los

módulos electrónicos, permitiendo su reemplazo sin necesidad de soldadura. Para el prototipo se emplearon placas de pruebas tipo protoboard, pero se dejó planificado el diseño de un PCB personalizado en etapas futuras, con rutas optimizadas y reducción de tamaño (Figura 5).



**Figura 5.** Fotografía del montaje electrónico del prototipo, mostrando la distribución de placas y cableado.

Durante el diseño se consideraron aspectos de protección eléctrica para garantizar la seguridad del usuario: Se incluyó un interruptor general para corte de energía rápida. Todos los módulos están alimentados por una fuente regulada y aislada del cuerpo del usuario. Se aseguraron todos los cables con canaletas, termofit y amarres para evitar tirones accidentales.

### Algoritmo de Control

El algoritmo de control fue desarrollado íntegramente en el entorno Arduino, sin uso de librerías externas, permitiendo una programación personalizada y adaptada a las necesidades del proyecto. El núcleo del algoritmo es el controlador PID, que opera a partir de una señal de referencia de posición, definida inicialmente de forma manual desde el puerto serial para pruebas y calibración.

Posteriormente, esta señal fue sustituida por valores dinámicos derivados de la activación muscular (EMG), mapeando el nivel de contracción a un ángulo

objetivo de rotación para el motor. La estructura del algoritmo incluye: Lectura de la posición actual mediante el encoder rotativo. Cálculo del error entre la posición deseada y la real. Aplicación de la ecuación en diferencias del controlador PID. Generación de señal PWM hacia los drivers L298 para accionar los motores DC en una u otra dirección. Limitación de movimiento entre  $-20^\circ$  y  $40^\circ$ , simulando el ciclo de marcha. Mapeo del valor EMG a posiciones angulares deseadas, adaptando el movimiento a la intención del usuario.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fabricación del prototipo del T.O.A. (biotraje ortésico avanzado) se llevó a cabo siguiendo los lineamientos estructurales definidos en la fase de diseño. La estructura principal del exoesqueleto se construyó utilizando madera como núcleo, representando los segmentos correspondientes a la pelvis, fémur y tibia. Este material fue seleccionado por su disponibilidad, bajo costo, facilidad de mecanizado y adecuada resistencia para una etapa de validación prototípica (Figura 6).



**Figura 6.** Ensamble del T.O.A., mostrando estructura que simula la pelvis y las extremidades inferiores.

Cada componente fue fijado mediante tornillos de 1/4 de pulgada, los cuales garantizan una conexión segura y desmontable. La disposición de estos elementos permitió

el armado de una pierna completa (fémur y tibia) por cada lado del cuerpo, alineando las piezas de PLA con los elementos de madera en un sistema modular. El sistema planetario, ubicado distalmente en los motores DC, permite generar el movimiento pendular necesario para simular la oscilación de la marcha hacia adelante y hacia atrás. Este conjunto fue diseñado para trabajar en conjunto con el sistema de control, otorgando estabilidad y precisión durante las fases del ciclo de marcha asistida. Esta configuración permite una reproducción eficiente del patrón de marcha, replicando el movimiento natural de la pierna durante la fase de impulso y extensión.

Para el resultado final del prototipo, el sistema operó en modalidad de cordón umbilical, es decir, mediante una fuente externa de 12 V DC conectada a la red eléctrica. Para mejorar la seguridad del usuario, se integró un interruptor de encendido/apagado accesible, que permitiera desactivar rápidamente el sistema en caso de emergencia o malfuncionamiento.

## Programación y puesta en marcha

La programación del sistema central del T.O.A. (biotraje Ortésico Avanzado) está basado en la metodología estructurada de diseño previo de una Máquina de Estados Finita (FSM, por sus siglas en inglés). Esta fue primero planteada manualmente, permitiendo visualizar los distintos modos operativos del sistema, sus condiciones de transición y las limitaciones impuestas por el hardware disponible. Durante el proceso de puesta en marcha, se realizaron pruebas individuales para cada componente. En primer lugar, se programaron rutinas específicas para los actuadores lineales, evaluando su comportamiento bajo diferentes patrones de activación. Posteriormente, se integró el sensor electromiográfico (EMG), sincronizándolo con los motores para validar su respuesta a la contracción muscular. Finalmente, se ensambló el código principal, el cual integró la lógica de la FSM y coordinó todos los elementos del sistema: sensores, actuadores, motores y señales de control.

La máquina de estados finitos (Figura 7) contempla cuatro estados principales, los cuales se seleccionan mediante la interfaz serial de la computadora. Aunque se prevé migrar esta funcionalidad a una aplicación móvil vía Bluetooth, se optó por la comunicación por cable durante las primeras pruebas, para

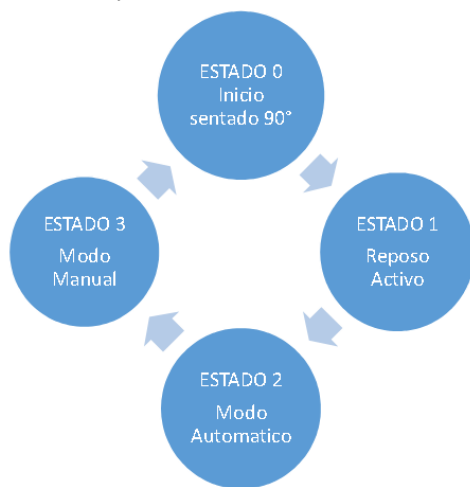
evitar pérdidas de señal y garantizar la precisión del sistema.

**Estado 0 – Inicial/Sentado:** Corresponde al punto de partida del sistema. El fémur se encuentra a 90° y los actuadores completamente retraídos, emulando la posición de estar sentado. Esta configuración facilita la colocación del exoesqueleto en el usuario sin riesgos de movimiento inesperado.

**Estado 1 – Levantamiento/Reposo activo:** Este estado asiste al usuario en la acción de levantarse, posicionando al exoesqueleto en modo bipedestación. Dado que el T.O.A. es una órtesis de asistencia parcial, se recomienda que esta transición sea supervisada por un profesional ortopedista o fisioterapeuta, especialmente durante las primeras fases de la rehabilitación.

**Estado 2 – Modo Automático (Entrenamiento):** En este estado, el sistema ejecuta de forma autónoma una rutina de marcha previamente programada. La finalidad es fomentar la memoria muscular del paciente, permitiéndole familiarizarse con el patrón de movimiento. Esta rutina fue desarrollada en conjunto con especialistas médicos.

**Estado 3 – Modo Manual (Asistencia activa):** Este estado es accesible únicamente bajo autorización de un especialista. Una vez alcanzado un nivel funcional adecuado, el usuario toma control activo del sistema a través de Señales EMG. Esta fase representa el desprendimiento progresivo del soporte ortésico, permitiendo que el usuario fortalezca sus capacidades motoras naturales y retome la marcha de forma autónoma.



**Figura 7.** Diagrama de Máquina de Estados Finita EXO (FSM EXO).

La evaluación funcional del prototipo T.O.A. se realizó mediante una serie de Pruebas controladas, tanto en banco como en usuario simulado. Se validó la capacidad del sistema para asistir la marcha humana replicando los movimientos articulares previstos, con especial atención en la articulación de la rodilla. Durante las pruebas se verificó la correcta interacción entre los actuadores eléctricos, sensores EMG y el sistema de control, comprobando que el exoesqueleto respondiera adecuadamente a las señales mioeléctricas.

### Respuesta del sistema

El sistema mostró una respuesta consistente y en tiempo real a las señales de activación muscular. La sincronización entre la detección de la intención de movimiento y la acción mecánica fue evaluada mediante la observación directa y registros de datos, destacando un retardo promedio entre la activación EMG y la acción motora inferior a 200 ms, acorde con los objetivos planteados. Esta respuesta permitió al usuario iniciar y mantener el patrón de marcha con asistencia del dispositivo, logrando transiciones suaves y sin interrupciones abruptas.

### Precisión y tiempo de reacción del control mioeléctrico

El algoritmo de control implementado, basado en un controlador PID con ajuste mediante el método de Ziegler-Nichols y ecuaciones en diferencias, permitió controlar la posición angular de los motores DC con un margen de error inferior a 0.5°. La integración del encoder rotativo de alta resolución resultó fundamental para lograr esta precisión. El tiempo de reacción del sistema, medido desde la detección de la señal EMG hasta la respuesta motora, fue satisfactorio para aplicaciones en rehabilitación, confirmando la viabilidad del sistema para asistir movimientos dinámicos y coordinados.

### Comparación con estándares o sistemas similares

En comparación con exoesqueletos comerciales y sistemas reportados en la literatura, el prototipo T.O.A. ofrece una solución accesible y modular, con un enfoque en la integración de materiales económicos y tecnología abierta. Si bien su rendimiento en términos de torque y precisión es menor que dispositivos industriales

avanzados, cumple con los requerimientos básicos para rehabilitación funcional. Las pruebas mostraron que la latencia y precisión se encuentran dentro de rangos aceptables para este tipo de aplicaciones, lo que posiciona al T.O.A. como una alternativa viable para entornos con limitaciones presupuestales.

### Limitaciones

Durante el desarrollo y evaluación se identificaron las siguientes limitaciones: (1) Dependencia de una fuente de alimentación externa (modo “cordón umbilical”), limitando la movilidad autónoma del usuario. (2) Necesidad de ajustes finos en la sensibilidad del sensor EMG comercial para distintos usuarios, aunque menor para pacientes comunes, requiere atención en escenarios clínicos diversos. No fue necesario implementar ningún tipo de filtro ya que se optó por el uso de un componente comercial, por lo que ya cuenta con una caracterización o funcionamiento preestablecido por el fabricante, por lo que también puede influir en algunas variaciones que realmente no son relevantes para el funcionamiento de este prototipo. (3) Limitaciones mecánicas derivadas del uso de materiales accesibles, como la madera y PLA, que restringen la durabilidad y robustez en usos prolongados. (4) La ausencia de un sistema inalámbrico definitivo para la comunicación, relegando el control a la interfaz por computadora mediante conexión serial. Estas limitaciones marcan áreas claras para futuras mejoras y desarrollo.

Los resultados obtenidos demuestran que el diseño y desarrollo del T.O.A. cumplen con los objetivos iniciales, logrando un prototipo funcional capaz de asistir la marcha a través de control mioeléctrico y actuadores eléctricos con alta precisión. La respuesta dinámica y sincronía con la intención de movimiento evidencian un adecuado diseño del sistema de control y adquisición de señales EMG. Sin embargo, la integración limitada de movilidad autónoma y aspectos ergonómicos deberá ser abordada en etapas posteriores para consolidar un producto competitivo y clínicamente viable. La versatilidad y el bajo costo del prototipo representan una contribución importante para la democratización de tecnologías de asistencia robótica en contextos con recursos limitados, alineándose con la filosofía de accesibilidad planteada desde el inicio del proyecto.

Finalmente, los resultados sugieren que, con ajustes y mejoras en hardware y software, el T.O.A. podría servir como base para futuros desarrollos en rehabilitación y asistencia motora. Los resultados expuestos permiten concluir que el exoesqueleto T.O.A. cumple con su propósito funcional: asistir de manera precisa y segura la marcha del usuario a partir de señales mioeléctricas, mediante un sistema de control robusto y adaptable. Si bien se identificaron limitaciones propias del estado de prototipo, la arquitectura modular, la implementación de control PID optimizado y el uso de materiales accesibles demuestran el potencial del T.O.A. para escalar hacia soluciones de mayor impacto clínico. La integración de conceptos como diseño centrado en el usuario, adaptabilidad y control bio-inspirado confirman que el desarrollo de tecnologías asistidas no está reservado exclusivamente a grandes laboratorios o industrias, sino que también puede surgir de la innovación académica aplicada. Este trabajo representa un paso firme hacia esa dirección.

### CONCLUSIÓN

El desarrollo del prototipo T.O.A. (Traje Ortésico Avanzado) representó un esfuerzo integral por diseñar, construir y validar una órtesis robótica accesible, funcional y adaptativa, orientada a usuarios con afectaciones motoras en miembros inferiores. En este trabajo se presentó un dispositivo que, mediante la combinación de técnicas de control electromiográfico, estructuras híbridas impresas y un sistema mecatrónico inteligente, demuestra la viabilidad de generar soluciones tecnológicas de asistencia con bajo costo y alto impacto. La elección de materiales accesibles como la madera y el PLA, la implementación de sistemas de control PID con alta precisión angular, y la integración de sensores EMG, permitió comprobar la funcionalidad del prototipo a nivel experimental. El sistema respondió adecuadamente a las señales mioeléctricas del usuario, traduciéndolas en movimientos de asistencia que replican la marcha humana de forma simétrica, segura y adaptable.

Asimismo, el enfoque modular del diseño, la filosofía híbrida de control y la estética reflexiva del exoesqueleto brindan no solo una herramienta rehabilitadora, sino también una plataforma de exploración futura en campos como la ortopedia robótica, la cibernética asistencial y la

interacción humano-máquina.

El T.O.A. no solo cumple una función prototípica, sino que constituye una base sólida para futuras aplicaciones clínicas. Su modularidad, capacidad de adaptación a diferentes usuarios y respuesta a señales mioeléctricas lo proyectan como una solución viable en:

(1) Programas de rehabilitación neuromuscular, donde el paciente requiere asistencia parcial durante fases específicas de la marcha. (2) Clínicas de fisioterapia, como herramienta de entrenamiento muscular pasivo-activo, con posibilidad de registrar progresos. (3) Ámbitos de inclusión y accesibilidad, donde usuarios con lesiones medulares incompletas o debilidad muscular podrían beneficiarse de una órtesis inteligente. En conclusión, el T.O.A. representa una propuesta innovadora en el campo de las órtesis robóticas, combinando inteligencia artificial, control adaptable y diseño económico. A través de mejoras futuras, su escalamiento a escenarios clínicos reales es altamente probable, aportando soluciones concretas a necesidades médicas urgentes con una visión tecnológica humanista.

## REFERENCIAS

Albornoz, X., Flores, J., Guamán, J., Malla, L., Zhindón, R. y Mola, E. (2019). Órtesis robótica para rehabilitación bilateral de mano izquierda para pacientes con hemiplejía. *Revista Investigación, Tecnología y Ciencia*. ISSN 1909-5775. pp 11-15.

Ayala-Lozano, J., Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Angeles, B., Torres-San Miguel, C., Aguilar-Pérez, L. y Urriolagoitia-Calderón, G. (2015). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 1(17). pp. 79-90. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.44188>

Barrera Sánchez, A., Azcaray Rivera, H., Blanco Ortega, A., Campos Amezcua, R., Abúndez Pliego, R. y Godoy, J. (2024). Simulación de un prototipo virtual de órtesis robótica para rodilla. *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*. Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925. 7(4): <https://doi.org/10.37636/recit.v7n4e374>

Bautista Bautista, I., Mondragón Medina, J. y Chávez Mora, O. (2024). Diseño de un Sistema de Adquisición de Datos

y su Interfaz Gráfica para Monitorear un Dispositivo Servo Actuado. Publicación semestral, Vol. 10, No. pp. 18-23. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/investigium/issue/archive>

Castillo González, S., Pulido Talero, W. y Castañeda Jerez, C. (2022). Diseño e impresión 3D de órtesis para tratamiento de ligamento cruzado posterior/anterior como herramienta de aplicación en la industria 4.0. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*. ISSN 1794-4953. <https://doi.org/10.18041/17944953/avances.2.8547>

De Luca, C. J. (2006). Electromyography. *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*. <https://doi.org/10.1002/0471732877.emd036>

Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 144–158. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453>

Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Bionic limbs: clinical reality and academic promises. *Science Translational Medicine*, 6(257), 257ps12. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3008930>

Fajardo Zapata, A. (2015). Trastornos osteomusculares en auxiliares de enfermería en la unidad de cuidados intensivos. *Cienc Trab.* 17(53). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492015000200009>

García Cabezas, E. F. (2018). Sistema de rehabilitación de codo basado en una órtesis robótica controlada por una interfaz gráfica desarrollada en Python. *3C TIC: Cuadernos de desarrollo aplicadas a las TIC*. 7(2), 104-123. <http://dx.doi.org/10.17993/3ctic.2018.60.104-123>

García Ríos, N., Sánchez Moriones, D. y Montoya Hurtado, O. (2015). Estrategias de intervención de fisioterapia en neurorehabilitación utilizadas en Colombia: revisión bibliográfica. *Revista Movimiento Científico*. 9(1): 60-66. ISSN: 2011-7191. <https://revmovimientocientifico.iber.edu.co/article/view/857>

Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J. (2021). Arduino: a Novel Solution to the Problem of High cost Experimental Equipment in

- Higher Education. *Experimental Techniques*. 46(4).  
<https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>
- Iravani Rad, M., Mokhtarian, A., Taghi Karimi, M. (2018). Design and Fabrication of an Active Knee Orthosis for Rehabilitation of Lower Limbs. 6(3). *Journal of Rehabilitation Sciences and Research*.  
[https://jrsl.sums.ac.ir/article\\_44855\\_21a11f92f9628ffde1cfc5539d6059bb.pdf](https://jrsl.sums.ac.ir/article_44855_21a11f92f9628ffde1cfc5539d6059bb.pdf)
- Lelis, C., Brazil Battaus, M., Taubert de Freitas, F., Rossi Rocha, F., Palucci Marziale, M. y Carmo Cruz Robazzi, M. (2012). Distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho em profissionais de enfermagem: revisão integrativa da literatura. *Artigos de Revisão • Acta paul. enferm.* 25 (3).  
<https://www.scielo.br/j/ape/a/8xhyfp9zL73LfMKN5cKSLgj/?format=html&lang=pt>
- López, R., Aguilara, H., Salazar, S., Lozano, R. y Torres, J. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 11. pp. 304–314.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.008>
- Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-20>
- Quinzaños Fresnedo, J., Sahagún Olmos, R., León Hernández, S., Pérez Zavala, R., Quiñones Uriostegui, I., Solano Salazar, C., Cruz Lira, R. y Tinajero Santana, M. (2015). Efectos a corto plazo del entrenamiento de la marcha en una órtesis robótica (Lokomat®) con retroalimentación auditiva en pacientes con lesión medular incompleta crónica. *Rehabilitación*. 49(1), 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2014.10.002>
- Solbeygen Agudelo, L., Nieto, M., Montero, J. y Montoya, L. (2015). Referentes teóricos de fisioterapia en neurorrehabilitación, una revisión sistemática exploratoria. *Revista Movimiento Científico*. 9(1): 67-72. ISSN: 2011-7191.  
<https://revmovimientocientifico.ibero.edu.co/article/view/858>

# Señal Fisieléctrica de semillas *Lens culinaris* en germinación con sustrato de hidrogel y agujas hipodérmicas como electrodos

## Physioelectric signal of germinating *Lens culinaris* seeds with hydrogel substrate and hypodermic needles as electrodes

Fuentes Martínez, L.<sup>1</sup>, García Duran, A.<sup>2</sup>, Esquivel Felix, R.<sup>3\*</sup>, Rodríguez Abdala, V.<sup>4</sup>, Gómez Rodríguez, J.<sup>4</sup>, Bañuelos García, L.<sup>3</sup>, Cleva, M.<sup>5</sup>, Liska, D.<sup>5</sup>, Valdez Valdez, E.<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ingeniería en Innovación Tecnológica, Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, Centro Histórico, 98000. Zac.

<sup>2</sup>Doctor en Ingeniería en Innovación Tecnológica Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, Centro Histórico, 98000. Zac.

<sup>3</sup>Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Tecnológica del Estado de Zacateca, Carr. Zacatecas - Cd Cuauhtémoc Km 5 Ejido, Cieneguitas, Zac

<sup>4</sup>Posgrado en Ingeniería en Innovación Tecnológica Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, Centro Histórico, 98000. Zac.

<sup>5</sup>Facultad Regional Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional Formación en Tecnología, Resistencia 1900, Argentina

<sup>6</sup>Tecnológico Nacional de México, ITS Fresnillo, Tecnológico #16, Solidaridad, 99010 Fresnillo, Zac. Mexico

<sup>7</sup>Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, Centro Histórico, 98000. Zac.

\*Autor de Correspondencia: [resquivel@utzac.edu.mx](mailto:resquivel@utzac.edu.mx)

Recibido: 28 de enero 2025

Aceptado: 4 de agosto 2025

### Resumen

En la actualidad garantizar la seguridad alimentaria es un reto compartido entre instituciones e investigadores especialmente desde el ámbito académico, en este sentido la experimentación en la agricultura moderna busca nuevas formas de incrementar la producción de alimentos nutritivos, mediante técnicas de cultivo sustentables que produzcan frutos sanos sosteniblemente, y con ello reducir efectos nocivos aún inherentes a la producción industrial agrícola tradicional que impactan negativamente en las personas y el medio ambiente. En este sentido, la etapa de germinación en semillas es crucial para el desarrollo de las plantas, por un lado, se pueden potenciar las condiciones óptimas para una producción de plántulas fuertes con vigor y resistencia o, por otro lado, puede comprometerse el desarrollo fisiológico óptimo o incluso perder semillas en condiciones de mejoramiento genético. Desde esta perspectiva se han desarrollado métodos enfocados en mediciones que buscan potenciar la producción tratando de reducir el uso de agroquímicos, como son la caracterización de señales eléctricas. Este estudio busca lograr caracterizar la señal eléctrica de las fases en transformaciones físicas de muestras de semillas *lens culinaris* durante la etapa de germinación, tratando de identificar la señal asociada a la fase de imbibición, y principalmente del nacimiento de la redícula epigea, mediante el muestreo simultáneo en tiempo real del voltaje por periodo de tiempo utilizando un osciloscopio, seguimiento visual remoto y gráfico así como procesamiento computacional de datos para lograr caracterizar la respuesta correspondientes a cada fase en las muestras de semillas. Para poder obtener estos datos fue necesario establecer el uso de semillas abundantes y con alta germinación durante cortos periodos de tiempo. También se diseñó el sistema de medición que pudiera procesar los datos mediante electrodos de bajo costo (agujas hipodérmicas). Entre los resultados preliminares se destaca que las semillas presentan una actividad eléctrica baja en periodo de imbibición pero que puede ser percibida mediante un análisis de frecuencia, también se observan picos gráficos asociados a las transformaciones clave como el surgimiento de la redícula. Por ello, se puede establecer a mediano plazo que este estudio aportara en comprender mejor como es que se relacionan esta actividad eléctrica con los cambios fisiológicos y las señales gráficas que caracterizan a cada fase en la etapa germinativa de semillas, y a largo plazo el efecto que pueden tener estas características en otras etapas del proceso de producción de alimentos a través de mediciones fisioléctricas.

**Palabras clave:** Germinación, Semillas, lenteja, *lens culinaris*, señal fisioléctrica.

### Abstract

Today, ensuring food security is a shared challenge among institutions and researchers, especially in the academic field. In this sense, experimentation in modern agriculture seeks new ways to increase the production of nutritious foods through sustainable cultivation techniques that sustainably produce healthy fruits, thereby reducing the harmful effects still inherent in traditional industrial agricultural production that negatively impact people and the environment. In this sense, the germination stage in seeds is crucial for plant development. On the one hand, it can enhance optimal conditions for the production of strong, vigorous, and resilient seedlings. On

the other hand, it can compromise optimal physiological development or even lead to seed loss under genetic improvement conditions. From this perspective, some studies have developed methods that have yielded good results and are low-cost, such as the characterization of electrical signals associated with variables of physical effects generated in plants. This study aims to characterize the electrical signal of the phases of physical transformations in *Lens culinaris* seed samples during the germination stage. It attempts to identify the signal associated with the imbibition phase, and primarily with the emergence of the epigeal reticulum, by means of simultaneous real-time voltage sampling over time using an oscilloscope, remote visual and graphic tracking, and computational data processing to characterize the response corresponding to each phase in the seed samples. To obtain these data, it was necessary to use abundant seeds with high germination rates for short periods of time. A measurement system was also designed to process the data using affordable, low-cost electrodes (hypodermic needles). Preliminary results indicate that the seeds exhibit low electrical activity during the imbibition period, but this activity can be perceived through frequency analysis as a characteristic signal of this phase. Graphic peaks associated with key transformations such as the emergence of the reticulum are also observed. Therefore, it can be established that in the medium term, this study will contribute to a better understanding of how this electrical activity relates to the physiological changes and graphic signals that characterize each phase of seed germination, and in the long term, the effect these characteristics can have on other stages of the food production process through physioelectrical measurements.

**Keywords:** Germination, Seeds, lentil, *lens culinaris*, physioelectrical signal.

## INTRODUCCIÓN

En años recientes, se están realizando investigaciones acerca de la actividad eléctrica en las plantas, incluso se han logrado avances significativos llegando a caracterizar la respuesta eléctrica en hojas, tallos y raíces ante estímulos externos, resaltando la velocidad a la que viajan largas distancias dentro del organismo [1], incluso más rápidamente que las señales químicas. Estas señales fisioeléctricas son de gran importancia y pueden ayudar a comprender procesos relevantes dentro en los organismos [2]. Algunos estudios documentan la importancia de señales eléctrica en transformaciones fisiológicas de las plantas especialmente la fotosíntesis, que es la base de varios organismos transformando energía lumínica en energía química [3], o la germinación que transforma energía almacenada en embriones para desarrollar nuevas plántulas [4]. En esta etapa inicial, es importante para este estudio, monitorear el desarrollo de la semilla durante cada fase de desarrollo germinativo para medir la actividad eléctrica al transformarse en la plántula y saber cómo influyen las condiciones ambientales de temperatura, luz y humedad en las muestras. Algunos de los resultados obtenidos demuestran que medir la respuesta eléctrica directamente en las plantas en tiempo real puede ser muy útil para anticipar acciones que intervengan en fases fisiológicas clave, y esto podría utilizarse para evitar que las plantas alcancen condiciones extremas de estrés que afecten el desarrollo de sus frutos[5]. Esto es muy útil en

la automatización de la agricultura especialmente en etapas cruciales germinativas como la eclosión durante el surgimiento de la retícula que es la fase de inicio para el desarrollo de las plántulas.








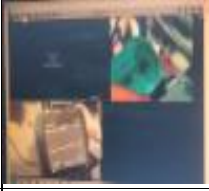


En investigaciones similares relacionadas a la agricultura de precisión, se utilizan tecnología y software libre aplicado en plantas [6], que en relación con el internet de las cosas (IoT) aplicado a diferentes cultivos en Agricultura [7], conforman estudios que permiten el desarrollo de computadoras personales de alimentos para la investigación de medicamentos y biomedicina [8], a través de caracterizar señales eléctricas y su importancia fisiológica en las plantas [9]. En el presente estudio podemos verificar el voltaje durante las transformaciones en fases cruciales de la etapa germinativa que pueden ayudar a comprender la correlación entre factores de desarrollo fisiológico y señal eléctrica. y pueden ser potencialmente útiles para encender dispositivos de Agricultura de Precisión en embriones de semillas para diversos cultivos [10]. Se busca comprobar que cuando se rompe el periodo de letargo, la respuesta eléctrica que generan las semillas de lenteja puede aumentar notablemente e igualmente esta actividad eléctrica se incrementa cuando eclosiona y emerge la retícula, lo que permite buscar pulsos tratando de encontrar ciclos en el tiempo [11].

**MATERIALES Y MÉTODOS**

Los materiales utilizando en esta investigación son presentados y descritos en la Tabla 1. Además de presentar

gráficamente las características de la semilla, la cápsula de hidrogel y el arreglo experimental utilizado. En dicha tabla se realiza una descripción breve de la utilidad o uso de tal componente.

**Tabla 1.** Equipo y Materiales para el Sistema de Medición de la señal fisiológica en semillas de Lenteja

| Sistema de Medición Fisiológica |   |                               |   |    |  |  |
|---------------------------------|---|-------------------------------|---|----|--|--|
| Materiales y Descripción        |   |                               |   |    |  |  |
| 1                               |    | Semilla <i>Lens culinaris</i> | Semilla de alta germinación   | 6  |    | Osciloscopio 2C53T<br>Equipo para pruebas y medición de respuesta fisiológica                                      |
| 2                               |    | Cápsula hidrogel 17mm         | Sustrato adecuado para medición fisiológica                             | 7  |    | Cámara de video<br>Monitoreo visual en tiempo real   |
| 3                               |   | Agujas Hipodérmicas 25mm      | Funcionan como electrodos para medir la respuesta eléctrica en semillas | 8  |   | Sistema de medición de respuesta fisiológica<br>Mide la respuesta de <i>lens culinaris</i> en sustrato de hidrogel |
| 4                               |  | Modelo 3D con lupa            | Plataforma para monitoreo y observación de semilla                      | 9  |  | Sistema de monitoreo Visual<br>Monitoreo de respuesta en tiempo real   |
| 5                               |  | Osciloscopio DS1052E          | Equipo para medir frecuencia fisiológica                                | 10 |  | Recolección y procesamiento computacional de respuesta fisiológica<br>Muestreo y generación de graficas            |

**Métodos de medición de señal fisiológica en semillas de *Lens culinaris***

El método para monitorear la señal eléctrica de la planta consistió en utilizar como factor constante el mismo sistema de monitoreo con dos variantes importantes para medir muestras similares; estas variantes clave constan de dos modelos de Osciloscopios diferentes para medir señales en semillas de lenteja (*lens culinaris*) bajo la

misma configuración [12, 14]. En particular, se establecieron las variables de medición: Amplitud (A), miliVolts (mV) generados en fracciones de segundo 0.5 (t), y periodos de tiempo de 3-7 días (72-168hrs). El modelo de eclosión utilizado se muestra en la Tabla 2.

Mientras que la metodología utilizada para obtener el análisis de la respuesta electrofisiología se presenta en la Tabla 3. En donde se muestra la bitácora de análisis de la respuesta fisiológica.

**Tabla 2.** Fórmulas de modelo de eclosión y señal eléctrica

|  |     |                                   |     |
|--|-----|-----------------------------------|-----|
| $f(t) = \{1 \text{ si } t = 0 \text{ } 0 \text{ si } t \neq 0$ | (1) | $f(t) = A \sin \sin (bt + c) + d$ | (2) |
|--|-----|-----------------------------------|-----|

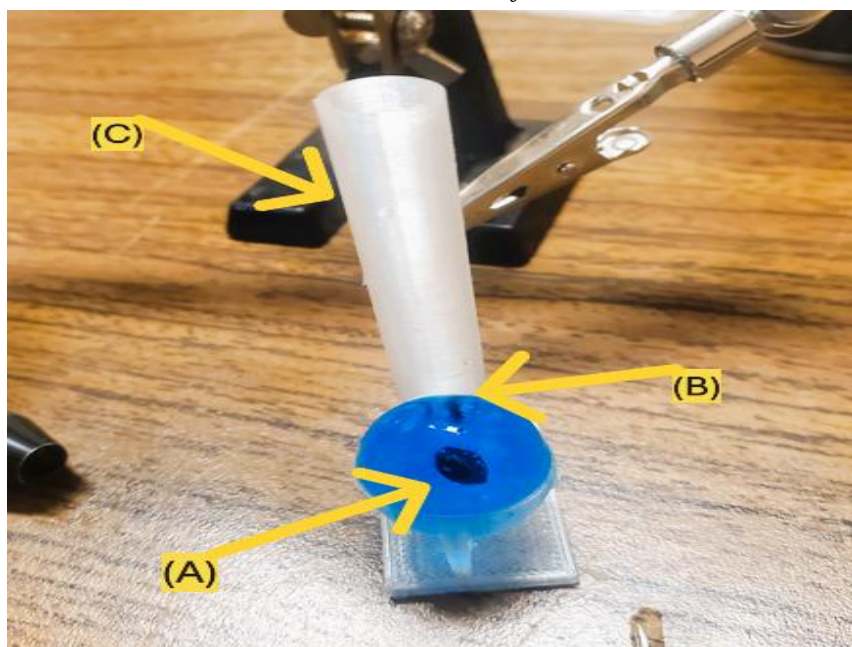
**Tabla 3.** Análisis de la respuesta electrofisiológica en semillas *lens culinaris*.

| Bitácora de Análisis Respuesta Fisieléctrica |            |  |                      |                   |
|--|------------|--|----------------------|-------------------|
| Hora   | Día        | Descripción  | Configuración        |                   |
| 18:10  | 09/04/2025 | Configuración del osciloscopio, e inserción de la semilla dentro de una esfera de hidrogel mediante una perforación, dejando un hueco para que haga contacto con el oxígeno simulado los espacios vacíos de los sustratos de tierra comunes. | Vol/div<br>10mV      | Time/div<br>500mS |
| 17:23  | 10/04/2025 | Se insertan dos agujas de 25 mm como electrodos dentro del hidrogel para tener contacto suave con las paredes de la semilla Vp-p promedio 10mV 7.07rmsV.   | Aguja<br>Hipodérmica | 25mm              |
| 15:43  | 11/04/2025 | La muestra se mantiene hidratada mediante una plataforma a medida impresa en 3D, facilitando las pruebas de estímulos eléctricos con perturbaciones mecánicas en la esfera de hidrogel con la semilla dentro.                                |                      |                   |
| 23:09  | 12/04/2025 | Se mantiene el monitoreo mediante el osciloscopio durante la eclosión de la semilla.   | 60mV                 | Eclosión          |
| 23:44  | 13/04/2025 | Aparece la retícula y mantiene variaciones de 11mV- a 51mV por cada 500mS.   |                      |                   |
|  | 14/04/2025 | Aquí se sugiere cambiar de sustrato, debido a que el hidrogel durante el 5to y 7mo día presenta una resistencia mecánica que presiona a la raíz, dificultando su crecimiento.  |                      |                   |

El sistema de medición utiliza un equipo con suministros de bajo costo, que opera conjuntamente en tiempo real para lograr detectar el cambio electrofisiológico. Además de determinar las características de la señal eléctrica de cada fase en la etapa de germinación. Antes de comenzar la medición es importante desinfectar la semilla para posteriormente activarla [13]. Para ello, se inserta en una capsula de hidrogel con una humedad mayor a 80% sobre un modelo 3D con agua diseñado como plataforma para sostener las condiciones de humedad en la capsula, esto con una

temperatura ambiente de entre 28-31°C. Mientras tanto, el osciloscopio mide la señal cada .05 segundos durante una semana [15].

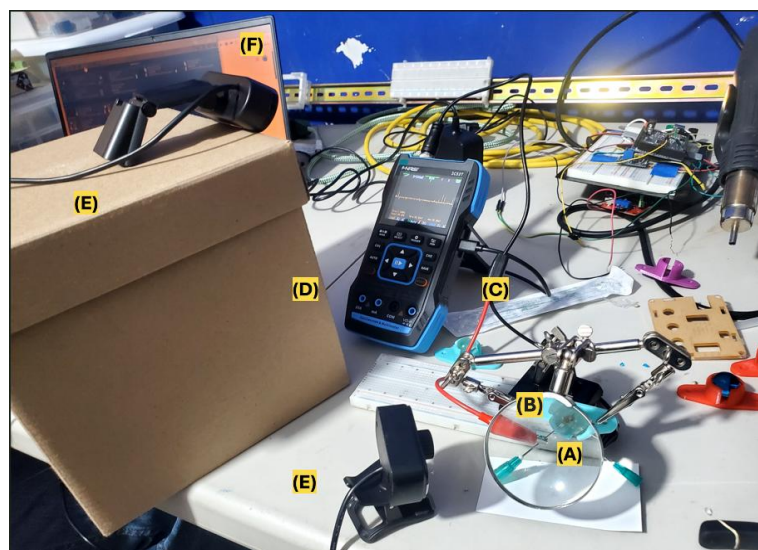
Para obtener la señal eléctrica de la *lens culinaris* se desarrolló una técnica que implica insertar la semilla en una capsula de hidrogel como sustrato sobre un modelo impreso en 3D con agua, cómo plataforma humidificadora (Figura 1).



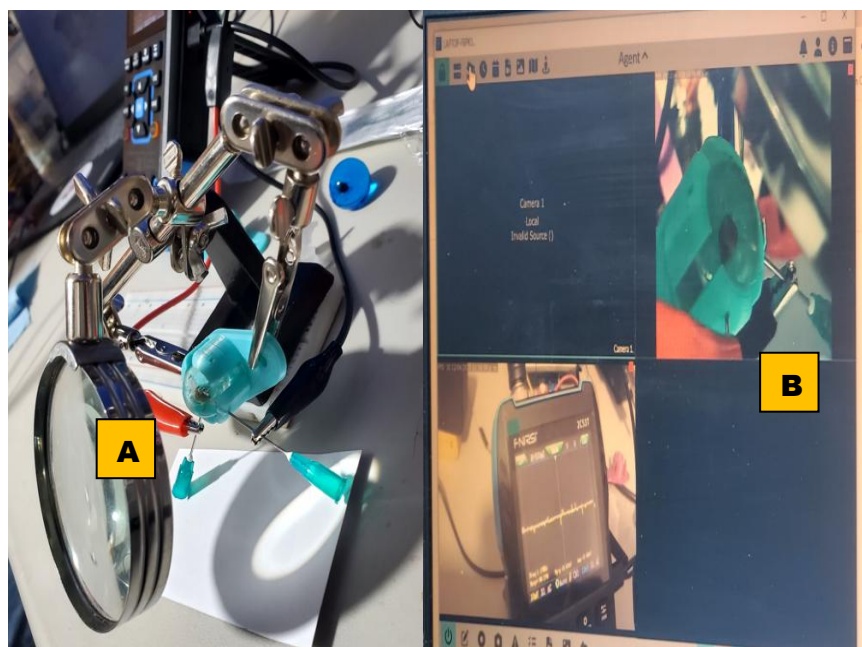
**Figura 1.** A) Semilla *Lens Culinaris*, B) Capsula Hidrogel 17 mm, C) Plataforma Humidificadora.

El monitoreo de señal fisiológica de la semilla de lenteja es a través de un sistema eléctrico de medición y seguimiento remoto (Figura 2). El sistema consiste en una muestra de semilla *lens culinaris* montada en una capsula de hidrogel de 17 mm, como sustrato y medio facilitador de transmisión de la señal eléctrica, tratando de identificar la señal generada por las transformaciones de la semilla durante cada fase de la etapa de germinativa.

La señal eléctrica se obtiene desde dos agujas hipodérmicas funcionando como electrodos, incrustados dentro de la capsula de hidrogel estando en contacto con la semilla. El monitoreo se realiza mediante la medición gráfica de la frecuencia en Osciloscopio y el monitoreo videográfico remoto (Figura 3).



**Figura 2.** Sistema eléctrico para medir la respuesta fisiológica generada por las semillas de Lenteja. A) Semilla *lens culinaris*, B) Hidrogel 17 mm, C) Electrodos D) Osciloscopio 2C53T, E) Cámara de Videograbación, E) Equipo de Cómputo.



**Figura 3.** A) Observación y medición de muestra con electrodos incrustados en hidrogel B) Monitoreo Remoto.

Tanto la observación de las transformaciones germinativas como la señal eléctrica visible gráficamente son monitoreados por el sistema de videograbación remoto, configurado para detectar y registrar cambios significativos en un sistema de cómputo que busca correlaciones entre estos registros y sus fases fisiológicas durante la etapa germinativa (Figura 4). Se utilizan dos

osciloscopios diferentes el DS1052L y el 2C53T, configurados para la detección de ondas entre 0-90 mV, en periodos de 0.5 segundos, para comparar las señales eléctricas registradas.

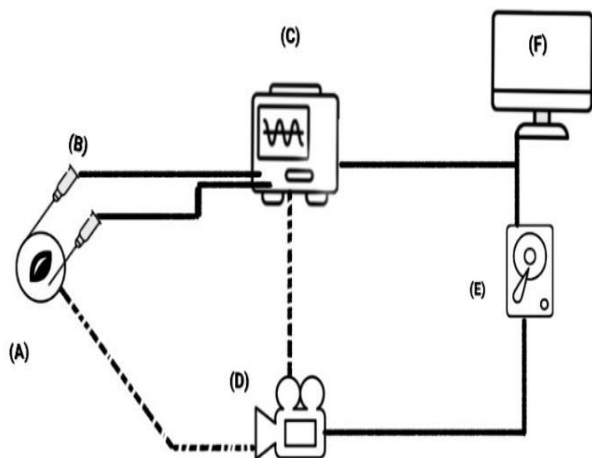


**Figura 4.** Osciloscopios DS1052 y 253T.

Para sostener los electrodos se utiliza una lupa con pinzas eléctricas que permiten ampliar la visión de la muestra para ver cambios físicos claramente al mismo tiempo que se mide la respuesta eléctrica (Figura 5).



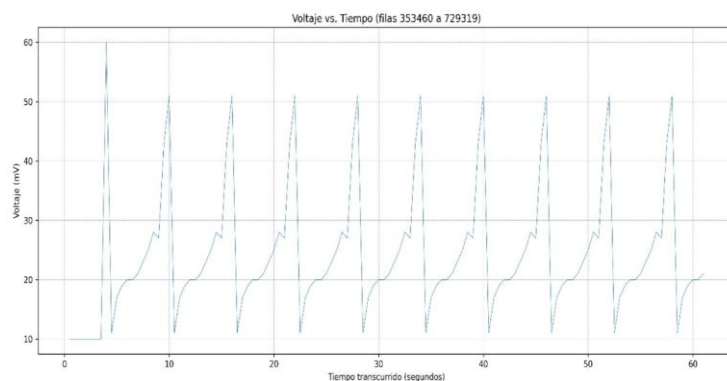
**Figura 5.** Muestra en observación.



**Figura 6.** Diagrama eléctrico para monitoreo de la frecuencia fisiológica y procesamiento de datos generados durante la germinación de la semilla. A) Muestra *lens culinaris* encapsulada en sustrato de hidrogel, B) Agujas 25 milímetros como electrodos. C) Osciloscopio, D) Videocámaras, E) Almacenamiento, F) Equipo de Computo.

El diagrama electrónico completo del sistema de monitoreo se representa en la Figura 6. Mostrando la conexión desde la muestra, pasando por electrodos, equipos de medición, grabación, almacenamiento y computo. Procesando más de 1 millón de datos en la unidad de almacenamiento para posteriormente generar las gráficas mediante software libre, enlazado a hojas de cálculo de Excel en un equipo de cómputo que permite generar las gráficas que muestran la evolución de las señales fisiológicas recolectadas desde las muestras.

Para la medición es necesario utilizar un sustrato de hidrogel que encapsule las muestras y facilite la recolección de datos, mediante electrodos tipo sondas conectados a un osciloscopio.



**Figura 7.** Señales eléctricas detectadas durante la fase de eclosión

Al llegar el momento de fase de eclosión, las señales recolectadas cada 500 milisegundos segundos en hojas de datos, se procesan computacionalmente para poder apreciar cómo se generan ciclos de 9 segundos que alcanzan picos de  $\pm 50$  mV durante el desarrollo de la retícula.

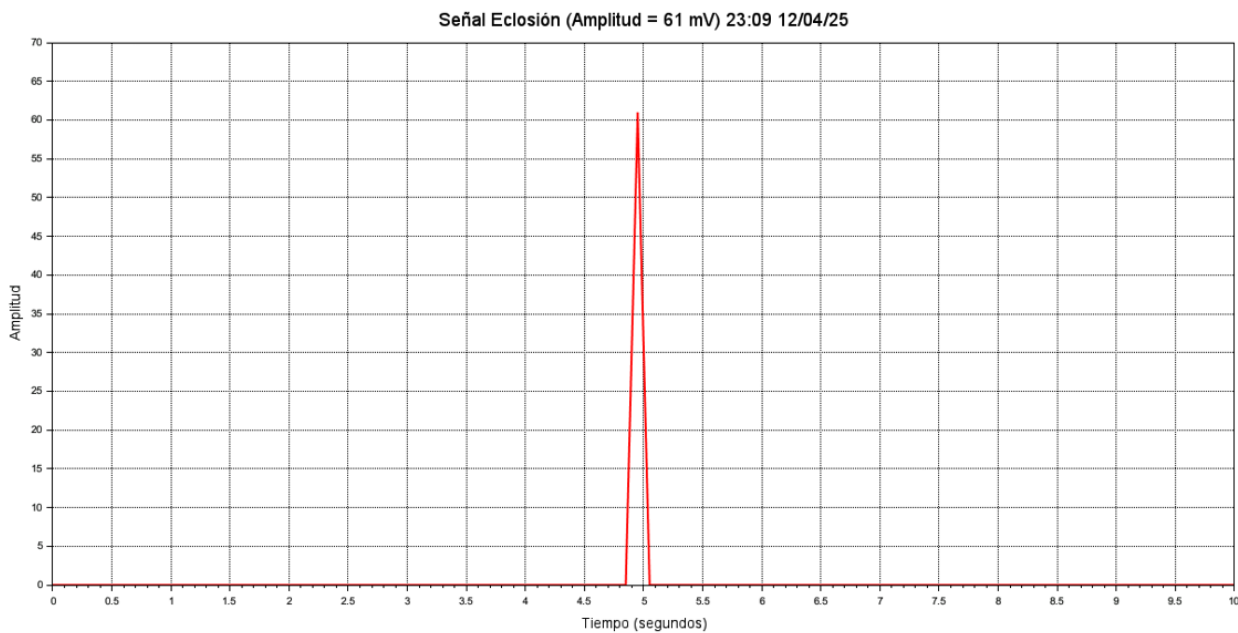
## RESULTADOS

Con base en los datos que se recabaron, se puede apreciar cómo se registraron las variables fecha, hora y voltaje en una configuración de 500 milisegundos por ciclo, logrando detectar que las semillas *lens culinaris* emiten señales eléctricas de +20 mV al romper el estado de dormición y entrar en la fase de imbibición. Para lo cual, primero se obtuvo un modelo matemático empírico, mostrado en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Modelo Matemático de Aproximación empírica

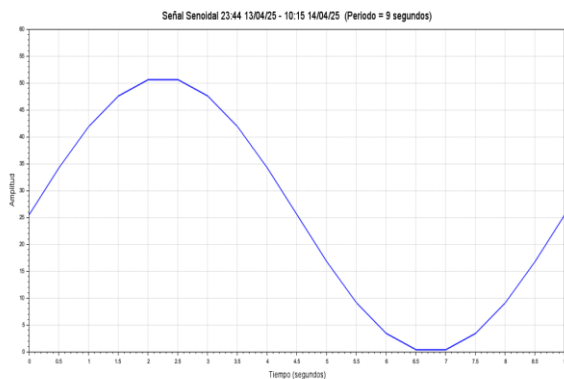
|  |  |
|--|--|
| $f(t) \approx \begin{cases} 25.5 \sin \sin (1t + 0) + 25.5:t & > 1 \\ 61:t & == 1 \\ 0:t & \neq 0 \end{cases} \quad (3)$ |  |
|--|--|

Al procesar esta base de datos se muestra un importante pico eléctrico de 61 mV que se relacionan con la fase de eclosión después de 54:51:01 (54 horas 51 minutos .1 segundos) de monitoreo, donde se aprecia un pico de 61 mV  $\pm 1/2$  segundo. Este pico se muestra en la Figura 8.



**Figura 8.** Señal eléctrica de la semilla *Lens Culinaris* en eclosión.

El conjunto de señales monitoreadas después del momento de eclosión a partir de la hora 54:51:01 y hasta 168 horas, muestra un estado de micro pulsaciones cíclicas durante del surgimiento de la retícula que arroja una curva similar a una Senoidal en pequeños periodos de 9 segundos (Figura 9).



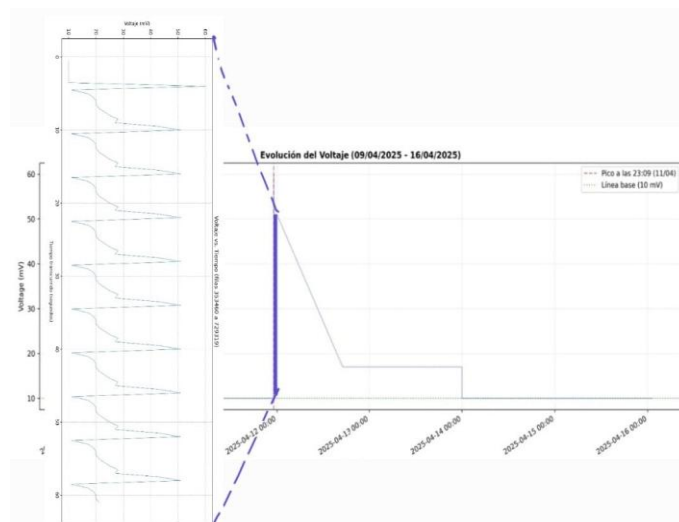
**Figura 9.** Amplitud de 51mV y Periodo de 9s esta señal representa 0.11Hz que son las pulsaciones que emite la semilla después de la eclosión.

Los registros de voltaje durante este periodo de tiempo (7 días) muestran el incremento en la actividad eléctrica registradas desde la fase de imbibición de las muestras hasta el surgimiento de pelos reticulares y un posterior decremento de la señal eléctrica, posiblemente relacionado con limitaciones técnicas de los electrodos en contacto con la muestra, Figura 10.

### CONCLUSIONES

Para monitorear esta señal fisio eléctrica es relevante utilizar un sustrato de hidrogel como medio activador para romper el estado de dormición de la semilla y facilitar la señal eléctrica entre el electrodo y la muestra de semilla, los cambios fisiológicos que se desarrollan durante la etapa de germinación en *lens culinaris* se pueden caracterizar al iniciar la fase de imbibición por el incremento de actividad eléctrica generando una señal característica en relación a esta transformación fisiológica, principalmente en la fase de eclosión de las muestras de estas semillas alrededor de los 60 mV, estas señales fisioeléctricas se puedan relacionar con un incremento de voltaje durante microciclos de desarrollo, aunque falta

caracterizar otras fases de la etapa de germinación, esta experimentación puede ser útil para caracterizar esta etapa del proceso de crecimiento en semillas similares.



**Figura 10.** Evolución del voltaje durante una semana 168 horas de monitoreo.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a través de una beca de financiamiento de posgrado (CVU 646005).

### REFERENCIAS

- Batool, T., Ali, S., Seleiman, M.F., Naveed, N.H., Ali, A., Ahmed, K., Abid, M., Rizwan, M., Shahid, M.R., Alotaibi, M., Al-Ashkar, I., Mubushar, M. 2020. Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Sci. Rep.*, 10 (1), 16975. doi: 10.1038/s41598-020-73489-z.
- Bhardwaj, J., Anand, A., Nagarajan, S. 2012. Biochemical and biophysical changes associated with magnetopriming in germinating cucumber seeds. *Plant Physiol. Biochem.*, 57, 67–73. doi: 10.1016/j.plaphy.2012.05.008.
- Boanos, A., Chandrababu, S., Bastola, D. R. 2018. Automation of Personal Food Computers for Research in Drug Development and Biomedicine.

7th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI). pp. 655–658. doi: 10.1109/IIAI-AAI.2018.00137.

- Boanos, A., Mothukuri, A. S., Goettsch, K. A., Bastola, D. K. 2017. Investigation and utilization of personal food computers for research in drug development and biomedicine. *IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, pp. 2229–2231. doi: 10.1109/BIBM.2017.8218006.
- Cauthorn, G., Crisman, K., Boles, H.O., Johnson, C.M., Subramanian, A., Barker, R., Cuthbert, E., Yamada, M., Sato, Y., Chisuga, H., Fukoka, S., Kagami, S., Tada, C., Park, S., Kunihiro, K., Mitsukawa, K., Ueki, A., Nozawa, S., Delioglu, G. 2025. Japanese Oblate Film as a Novel Method for Seed Handling and Activation in Microgravity. *Gravitational Space Res.* 13 (1), pp. 30–38. doi: 10.2478/gsr-2025-0002.
- Domin, M., Kluza, F., Goral, D., Nazarewicz, S., Kozolwicz, K., Szmigielski, M., Slaska-Grzywna B. Germination Energy and Capacity of Maize Seeds Following Low-Temperature Short Storage. 2020. *Sustainability*, 12 (1). doi: 10.3390/su12010046.
- Dos Santos, R. P., Fachada, N., Beko, M., Leithardt, V. R. Q. 2023. A Rapid Review on the Use of Free and Open Source Technologies and Software Applied to Precision Agriculture Practices. *J. Sens. Actuator Netw.*, 12 (2). doi: 10.3390/jsan12020028.
- Fromm, J., Lautner, S., Electrical signals and their physiological significance in plants. 2007. *Plant Cell Environ.*, 30 (3), 249–257. doi: 10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x.
- Kailash, K., Chandra, S. y Sukesh, M. 2021. Design and Development of an Instrumentation System to Detect the Bioelectric Signals of Plants. 2021 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER). doi: 10.1109/DISCOVER52564.2021.9663601
- Kassim, M. R. M. IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges, 2020. *IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, pp. 19–24. doi: 10.1109/ICOS50156.2020.9293672.
- Khan Academy. Introducción a la fotosíntesis (artículo). Consultado: el 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/intro-to-photosynthesis>.
- Repo, T., Paine, D. H., Taylor, A. G. 2002. Electrical impedance spectroscopy in relation to seed viability and moisture content in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Seed Sci. Res.*, 12 (1), 17–29. doi: 10.1079/SSR200194.
- Stočes, M., Vaněk, J., Masner, J., Pavlík, J. 2016. Internet of Things (IoT) in Agriculture - Selected Aspects. *AGRIS -Line Pap. Econ. Inform.* Unknown. doi: 10.22004/ag.econ.233969.
- Yanbo, S., Zhao, W., Su, Z., Guo, S., Du, Y., Song, X., Shi, X., Li, X., Liu, Y, Liu, Z. 2024. Effect of Pulsed Electric Field Treatment on Seed Germination and Seedling Growth of *Scutellaria baicalensis*. *Agriculture*, 14 (1). doi: 10.3390/agriculture14010158.
- Zhong-Yi, W., Qiang, L., Lan, H., Long-Lian, Z., Zhi-Long, X., Rui-Feng, H. y Cheng, W. 2009. Monitoring system for electrical signals in plants in the greenhouse and its applications. *Biosystems Engineering*. 103(1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.01.013>.

# El Modelo de Gompertz en la Modelización de Fenómenos de Crecimiento Limitado: aplicaciones Interdisciplinarias en Contexto

## The Gompertz Model in the Modeling of Limited Growth Phenomena: Interdisciplinary Applications in Context

Martínez-Ortiz, J.<sup>1</sup>, Ramírez-Hernández, L.<sup>1\*</sup>, García-Reyna, M.<sup>1\*</sup>, Badillo de Loera, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unidad Académica de Matemáticas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Paseo la Bufa s/n, Av. Solidaridad, 98066, Zacatecas, Zac., México

<sup>2</sup>Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Universitario siglo XXI.

\*Corresponding Author: [Lramirez@uaz.edu.mx](mailto:Lramirez@uaz.edu.mx)

Recibido: 12 de enero de 2025

Aceptado: 18 de noviembre de 2025

### Resumen

El modelo de Gompertz es reconocido por su extraordinaria versatilidad en la modelización de fenómenos que exhiben un crecimiento limitado. Esta función sigmoide asimétrica describe procesos que inician con un crecimiento lento, seguido de una fase de aceleración exponencial y una posterior desaceleración al aproximarse a un límite superior (capacidad de carga, K). Propuesto originalmente en 1825 para describir la ley de mortalidad humana, hoy el modelo encuentra aplicaciones rigurosas en demografía, biología, medicina, economía, biotecnología y epidemiología. En el contexto de salud pública en México, el modelo de Gompertz ha sido fundamental para pronosticar y analizar el comportamiento de enfermedades. En este trabajo, se presenta un análisis comparativo y descriptivo de la dinámica de crecimiento de tres fenómenos disímiles utilizando el modelo de Gompertz: la epidemia de VIH/SIDA en México (1983-2020), la pandemia por COVID-19 en México (casos acumulados, incluyendo análisis en Zacatecas) y la proliferación de células cancerígenas *in vitro* tipo *HeLa*. En todos los casos estudiados, el modelo Gompertziano mostró un ajuste satisfactorio a los datos observados (altos coeficientes de determinación  $R^2$ ), lo que confirma su utilidad empírica para caracterizar la tasa de crecimiento y estimar la capacidad de carga del sistema.

**Palabras clave:** Sigmoidal; Gompertz; Epidemiología; SARS-CoV-2; VIH/SIDA; Proliferación celular

### Abstract

The Gompertz model is known for its extraordinary versatility in modeling phenomena that exhibit limited growth. This asymmetric sigmoid function describes processes that begin with slow growth, then enter an exponential acceleration phase, and subsequently decelerate as they approach an upper limit (carrying capacity, K). Originally proposed in 1825 to describe the law of human mortality, today the model finds rigorous applications in demography, biology, medicine, economics, biotechnology, and epidemiology. In the context of public health in Mexico, the Gompertz model has been crucial for forecasting and analyzing disease behavior. This work presents a comparative and descriptive analysis of the growth dynamics of three distinct phenomena using the Gompertz model: the HIV/AIDS epidemic in Mexico (1983-2020), the COVID-19 pandemic in Mexico (accumulated cases, including analysis in Zacatecas), and the *in vitro* proliferation of HeLa cancer cells. In all cases studied, the Gompertzian model showed a satisfactory fit to the observed data (high determination coefficients  $R^2$ ), confirming its empirical utility for characterizing the growth rate and estimating the system's carrying capacity.

**Keywords:** Sigmoidal; Gompertz; Epidemiology; SARS-CoV-2; HIV/AIDS; Cell proliferation

## INTRODUCCIÓN

El modelo de Gompertz es un modelo determinista caracterizado por un crecimiento sigmoideo que inicia con un aumento acelerado, el cual posteriormente tiende a estabilizarse al acercarse a un límite. El gran número de aplicaciones reportadas en la literatura sobre su uso, evidencia su capacidad para estimar fenómenos de crecimiento poblacional, así como en epidemiología y biología (Gompertz, 1825).

El origen del modelo se remonta a 1825, cuando el matemático británico Benjamin Gompertz lo propuso para modelar la ley de mortalidad humana, basándose en la suposición de que la resistencia a la muerte disminuye exponencialmente con la edad. A pesar de este origen demográfico, la curva de Gompertz ha demostrado ser extraordinariamente versátil, siendo utilizada para describir procesos de crecimiento limitado en oncología (crecimiento tumoral), crecimiento microbiano, difusión de innovaciones, y la progresión de epidemias (Kathleen & Even, 2017).

La popularidad de Gompertz radica en que permite ajustar datos experimentales de fenómenos diversos que comparten una dinámica común: *fases de crecimiento acelerado seguidas de una saturación*. A diferencia del modelo logístico clásico, la curva de Gompertz es asimétrica, permitiendo una desaceleración más gradual a medida que se aproxima al asíntota superior (Gil, Miller & Brandão, 2011), lo cual es adecuado para describir sistemas donde la saturación es lenta (Winsor, 1932).

En el contexto de contingencias sanitarias, la capacidad de pronosticar el comportamiento de una enfermedad es crucial para la toma de decisiones en salud y política pública (Larid, 1964). La COVID-19 evidenció áreas de oportunidad en sistemas de salud como el mexicano. Para proyectar el comportamiento acumulado de contagios y muertes durante la pandemia de COVID-19 (Vaghi et al., 2020; Bajzer & Vuk-Pavlovic, 2000), han sido empleados diversos enfoques, incluyendo modelos compartimentales, modelos de regresión, técnicas de aprendizaje automático (como MLP y LSTM), y modelos de crecimiento logístico y Gompertz (Zwietering et al., 1990). En México, se han realizado esfuerzos en investigación implementando modelos bayesianos y de

aprendizaje automático, sin embargo, se demandan estudios comparativos robustos (Xuan & Jianlong, 2025).

Este trabajo se enfoca en demostrar la utilidad y el rigor del modelo determinista de Gompertz mediante el análisis de tres aplicaciones, con énfasis en el contexto de salud en México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Modelo de Gopertz

El modelo de Gompertz describe el crecimiento de una variable de interés  $G(t)$  (como el tamaño de una población o el número de casos acumulados) en función del tiempo  $t$ .

Su formulación matemática, la llamada ley de crecimiento de Gompertz, se basa en una ecuación diferencial no lineal que establece que la tasa de cambio relativa disminuye logarítmicamente a medida que crece. Esta se expresa como:

$$\text{Ec 1. } \frac{dG(t)}{dt} = \beta G(t) \ln \ln \left( \frac{K}{G(t)} \right)$$

Donde

$\beta$ : es la *tasa intrínseca de crecimiento* del fenómeno.  
 $K$ : es la *capacidad de carga*, es decir, el valor máximo que alcanzaría  $G(t)$ , durante el proceso estudiado.

$G(t)$ : denota el *tamaño de la población* en el tiempo  $t$ .

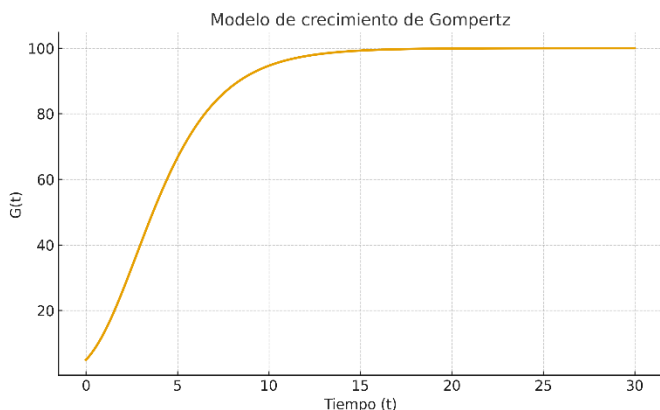
La solución explícita de esta ecuación diferencial es una función sigmoide asimétrica

$$\text{Ec 2. } G(t) = Ke^{-ae^{-\beta t}}$$

Donde

$\alpha = \ln \left( \frac{K}{G_0} \right)$ , siendo  $G_0$  es el valor inicial de  $G(t)$ , al tiempo  $t_0$ .

El parámetro  $t_0$  (relacionado con  $\alpha$ ) desplaza la curva en el tiempo. La característica sigmoide implica un crecimiento lento inicial, una aceleración exponencial intermedia, y una aproximación lenta al límite  $K$ . La Figura 1 describe este comportamiento:



**Figura 1.** Curva de crecimiento de Gompertz.

La gráfica muestra el comportamiento sigmoide característico del modelo de Gompertz. En la fase inicial, el crecimiento de  $G(t)$  es lento debido a que la población o fenómeno estudiado parte de un valor pequeño ( $G_0$ ). Posteriormente, se observa una etapa de aceleración exponencial, en la cual la tasa de crecimiento aumenta de forma rápida hasta alcanzar un punto de inflexión, donde el ritmo de incremento comienza a disminuir (Wang & Guo, 2024). Posterior a esto, la curva se aproxima asintóticamente a la capacidad de carga  $K$ , que representa el límite máximo del sistema (Pelinovsky, 2022). Esta forma asimétrica refleja cómo muchos procesos biológicos, epidemiológicos o poblacionales tienden a desacelerarse conforme se aproximan a su saturación natural o estructural.

### Caracterización dinámica

La dinámica característica de esta función es un crecimiento que arranca lentamente, luego entra en una fase de aceleración exponencial en una etapa intermedia, y finalmente se desacelera de forma progresiva y lenta al aproximarse a un límite superior (OMS, 2020). Los fenómenos que mejor se ajustan a este modelo son aquellos que tienen la característica de iniciar extremadamente rápido y que sufren una desaceleración que los conduce eventualmente a la estabilidad (Conde-Gutiérrez et al., 2021). El parámetro  $K$ , conocido como la *capacidad de carga* o *valor máximo asintótico*, representa el valor límite superior que la población o la característica

estudiada puede alcanzar (Torrealba-Rodríguez, 2020). En este contexto, se interpreta como el tamaño máximo del tumor o población celular en biología, el número total de casos esperado al final de un brote epidémico, el PIB potencial o penetración máxima de mercado en economía, o la producción máxima alcanzable en bioprocesos. Por su parte, el parámetro  $\beta$  es la *tasa intrínseca de crecimiento*, la cual determina la rapidez del crecimiento inicial, y se considera un valor clave para hacer comparaciones cualitativas entre poblaciones (como la tasa de contagio inicial en epidemiología). En demografía, este parámetro se relaciona con la tasa de aumento de la mortalidad con la edad. El parámetro  $\alpha$  está íntimamente ligado a la condición inicial del sistema, ya que  $\alpha = \ln\left(\frac{K}{G_0}\right)$ , permite definir la forma de la curva y su posición temporal. La dinámica asimétrica del modelo, donde la tasa de cambio relativa disminuye logarítmicamente a medida que crece, es de suma importancia; esta forma permite una subida más vertiginosa al inicio y una cola más larga al final, y es lo que hace que el punto de inflexión —el momento en que el crecimiento acumulado alcanza su máximo ritmo y que ocurre cuando— tenga lugar relativamente temprano en el proceso. El punto de inflexión del modelo de Gompertz, se localiza cuando  $G = K/e$ . En epidemiología, la función derivada de la solución de Gompertz es un buen modelo de distribución para los casos positivos, y su punto máximo (el punto de inflexión de la curva acumulada) se considera el pico de la infección. En el contexto biológico y fisiológico, ha sido suado para modelizar el crecimiento de organismos, órganos, tejidos y tumores, incluyendo el crecimiento de plantas, aves, peces y mamíferos, el crecimiento de cierto tipo de tumores cancerígenos, y la ganancia de peso de animales. Es ampliamente usado en la descripción de poblaciones de bacterias y en la proliferación celular *in vitro*, así como en el crecimiento microbiano y la producción de bioproductos como biohidrógeno y biogás en fermentaciones y cultivos industriales de microorganismos.

### Determinación de sus parámetros

El procedimiento se basa en un análisis determinístico que combina métodos algorítmicos (usando funciones explícitas para la linealización del modelo) y el método de ajuste por mínimos cuadrados no lineales para determinar los tres parámetros clave. La determinación de sus parámetros se realiza en etapas:

#### **Etapa 1:** Estimación de la Capacidad de Carga ( $K$ )

El parámetro  $K$  representa la capacidad de carga o el valor máximo asintótico que la población puede alcanzar. Su estimación se basa en la propiedad de que el punto de inflexión del modelo Gompertz  $P$  está relacionado con  $K$ .

**1. Identificación del Punto de Inflexión (Pico de Casos Diarios):** Se utiliza la serie de datos reales (observaciones)  $(t, P_{obs}(t))$ .

**2. Localización de los registros máximos:** Se identifican los registros máximos cercanos en los datos, el punto de inflexión del modelo de Gompertz ocurre cuando la función derivada alcanza su valor máximo.

**3. Cálculo del promedio de acumulados:** Se toman los valores correspondientes de los casos acumulados en los días en que se registraron los posibles valores máximos.

**4. Estimación de  $P$ :** Se calcula el promedio  $P(t)$  de esos registros de casos acumulados. El punto de inflexión será el promedio, y se determina el valor  $t$  en el cual ocurre éste.

**5. Estimación de  $K$ :** La capacidad de carga se estima multiplicando el valor del promedio (el punto de inflexión) por el número de Euler  $e \cong 2.71828$ :

$$K = \underline{P(t)} \times e$$

#### **Etapa 2:** Estimación de los Parámetros $\alpha$ y $\beta$

Una vez que  $K$  se ha estimado, los parámetros restantes ( $a$  y  $b$ , que luego se relacionan con  $\alpha$  y  $\beta$ ) se obtienen mediante el método del ajuste por mínimos cuadrados aplicado a la forma linealizada del modelo de Gompertz.

**1. Linealización del Modelo:** La transformación que linealiza los casos acumulados  $l(t)$  es:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{K}{l} \right) \right]$$

**2. Ajuste Lineal:** Se realiza un ajuste por mínimos cuadrados para obtener una recta que relacione la variable  $t$  con los datos transformados de Gompertz:

$$y(t) = a - bt$$

El parámetro  $b$  (que corresponde a la tasa intrínseca de crecimiento  $\beta$ ) se obtiene calculando la covarianza de las listas de datos, y luego, el parámetro  $\beta$  se determina como el negativo de la pendiente de la recta ajustada.

El parámetro  $\alpha$  se obtiene de la ordenada al origen de la recta ajustada, mediante la función exponencial.

Mediante este procedimiento, se obtienen los valores numéricos para  $K$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ; que permiten formular la expresión analítica final del modelo de Gompertz.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### El modelo de Gompertz en acción: algunas aplicaciones

La información presentada en esta tabla es el resultado de una revisión y síntesis de los modelos clásicos de naturaleza determinista reportados en las fuentes, con un enfoque particular en la versatilidad y eficacia del modelo de Gompertz. La revisión se centró en identificar las aplicaciones más significativas del modelo a lo largo de su historia, abarcando desde sus usos originales en actuaría y biología (crecimiento de tumores y organismos) hasta sus aplicaciones contemporáneas en la epidemiología (VIH/SIDA y COVID-19) y la biotecnología, ilustrando su capacidad para ajustar datos experimentales en fenómenos que comparten dinámicas de crecimiento acelerado seguido de una fase de saturación (Vásquez-Martínez et al., 2023). No se trata, para nada, de una revisión exhaustiva, sino una recolección de aplicaciones que los autores se han encontrado y han extendido en algunas de sus investigaciones (SSA, 2024).

#### 1. "Mortalidad humana (ley de Gompertz)"

◦ **Contexto:** Formulación original (1825) basada en la suposición de que la resistencia de una persona a la muerte disminuye exponencialmente con la edad.

◦ **Interpretación:** El modelo expresa que el riesgo de morir aumenta de forma exponencial con la edad adulta.

◦ **Parámetros Clave:**  $\alpha$  (nivel de mortalidad inicial);  $\beta$  (tasa de aumento de mortalidad con la edad).

## 2. "Crecimiento de tumores y poblaciones celulares"

- **Contexto:** Uso estándar en oncología experimental (ej., tumores sólidos en animales) y para el crecimiento de organismos y tejidos vivos.

- **Interpretación:** Captura el crecimiento inicial rápido que se frena al agotarse los recursos (nutrientes, espacio).

- **Parámetros Clave:**  $K$  (tamaño máximo del tumor o población celular esperado);  $\beta$  (tasa intrínseca de crecimiento)

## 3. "Proliferación celular *in vitro* (Células HeLa con 4% SFB)"

- **Contexto:** Cultivos de células HeLa, una línea celular cancerígena humana, bajo una concentración de 4% de suero fetal bovino (SFB).

- **Ajuste:**

$$G(t) = 32044,1874 \cdot e^{-0,971026 \cdot e^{-0,0130425t}}$$

## 4. "Proliferación celular *in vitro* (Células HeLa con 8% SFB)"

- **Contexto:** Cultivos de células HeLa bajo una concentración de 8% de SFB.

- **Ajuste:**

$$G(t) = 31871,0427 \cdot e^{-0,906677 \cdot e^{-0,0153902t}}$$

## 5. "Epidemia de VIH/SIDA (Casos Acumulados en México)"

- **Período:** 1983–2020 (o 1983–2019).

- **Ajuste:**

$$G(t) = 272348,152633 \cdot e^{-5,726591 \cdot e^{-0,08515t}}$$

- **Interpretación:** Fue el mejor ajuste sigmoidal.  $K$  representa el número total de casos esperado.

## 6. "Pandemia de COVID-19 (Casos Acumulados en México)"

- **Período:** Febrero 2020 – Diciembre 2024.

- **Ajuste:**

$$G(t) = 10305244,200345 \cdot e^{-5,255783 \cdot e^{-0,083258t}}$$

- **Interpretación:** Es un excelente ajuste que logra capturar la fase de crecimiento acelerado inicial y la desaceleración progresiva. El modelo Gompertz resultó

ser la curva sigmoidal que mejor se ajustó a los casos acumulados, superando a otros modelos.

## 7. "COVID-19 (Casos Acumulados en Zacatecas - Ordinario)"

- **Ajuste ( $R^2 / r$ ):**  $R^2 = 0.950811 / r = 0.9906945$ .

- **Interpretación:** La derivada del modelo es un buen modelo de distribución para las detecciones diarias. El punto de inflexión ocurre cuando la función derivada alcanza su valor máximo, considerado el pico de la pandemia (previsto para el día 150.65 o alrededor del 20 de agosto, según el ajuste de junio 2020)

## 8. "COVID-19 (Casos Acumulados en Zacatecas – Modelo Fraccionario)"

- **Ajuste ( $/$ ):** / .

## 9. "COVID-19 (Casos Acumulados en Bolivia - Ordinario)"

- **Ajuste ( $R^2 / r$ ):**  $R^2 = 0.926877 / r = 0.962745$ .

- **Interpretación:** El modelo Gompertz ordinario presenta un mejor desempeño y una mayor correlación que el modelo Logístico ordinario, que sería la primer elección de modelo en este tipo de fenómenos.

## 10. "Producción en fermentación (ej. biogás, biomasa) y crecimiento microbiano"

- **Contexto:** Cuantificación de procesos bioquímicos que tienen una fase de latencia, crecimiento exponencial y meseta por agotamiento de nutrientes.

- **Interpretación:** Se han desarrollado variantes (ej., Zwietering) que permiten extraer parámetros clave para optimizar y comparar procesos de cultivo.

- **Parámetros Clave:**  $K$  (Producción máxima alcanzable);  $\mu_{max}$  (Tasa máxima de producción o crecimiento microbiano);  $\lambda$  (Tiempo de retraso inicial o lag time)

La posibilidad de realizar comparaciones entre los parámetros ( $K$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) obtenidos del mismo modelo de Gompertz aplicado a diferentes poblaciones, condiciones o contextos del mismo fenómeno es una de las ventajas operativas más importantes de esta herramienta matemática. Este enfoque permite traducir las diferencias

observadas en el mundo real (como distintos ritmos de propagación o diferentes rendimientos de crecimiento) en valores numéricos estandarizados que tienen un significado biológico, epidemiológico o social directo

### Horizonte de uso del modelo de Gompertz

El Modelo de Gompertz es una herramienta matemática ideal para modelar cualquier proceso de crecimiento o decrecimiento que sea limitado y que siga un patrón sigmoide asimétrico. Su aplicabilidad se restringe a fenómenos que ocurren en un espacio de recursos limitados o que poseen una capacidad de carga  $K$  a la cual tienden a aproximarse lentamente. La curva característica arranca con un crecimiento lento, pasa por una fase de *aceleración exponencial* y, finalmente, se desacelera al aproximarse al límite superior, adoptando una forma de "S" alargada. El comportamiento específico que favorece la elección del modelo de Gompertz es que el fenómeno debe iniciar de manera extremadamente rápida y, a partir de cierto momento (donde la función derivada alcanza su valor máximo), sufrir una desaceleración sostenida que lo conduce a la estabilidad. La característica clave de la curva es su asimetría, permitiendo una aproximación al asintota superior más gradual que el despegue inicial, lo que resulta adecuado para describir sistemas donde la saturación es lenta o donde se genera una "cola más larga en su parte final". Matemáticamente, esta dinámica se define porque la tasa de cambio relativa de la población (o variable de interés) disminuye logarítmicamente a medida que la variable crece. Por estas razones, el modelo de Gompertz es la opción preferida para fenómenos de crecimiento poblacional, el crecimiento de ciertos tipos de tumores cancerígenos y células *in vitro* (donde los nutrientes se agotan), la propagación de epidemias (como el VIH/SIDA y COVID-19, donde la población susceptible se agota) y la y la Producción en fermentación (ej., biogás, biomasa) y crecimiento microbiano, donde el interés va hacia la producción máxima alcanzable o el *time lag* que es tiempo de retraso inicial o tiempo de arranque de la fase exponencial de crecimiento

### CONCLUSIÓN

El recorrido por el proceso de ajuste y de algunas de las aplicaciones del modelo de Gompertz revela su estatus no solo su naturaleza y origen como una fórmula histórica, sino como una herramienta matemática interdisciplinaria y predictiva de amplio alcance.

Su extraordinaria versatilidad se basa en su forma funcional sigmoide asimétrica, la cual captura eficazmente la dinámica de cualquier fenómeno que exhiba crecimiento limitado. Este patrón de crecimiento, caracterizado por un inicio extremadamente rápido seguido de una desaceleración sostenida hasta la saturación, se observa consistentemente en campos disímiles:

**Epidemiología:** El modelo demostró un ajuste casi perfecto a la curva de casos acumulados de VIH/SIDA en México y en los análisis comparativos de COVID-19, superó sistemáticamente al modelo Logístico en México, Zacatecas y Bolivia. Esto subraya su fiabilidad para describir el progreso de las epidemias y proporcionar pronósticos confiables sobre el número total de casos esperado y la fecha probable del pico de la epidemia.

**Biología y Bioprocesos:** El modelo es fundamental para caracterizar el crecimiento de tumores y la proliferación celular *in vitro*. En la biotecnología, su flexibilidad se confirma al permitir la extracción de parámetros clave como la producción máxima alcanzable, la tasa máxima de crecimiento y el tiempo de retraso inicial (*lag time*), parámetros clave para la optimización de procesos de fermentación.

**Análisis Operacional:** Una ventaja crucial es que los parámetros del Gompertz (como la tasa de crecimiento y la capacidad de carga) tienen interpretaciones biológicas y epidemiológicas directas. Esto permite realizar comparaciones cualitativas y rigurosas entre distintas poblaciones o condiciones de un mismo fenómeno (p. ej., la velocidad de propagación entre países o el efecto de diferentes concentraciones de suero en un cultivo).

Aunque el modelo de Gompertz es accesible conceptualmente y matemáticamente manejable, sigue evolucionando a través de generalizaciones y enfoques de orden fraccionario, asegurando su vigencia en la investigación contemporánea en fenómenos aún nmas complejos. En última instancia, el legado del Gompertz

demuestra el poder de las matemáticas sencillas aplicadas con ingenio para dilucidar las leyes comunes que rigen la vida, la enfermedad y los sistemas sociales con límites de crecimiento.

## REFERENCIAS

- Bajzer, Z., & Vuk-Pavlovic, S. (2000). Gompertzian growth and its applications to tumor dynamics. *Journal of Theoretical Medicine*, 2(4), 307–315. <https://doi.org/10.1080/10273660008833042>
- Conde-Gutiérrez, C., Colorado, D., Hernández-Bautista, E. (2021). Comparison of an artificial neural network and Gompertz model for predicting the dynamics of deaths from COVID-19 in México. *Nonlinear Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06471-7>
- Gil, M.M., Miller, F.A., Brandão, T.R.S. (2011). On the Use of the Gompertz Model to Predict Microbial Thermal Inactivation Under Isothermal and Non-Isothermal Conditions. *Food Eng. Rev.* 3, 17–25. <https://doi.org/10.1007/s12393-010-9032-2>
- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513–585. <https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>
- Kathleen, M., Even, T. (2017). The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. *PLoS ONE* 12(6): e0178691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178691>
- Laird, A. K. (1964). Dynamics of tumour growth: Comparison of growth rates and extrapolation of growth curve to one cell. *British Journal of Cancer*, 13(4), 490–502. <https://doi.org/10.1038/bjc.1964.55>
- Organización Mundial de la Salud. (2020). WHO Timeline – COVID-19. <https://www.who.int/es/news/item/27-04-2020-who-timeline---covid-19>
- Pelinovsky, E., et al. (2022). Gompertz model in COVID-19 spreading simulation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 146, 111699. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111699>
- Secretaría de Salud de México. (2024). Datos abiertos de Influenza, COVID-19 y otros virus respiratorios (SISVER). <https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-152127>
- Torrealba-Rodríguez, O., Conde-Gutiérrez, R. y Hernández-Javier, A. (2020). Modeling and prediction of COVID-19 in Mexico applying mathematical and computational models. *Chaos, Solitons and Fractals*. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109946>
- Vaghi, C., Rodallec, A., Fanciullino, R., Ciccolini J., Mochel, J., Matri, M. (2020). Population modeling of tumor growth curves and the reduced Gompertz model improve prediction of the age of experimental tumors. *PLoS Comput Biol* 16(2): e1007178. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007178>
- Vásquez-Martínez, R., González-Farías, G., Márquez-Urbina, J. y Ramos-Quiroga E. (2023). A Gompertz mixture approach for modeling the evolution of the COVID-19 dynamics. *Rev. Mat v. 30 n.1*. <https://dx.doi.org/10.15517/rmta.v30i1.50927>
- Wang, J., & Guo, X. (2024). The Gompertz model and its applications in microbial growth. *Biotechnology Advances*, 65, 108335. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108335>
- Winsor, C. P. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 18(1), 1–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.18.1.1>
- Xuan, G. y Jianlong, W. (2025). Kinetic models in environmental biotechnological processes: Origin, derivation and applications. *Chemosphere*. V. 374.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144217>

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875–1881.

<https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>

# Efecto de la concentración del ligante citrato ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ) en la adherencia de películas de CdS obtenidas por depósito en solución química sobre sustratos de vidrio utilizando el sistema $CdCl_2-Na_3C_6H_5O_7-NaOH-SC(NH_2)_2$

## Effect of the citrate ligand ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ) concentration on the adhesion of CdS films obtained by chemical solution deposition on glass substrates using the $CdCl_2-Na_3C_6H_5O_7-NaOH-SC(NH_2)_2$ system

Rosas-Domínguez, C.J.,<sup>1,2</sup> Escalante-Bujanda, M.A.,<sup>1,3</sup> Sandoval-Sánchez, R.I.,<sup>1,3</sup>  
Vargas-Durazo, J.T.,<sup>4</sup> Corona-Martínez, D.O.,<sup>4</sup> García-Valenzuela, J.A.<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigaciones y Desarrollos Aplicados (LIDERA), Departamento de Ciencias Químico-Biológicas (DCQB), Universidad de Sonora (UniSon), Hermosillo, Sonora, Mexico.

<sup>2</sup> Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales (DIPM), Universidad de Sonora (UniSon), Hermosillo, Sonora, Mexico.

<sup>3</sup> SMARTER-Lab Nucleus for Research & Divulcation A.C., Hermosillo, Sonora, Mexico.

<sup>4</sup> Departamento de Ciencias Químico-Biológicas (DCQB), Universidad de Sonora (UniSon), Hermosillo, Sonora, Mexico.

\*Corresponding Author: [jorgealberto.garcia@unison.mx](mailto:jorgealberto.garcia@unison.mx)

Recibido: 25 de Febrero de 2025

Aceptado: 15 de Mayo de 2025

### Resumen

La síntesis de películas de sulfuro de cadmio por depósito en disolución química produce residuos tóxicos de cadmio. Por ello, se busca disminuir la concentración de la sal de cadmio utilizada en la reacción. El problema es que una disminución de la concentración de iones cadmio tiene como resultado películas que no se adhieren a los sustratos de vidrio que carecen de impurezas de átomos "activos". Como solución, aquí se presenta una formulación química sencilla que mantiene una baja concentración de iones cadmio pero que sí permite la adherencia sobre sustratos de vidrio sin impurezas. La vía para lograrlo, y que se demuestra en este trabajo, es la modulación de la concentración del resto de los reactantes, particularmente, de la concentración del ligante (en este caso, citrato), cuya disminución permite el uso de una concentración más baja de sal de cadmio, dando lugar a películas adherentes; el efecto de la disminución del citrato es que la concentración disponible de iones cadmio, que favorece la adherencia de las películas, se eleva sin la necesidad de añadir más sal de cadmio a la disolución de reacción. Así, a continuación se presenta un estudio sistemático del efecto de la disminución de citrato hasta obtener formulaciones con la mínima concentración de ligante que produzca películas de sulfuro de cadmio suficientemente gruesas y adherentes. Para comprender bien la adherencia, en la introducción se explican los tres factores que determinan este resultado: reactividad del sustrato (sensibilización de la superficie), concentración de iones cadmio y temperatura.

**Palabras clave:** Adherencia; Películas delgadas; Sulfuro de cadmio; Depósito en solución química; Citrato de sodio.

### Abstract

The synthesis of cadmium sulfide films by chemical solution deposition produces toxic cadmium waste. Thus, it is important to decrease the concentration of cadmium salt used in the reaction. The problem is that a decrease in cadmium ions concentration results in films that do not adhere to the glass substrates that are free of "active" atoms. As a solution, a simple chemical formulation is presented here that employs a low concentration of cadmium ions but still permits adhesion to impurity-free glass substrates. The way to achieve it, and which is demonstrated in this work, is the modulation of the concentration of the rest of the reagents, particularly the ligand concentration (in this case, citrate), whose decrease allows the use of a lower concentration of cadmium salt, resulting in adherent films; the effect of decreasing the citrate concentration is to increase the concentration of available cadmium ions, which promotes the adhesion of the films, without adding more cadmium salt to the reaction solution. In this way, a systematic study of the effect of decreasing the citrate concentration until obtaining formulations that use the minimum ligand concentration that produces sufficiently thick and adherent cadmium sulfide films is presented below. To understand adhesion, the three factors that determine adhesion are explained in the introduction: substrate reactivity (surface sensitization), cadmium ions concentration, and temperature.

**Keywords:** Adhesion; Thin films; Cadmium sulfide; Chemical solution deposition; Sodium citrate.

## INTRODUCCIÓN

El sulfuro de cadmio (CdS) es un material semiconductor muy utilizado en diferentes dispositivos optoelectrónicos de gran interés tecnológico (Ashok et al., 2020). Una de las maneras más versátiles y accesibles de obtenerlo como película delgada es la técnica de depósito en disolución química. Sin embargo, aunque esta técnica es fácil y económica, hay que tomar en cuenta que las sales de cadmio que se emplean en ella son tóxicas (Rafati Rahimzadeh et al., 2017), por lo que es recomendable la utilización de una concentración mínima de iones cadmio en la síntesis del CdS.

En la carrera por el diseño de formulaciones menos contaminantes para la síntesis de CdS por depósito en disolución química, la formulación reportada por Ortuño-López y colaboradores en el año 2004 (2004a) destaca por utilizar una concentración baja (6 mM) de cloruro de cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ), que es la mitad de la concentración que ellos utilizaban en sus investigaciones anteriores (Ortuño-López et al., 2003); además, utilizaron citrato ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ ), a partir de citrato de sodio ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ), como ligante en vez de amoníaco, éste último asociado con contaminación ambiental (Ortuño-López et al., 2004a) (como muchos otros, utilizaron hidróxido de potasio (KOH) y tiourea ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) como fuente de iones  $\text{OH}^-$  y de azufre, respectivamente). Estos cambios hicieron de esta formulación química un ejemplo que fue replicado por otros grupos de investigación en México y Estados Unidos (Arreola-Jardón et al., 2010; Hernández-Borja et al., 2011; Mazón-Montijo et al., 2007; Mazón-Montijo et al., 2010; Mejía et al., 2011; Ochoa-Landín et al., 2009; Ochoa-Landín et al., 2010; Ortuño-López et al., 2004b; Salas-Villasenor et al., 2010; Salas-Villasenor et al., 2012; Sandoval-Paz et al., 2007; Sandoval-Paz y Ramírez-Bon, 2009a; Sandoval-Paz y Ramírez-Bon, 2009b; Sandoval-Paz y Ramírez-Bon, 2011; Sotelo-Lerma et al., 2009; Vorobiev et al., 2012).

Además, esta formulación tenía la ventaja de que el CdS sintetizado se adhería sólo a sustratos sensibilizados con átomos “activos”, tal como el estaño, un claro ejemplo que se incorpora de manera natural sólo a una cara (con la que tuvo contacto el estaño fundido) de los vidrios

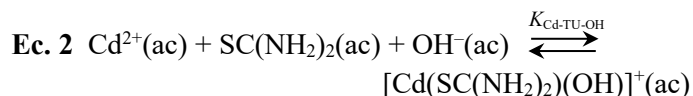
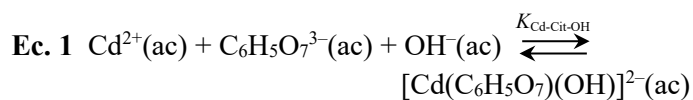
fabricados mediante el método de flotación (vidrios flotados), conocido como método de Pilkington (1959; 1969). De esta manera, el CdS no se depositaba en sustratos que no tuvieran dicha sensibilización, tal como la otra cara del vidrio flotado (la cara expuesta al aire durante su fabricación) o el vaso de precipitados de vidrio Pyrex® donde se lleva a cabo la reacción. Esto trajo como ventaja que no fuera necesario limpiar con ácido clorhídrico el otro lado del portaobjetos usado como sustrato ni el vaso de precipitados, ya que no tenían material adherido. La única desventaja es que no se podían utilizar obleas de silicio como sustratos, ya que estos, al estar compuestos sólo de silicio y óxido de silicio en su superficie expuesta al aire, no están sensibilizados con átomos “activos”.

Sin embargo, esta ventaja desapareció cuando las industrias productoras de láminas de vidrio empezaron a buscar uniformidad en sus productos, esto es, que ambas caras de una hoja de vidrio tengan las mismas características físicas y químicas. Con esto, los portaobjetos de vidrio “contaminados” con estaño dejaron de introducirse en el mercado y, por tanto, la formulación diseñada por Ortuño-López y colaboradores en 2004 (2004a) dejó de ser funcional, ya que las películas de CdS depositadas siguiendo dicha formulación ya no se adhieren a ninguna de las caras de los portaobjetos de vidrio obtenidos en el mercado actual. La única manera de lograr la adherencia de las películas de CdS es regresando la concentración del  $\text{CdCl}_2$  al doble (12 mM), tal como se hacía en la formulación de Ortuño-López y colaboradores reportada por ellos anteriormente (Ortuño-López et al., 2003). Así, se volvió al punto de partida.

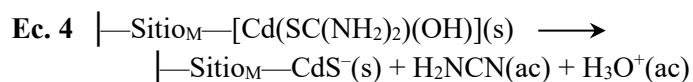
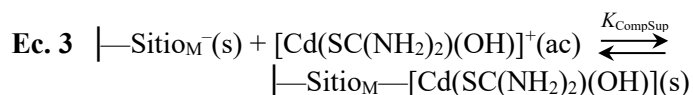
La explicación de las observaciones en la adherencia de las películas de CdS fue dada por García-Valenzuela y colaboradores hasta el año 2019 (2019), donde explicaron que ésta se ve afectada por los siguientes factores: (1) la reactividad y concentración de los sitios activos de la superficie del sustrato, expresados como  $\text{—Sitiom}$  (que en medio alcalino generalmente poseerán carga negativa, expresados como  $\text{—Sitiom}^-$ ), donde la reactividad depende del metal o metaloide que compone a dicho sitios, siendo los más comunes el silicio, de baja

“actividad”, y el estaño, de alta “actividad”; (2) la concentración de iones disponibles de  $\text{Cd}^{2+}$  para formar con la  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  y el hidróxido el complejo soluble  $[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]^+$ , que tendrá afinidad por el sitio activo con carga negativa de la superficie del sustrato,  $|\text{—SitiO}_M^-$ , formando así el complejo de superficie  $|\text{—SitiO}_M^-[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]$ ; y, finalmente, (3) la temperatura de la reacción, que afecta directamente la constante de equilibrio para la formación del complejo de superficie  $|\text{—SitiO}_M^-[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]$ . Para la explicación de la adherencia se consideran los siguientes grupos de reacciones:

(a) Equilibrios de formación de complejos solubles:



(b) Equilibrios de formación de complejos de superficie y CdS:



En esta secuencia de reacciones, la Ecuación 1 se refiere a la formación del complejo soluble  $[\text{Cd}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)(\text{OH})]^{2-}$ , que mantiene baja y regulada la concentración de iones  $\text{Cd}^{2+}$  libres (para que no reaccionen de manera inmediata en la formación de CdS como precipitado, sino que la reacción sea lenta y gradual). La Ecuación 2 se refiere a la formación del complejo soluble  $[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]^+$ , que es el precursor de la película de CdS, una vez que reacciona con el sitio  $|\text{—SitiO}_M^-$  de la superficie del vidrio para formar el complejo de superficie  $|\text{—SitiO}_M^-[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]$ , de acuerdo al equilibrio expresado en la Ecuación 3. Finalmente, la formación de una molécula de CdS unida químicamente a la superficie del sustrato,  $|\text{—SitiO}_M^- \text{CdS}^-$ , se expresa en la Ecuación 4. Con estas ecuaciones, es fácil señalar que cualquier efecto que favorezca la formación del complejo

de superficie  $|\text{—SitiO}_M^-[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]$  favorecerá la formación de  $|\text{—SitiO}_M^- \text{CdS}^-$ , es decir, de uniones químicas de la película de CdS con el sustrato mediante la formación de moléculas de CdS unidas químicamente a la superficie del vidrio, y, con esto, se ve favorecida la adherencia de la película a dicho sustrato. Así, la adherencia se ve favorecida por (1) una mayor concentración de sitios  $|\text{—SitiO}_M^-$  donde el metal sea más reactivo que el silicio, (2) una mayor concentración de iones  $\text{Cd}^{2+}$  que estén disponibles para formar el complejo soluble  $[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]^+$ , y (3) la disminución de la temperatura, que incrementa la constante de equilibrio de la Ecuación 3.

Para el caso de los sitios más reactivos que los de silicio, se han propuesto procedimientos para sensibilizar con átomos de estaño (Cabrera-German et al., 2019; Grozdanov, 1994a; Grozdanov, 1994b; Lundin y Kitaev, 1965a; Lundin y Kitaev, 1965b; Lundin y Kitaev 1967) o para incorporar *in situ* iones aluminato ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ) (García-Valenzuela et al., 2022) en la superficie de los sustratos de vidrio actualmente disponibles en el mercado, lo cual constituye un paso extra previo a la reacción de depósito, en el primer caso, y la preparación de más reactantes involucrados en la reacción, en el segundo, lo cual incrementa el costo del proceso de depósito y genera más residuos químicos. La disminución de la temperatura, por otro lado, hace que las reacciones para la obtención de las películas tengan que durar horas en lugar de minutos. Por tanto, los grupos de investigación prefieren elevar la concentración de la sal de cadmio añadiendo más  $\text{CdCl}_2$  a la disolución de reacción como solución al problema de la adherencia (García-Valenzuela et al., 2019), lo cual trae consigo el problema del incremento de la peligrosidad de los residuos.

Sin embargo, dado que es la baja concentración de iones  $\text{Cd}^{2+}$  disponibles para formar complejos con la  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  y el hidróxido en la disolución de reacción y en la superficie del sustrato, en principio, lo que da lugar a la mala adherencia de las películas depositadas de CdS, la cual es regulada mediante la adición de  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$  como ligante (Ecuación 1), entonces, en lugar de aumentar la cantidad de  $\text{CdCl}_2$  añadiendo más de este compuesto al sistema de reacción, es posible lograr el mismo efecto mediante la disminución de la concentración del ligante  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ . Así, la disminución del  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$  desplazaría la

Ecuación 1 hacia la izquierda, lo que aumentaría la concentración de iones  $\text{Cd}^{2+}$  disponibles, por el principio de Le Châtelier. Una mayor disponibilidad de iones  $\text{Cd}^{2+}$  daría lugar a un incremento en la concentración del complejo soluble  $[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]^+$  y, con ello, de  $|\text{—Sitiom—}[\text{Cd}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)(\text{OH})]$  y, por ende, de  $|\text{—Sitiom—CdS}^-$ , con lo que se obtendrían películas de CdS adherentes a los portaobjetos de vidrio no sensibilizados del mercado actual. Es precisamente este efecto en la mejora de la adherencia lo que se demuestra en el presente trabajo. De esta manera, aquí se presentan los resultados del estudio del efecto que tiene la disminución sistemática de la concentración del  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  (como fuente del ion  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ ), manteniendo la concentración de  $\text{CdCl}_2$  en 6 mM, sobre la adherencia de las películas de CdS resultantes depositadas sobre portaobjetos de vidrio Corning® de lotes comerciales actuales (no contaminados con metales “activos”). Cabe señalar, además, que con la disminución de la concentración de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  se ahorra en el consumo de los reactivos utilizados en la reacción para el depósito de las películas de CdS.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los siguientes reactivos fueron utilizados para la síntesis de las películas de CdS:  $\text{CdCl}_2$  (marca Fermont, 99.9% ensayo),  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (marca Fermont, 99.9% ensayo), hidróxido de sodio (NaOH, marca Fermont, 97.3% ensayo) y  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  (marca Productos Químicos Monterrey, 99.9% ensayo). Los sustratos utilizados fueron portaobjetos de vidrio de la marca Corning® de lotes nuevos (sin estaño), con dimensiones de  $75 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ . Poco antes de ser utilizados, estos se lavaron con agua corriente y detergente líquido para platos, y se enjuagaron con abundante agua corriente y posteriormente con agua destilada. Finalmente, los sustratos de vidrio se secaron con una secadora de cabello.

Las películas de CdS fueron obtenidas mediante la técnica de depósito en disolución química. Se partió de la formulación química descrita en la Tabla 1, que es una modificación de la formulación de Ortuño-López y colaboradores de 2004 (2004a) que fue reportada por García-Valenzuela y colaboradores en 2013 (2013), que será etiquetada como Formulación Original (sólo para efectos del presente estudio, ya que, estrictamente

hablando, la formulación original es aquella reportada por Ortuño-López y colaboradores en 2004). Esta modificación consiste en la eliminación de la pequeña cantidad de búfer que se solía añadir a la disolución de reacción y la utilización de NaOH en lugar de KOH como fuente de iones hidróxido, con la que se obtuvieron los mismos resultados que Ortuño-López y colaboradores. De la misma manera, esta Formulación Original da películas de CdS que no se adhieren a los sustratos de vidrios no sensibilizados (García-Valenzuela et al., 2019).

La formulación anterior está diseñada para producir 100 mL de disolución de reacción con una concentración inicial de  $\text{CdCl}_2$  6 mM,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  100 mM, NaOH 15 mM y  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  50 mM. La temperatura de depósito utilizada fue de 70 °C y el tiempo de reacción se fijó en 15 min. Para el estudio del efecto de la concentración de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , se disminuyó en intervalos de 2 mL el volumen de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M usando en la Formulación Original, sustituyéndolos sucesivamente con 2 mL de agua para mantener el volumen final de 100 mL. Así, los volúmenes de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M usados fueron 20, 18, 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2 y 0 mL, que dan concentraciones finales de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 y 0 mM, respectivamente.

El equipo utilizado para el depósito consiste básicamente en un baño de agua con temperatura controlada, un vaso de precipitados de vidrio que contiene la disolución de reacción y los sustratos sumergidos verticalmente en ella. Este equipo es muy sencillo y fácil de armar en cualquier laboratorio de química.

Para comenzar con el procedimiento para el depósito de las películas, en el vaso de precipitados (de 100 mL) se adicionan secuencialmente y en ese orden los

**Tabla 1.** Detalles de la formulación química reportada por García-Valenzuela y colaboradores en 2013 (2013), etiquetada aquí como Formulación Original.

| Disolución de reactante o diluyente                | Volumen (mL) |
|--|--------------|
| $\text{CdCl}_2$ 0.05 M                             | 12           |
| $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 0.50 M | 20           |
| NaOH 0.50 M  | 3            |
| $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.50 M                  | 10           |
| Agua destilada                                     | 55           |

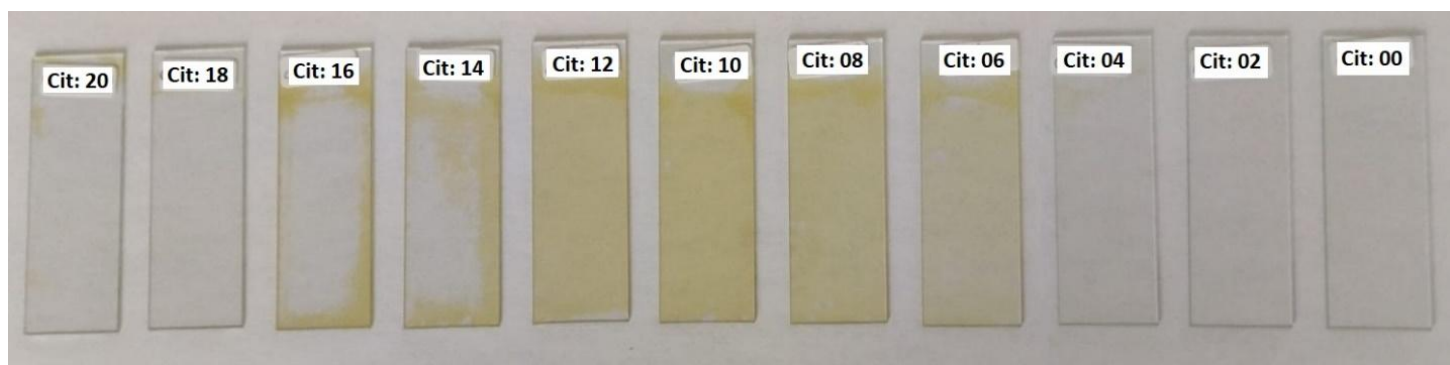
volúmenes indicados en la Tabla 1 de las disoluciones de la fuente de iones  $\text{Cd}^{2+}$  ( $\text{CdCl}_2$ ), del agente quelante ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , cuya cantidad se variará), de la fuente de azufre ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ), de la fuente de iones  $\text{OH}^-$  ( $\text{NaOH}$ ) y, finalmente, el volumen necesario de agua para llevar la disolución a 100 mL. Después, se coloca dentro de la disolución de reacción un sustrato de vidrio limpio y seco. Inmediatamente después, el vaso conteniendo la disolución de reacción y el sustrato de vidrio se introduce en el baño de agua a una temperatura controlada de 70 °C. Transcurridos 15 min de reacción, el sustrato es retirado de la disolución de reacción, luego enjuagado con agua destilada, y en seguida se le pasa un algodón húmedo sobre ambas superficies del vidrio con el propósito de retirar el material no adherido. Por último, la muestra se vuelve a enjuagar con abundante agua destilada y se deja secar al aire.

En el depósito de películas delgadas en disolución química, se entiende que una película adherente es aquella que no se desprende del sustrato ni durante ni después del depósito. La adherencia es muy fácil de observar, ya que al retirar el sustrato de la disolución de reacción, una vez que el tiempo de depósito ha concluido, este debe ser limpiado con agua destilada y con un algodón húmedo para retirar las partículas polvosas que generalmente se posan sobre la superficie del vidrio. Una película con mala adherencia se desprende inmediatamente ya sea con el chorro de agua destilada o con el algodón húmedo. Por lo tanto, en este trabajo, a todas las películas de CdS recién depositadas se les aplicó un tratamiento de limpieza con agua destilada y algodón húmedo, para evaluar así la adherencia de estas películas al portaobjetos de vidrio

empleado como sustrato, y se presenta una fotografía como evidencia del resultado. Adicionalmente, a todas las películas que resultaron adheridas se les midió el grosor por perfilometría utilizando un perfilómetro Tencor Alpha Step 100; para ello, se trazó un surco en la película con ácido clorhídrico diluido con el uso de una punta de madera, creando así un escalón donde la superficie del sustrato de vidrio es la base y la parte más alta de la película es la parte superior del escalón.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 es una fotografía de las películas resultantes de la variación de la cantidad de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M utilizado en la disolución de reacción, desde 20 hasta 0 mL, mientras se mantienen invariables los volúmenes del resto de los reactantes. En la figura se aprecia claramente que no hay película de CdS sobre el sustrato de vidrio cuando ésta es depositada con 20 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M (que da una concentración final de 100 mM), que corresponde a la concentración original (Formulación Original, Tabla 1), ya que ésta se despega del sustrato tal como se mencionó en la introducción del presente artículo. Lo mismo sucede cuando se usan 18 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M (que da una concentración final de 90 mM). Sin embargo, la película parece tener cierta adherencia, aunque no completa, cuando se utilizan 16 y 14 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M (que dan concentraciones de 80 y 70 mM, respectivamente), teniendo una adherencia muy buena cuando se utilizan 12, 10, 8 y 6 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M (que dan concentraciones de 60, 50, 40



**Figura 1.** Fotografía de las películas de CdS obtenidas con diferentes volúmenes de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M, desde 20 hasta 0 mL. Se utilizaron 12 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M, 3 mL de  $\text{NaOH}$  0.50 M, 10 mL de  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  0.50 M y la cantidad de agua destilada necesaria para llevar la disolución de reacción hasta un volumen final de 100 mL.

y 30 mM, respectivamente). Estos resultados comprueban la hipótesis de que la disminución de la concentración del ligante  $C_6H_5O_7^{3-}$ , que forma un complejo soluble con el  $Cd^{2+}$  para mantener su concentración libre en un nivel bajo y controlado (Ecuación 1), permite una excelente adherencia de la película de CdS depositada sin la necesidad de añadir más  $CdCl_2$  al sistema de reacción. Todo esto mediante la formación de una mayor cantidad del complejo de superficie  $[-SitiO_M-[Cd(SC(NH_2)_2)(OH)]$ , dando lugar posteriormente a la formación de un mayor número de moléculas de CdS unidas químicamente a los sitios de la superficie del vidrio ( $[-SitiO_M-CdS^-]$ ).

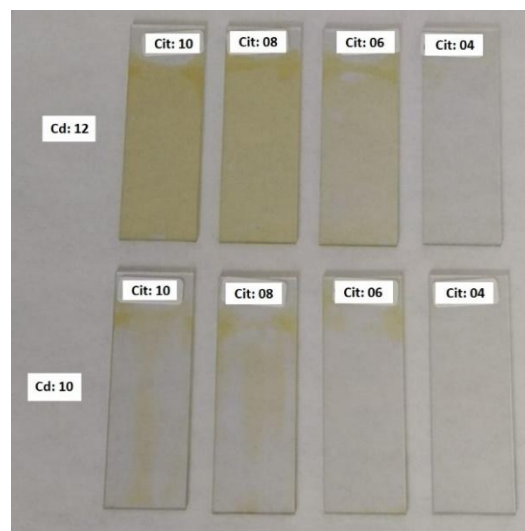
Como se muestra en la Figura 1, la disminución de la concentración de  $Na_3C_6H_5O_7$  permite la formación de películas de CdS adherentes al sustrato de vidrio no flotado. Sin embargo, esto ocurre hasta cierto punto, ya que la utilización de 4, 2 y 0 mL de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M (que dan concentraciones de 20, 10 y 0 mM, respectivamente) dan lugar a una preferencia en la precipitación del CdS en la disolución de reacción, con poca o nula formación de película sobre la superficie del sustrato. Por tanto, se concluye que los volúmenes de 12, 10, 8 y 6 mL de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M pueden ser utilizados para la síntesis de películas de CdS adherentes sobre sustratos de vidrio libres de estaño. Los espesores de estas películas adherentes depositadas utilizando 12, 10, 8 y 6 mL de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M fueron 61, 65, 56 y 37 nm, respectivamente. Ahora bien, tras una inspección detallada de estas películas, se observó que la película más homogénea es aquella sintetizada con 10 mL de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M, siendo ésta superior en calidad que las otras tres, además de ser la de mayor espesor (65 nm); la formulación correspondiente a este volumen de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M se expresa en la Tabla 2, a la cual se le denominará en este trabajo como Formulación Optimizada. Con esto, se logró el objetivo del presente trabajo, que es obtener películas de CdS adherentes a sustratos de vidrio no sensibilizados con átomos “activos” mediante la disminución de la concentración de  $Na_3C_6H_5O_7$ .

Ahora bien, al tomar en cuenta que el uso de una menor cantidad de reactivos, especialmente de  $CdCl_2$ , que es tóxico, es importante en el diseño de las formulaciones químicas para la síntesis de películas por la técnica de depósito en disolución química, se realizaron varios

**Tabla 2.** Detalles de la Formulación Optimizada.

| Disolución de reactante o diluyente | Volumen (mL) |
|-------------------------------------|--------------|
| $CdCl_2$ 0.05 M                     | 12           |
| $Na_3C_6H_5O_7$ 0.50 M              | 10           |
| NaOH 0.50 M                         | 3            |
| $SC(NH_2)_2$ 0.50 M                 | 10           |
| Agua destilada                      | 65           |

experimentos adicionales con la disminución sistemática de la cantidad de  $CdCl_2$  0.05 M, utilizándose ahora 10 mL (que dan una concentración de 5 mM) en lugar de los 12 mL de la Formulación Original (que dan una concentración de 6 mM). En el caso del  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M, se fijó como máximo para este estudio el volumen de 10 mL (que da una concentración de 50 mM), que es el volumen con el que mejores resultados se obtuvieron, y se estudiaron además tres volúmenes menores a esa cantidad: 8, 6 y 4 mL (que dan concentraciones de 40, 30 y 20 mM). La fotografía de las películas resultantes se presenta en la Figura 2, donde también se muestran las películas sintetizadas con 12 mL de  $CdCl_2$ , para realizar una mejor

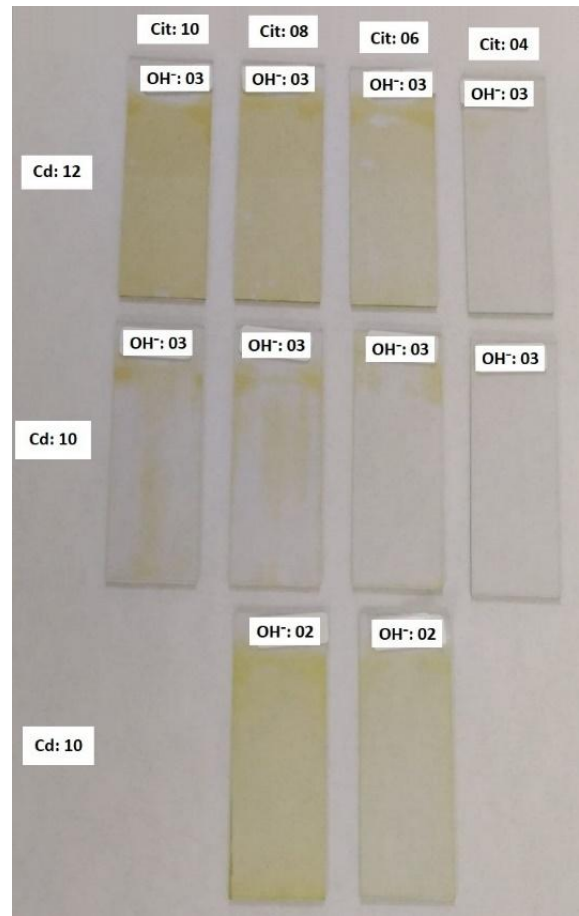


**Figura 2.** Fotografía de las películas de CdS obtenidas con diferentes volúmenes de  $Na_3C_6H_5O_7$  0.50 M utilizando 10 mL de  $CdCl_2$  0.05 M en lugar de 12 mL. Se utilizaron 3 mL de NaOH 0.50 M, 10 mL de  $SC(NH_2)_2$  0.50 M y la cantidad de agua destilada necesaria para llevar la disolución hasta 100 mL. En la imagen también se muestran las películas obtenidas con 12 mL de  $CdCl_2$  0.05 M para una mejor comparación.

comparación. Como puede verse en la imagen, no fue posible obtener películas adherentes cuando se utilizan 10 mL de  $\text{CdCl}_2$  con ninguno de los volúmenes de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M estudiados.

Una posible explicación para la formación de películas no adherentes cuando se disminuye la cantidad de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M de 12 a 10 mL es que el pH se eleva ligeramente. Dado que todos los complejos solubles formados con  $\text{Cd}^{2+}$  también involucran un ion  $\text{OH}^-$ , tal como se aprecia en las distintas reacciones presentadas anteriormente (Ecuación 1 y Ecuación 2), una disminución en la concentración de  $\text{Cd}^{2+}$ , manteniendo el resto de los reactantes intactos, dejaría un exceso de iones  $\text{OH}^-$  en la disolución de reacción en comparación con la Formulación Original, elevándose así el pH relativo. Dado que un aumento en el pH favorece las reacciones de precipitación del CdS en la disolución de reacción (Hodes, 2002), la formación de una película homogénea y adherente no fue posible bajo estas circunstancias de menor concentración de  $\text{CdCl}_2$  cuando la cantidad de  $\text{NaOH}$  0.50 M añadida al sistema se mantiene igual que en la Formulación Original. Por tal motivo, se volvieron a depositar las mismas películas anteriores, pero utilizando 2.0 mL de  $\text{NaOH}$  0.50 M (que da una concentración de 10 mM) en lugar de 3.0 mL (que da una concentración de 15 mM), lo que dio como resultado la formación de películas adherentes, tal como se muestra en la Figura 3. Esto significa que una disminución de la cantidad de  $\text{CdCl}_2$  debe realizarse simultáneamente con una disminución de la cantidad de  $\text{NaOH}$  en el sistema de reacción, para poder mantener así un pH óptimo de síntesis de las películas de CdS (el cual varía según la concentración de todos los reactivos y cuya identificación podría realizarse en un trabajo futuro), lo que favorece un crecimiento sobre el sustrato. Sin embargo, a pesar de que se obtuvieron películas adherentes con 10 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M y 2 mL de  $\text{NaOH}$  0.50 M, éstas resultaron delgadas y poco homogéneas; los espesores obtenidos fueron 58 y 45 nm cuando se usaron 8 y 6 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M, respectivamente (que dan concentraciones de 40 y 30 mM, respectivamente).

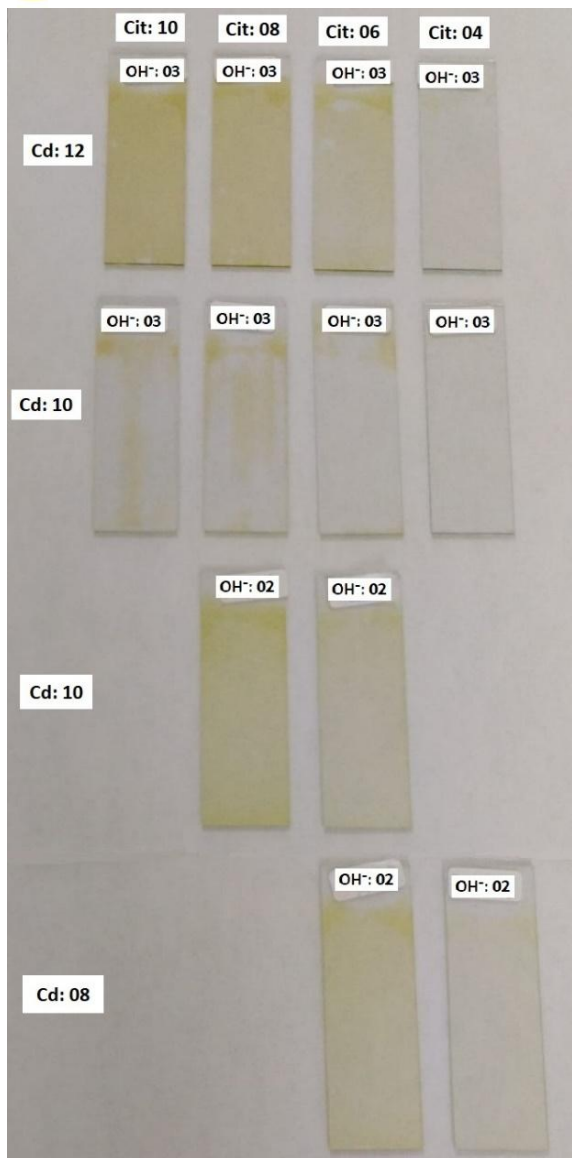
Bajo el mismo argumento, y con la posibilidad de disminuir la concentración de  $\text{Cd}^{2+}$ , se depositó otra serie utilizando ahora 8 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M (que da una concentración de 4 mM) y usando 2.0 mL de  $\text{NaOH}$  en lugar



**Figura 3.** Fotografía de las películas de CdS obtenidas con 2 mL de  $\text{NaOH}$  0.50 M en lugar de 3 mL, utilizando 10 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M, 8 y 6 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M y la cantidad de agua destilada necesaria para llevar la disolución hasta 100 mL. En la imagen también se muestran las películas obtenidas en los casos anteriores para una mejor comparación.

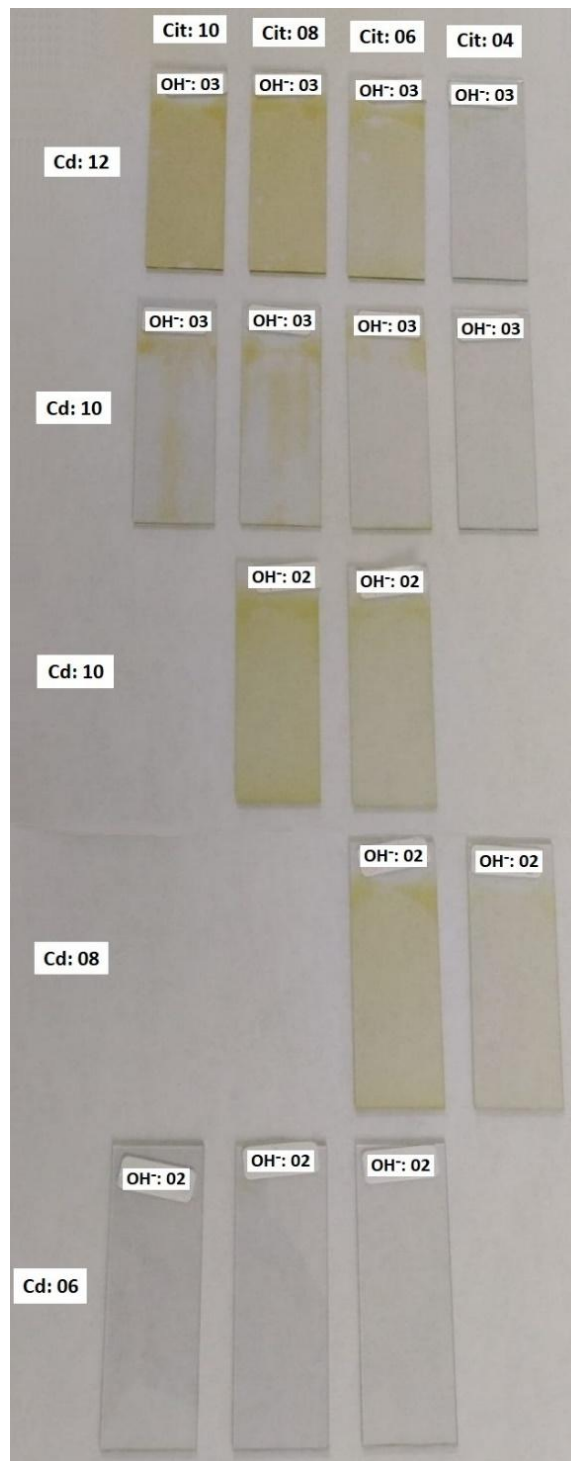
de 3.0 mL, del mismo modo que en el caso anterior. El resultado fue que se obtuvieron películas adherentes, pero muy delgadas, tal como se observa en la Figura 4, donde se obtuvieron espesores de 37 y 30 nm para las películas depositadas utilizando 6 y 4 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M, respectivamente (que dan concentraciones de 30 y 20 mM, respectivamente). Finalmente, el límite en la formación de las películas de CdS se alcanza con 6 mL de  $\text{CdCl}_2$  (que da una concentración de 3 mM), donde ya no se obtiene película alguna, tal como se aprecia en la Figura 5.

Con base en todas las observaciones anteriores, se concluye que la película de CdS de mejor calidad, es decir, adherente, más homogénea y de mayor espesor, fue



**Figura 4.** Fotografía de las películas de CdS obtenidas con 8 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M y 2 mL de NaOH 0.50 M en lugar de 3 mL, utilizando 6 y 4 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M y la cantidad de agua destilada necesaria para llevar la disolución hasta 100 mL. En la imagen también se muestran las películas obtenidas en los casos anteriores para una mejor comparación.

aquella depositada en una disolución de reacción con una concentración de  $\text{CdCl}_2$  6 mM,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  50 mM, NaOH 15 mM y  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  50 mM, misma que se obtiene siguiendo la formulación química descrita en la Tabla 2, a la cual se le denominó Formulación Optimizada. Esta es la formulación que permite la síntesis de películas de CdS de calidad sobre sustratos sin estaño sin la necesidad de



**Figura 5.** Fotografía de las muestras obtenidas con 6 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M y 2 mL de NaOH 0.50 M en lugar de 3 mL, utilizando 10, 8 y 6 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M y la cantidad de agua destilada necesaria para llevar la disolución hasta 100 mL. En la imagen también se muestran las películas obtenidas en los casos anteriores para una mejor comparación.

aumentar la concentración de  $\text{CdCl}_2$  ni bajar la temperatura hasta  $30\text{ }^\circ\text{C}$ . El resto de las formulaciones que dieron lugar a películas adherentes sobre sustratos sin estaño, pero más delgadas, también son útiles, pero su uso sería para aquellos casos específicos donde una película ultradelgada fuera suficiente para determinada aplicación. De hecho, una búsqueda simple de artículos y patentes sobre síntesis y aplicaciones de películas ultradelgadas de CdS arroja varios resultados interesantes.

## CONCLUSIONES

Cuando se utiliza una concentración de  $\text{CdCl}_2$  de 6 mM, la disminución de la concentración del ligante  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  hasta una concentración entre 30 y 60 mM, permite una excelente adherencia de las películas de CdS depositadas sobre sustratos de vidrio no flotado sin la necesidad de añadir más  $\text{CdCl}_2$  al sistema de reacción. Los espesores obtenidos con estas concentraciones de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  se encuentran entre 37 y 65 nm. Sin embargo, la utilización de cantidades demasiado bajas de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M, con concentraciones por debajo de 30 mM, dan lugar a una precipitación del CdS en la disolución de reacción, con poca o nula formación de película sobre la superficie del sustrato (los espesores no pudieron ser medidos debido a la ausencia de una película suficientemente gruesa). También es posible disminuir la cantidad de sal de cadmio utilizada en el sistema de reacción, pero una disminución de la concentración de  $\text{CdCl}_2$  por debajo de 6 mM debe realizarse simultáneamente con una disminución de la concentración de NaOH por debajo de 15 mM, para mantener así las condiciones óptimas de síntesis de las películas de CdS, lo que favorece un crecimiento de CdS sobre el sustrato. De entre todas las formulaciones estudiadas, la película de CdS de mejor calidad, es decir, adherente, más homogénea y de mayor espesor, fue aquella depositada en una disolución de reacción con una concentración de  $\text{CdCl}_2$  6 mM,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  50 mM, NaOH 15 mM y  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  50 mM, misma que se obtiene con la formulación química denominada Formulación Optimizada, y que se obtiene con los siguientes volúmenes: 12 mL de  $\text{CdCl}_2$  0.05 M, 10 mL de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  0.50 M, 3 mL de NaOH 0.50 M, 10 mL de  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  0.50 M y 65 mL de agua destilada.

## Agradecimientos

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Investigaciones y Desarrollos Aplicados (LIDERA) del Departamento de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad de Sonora bajo la dirección del Dr. Jorge Alberto García Valenzuela con el financiamiento del proyecto de investigación No. USO313008554 titulado “Optimización de una formulación para el depósito químico de películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS) sobre diversos tipos de sustratos: Minimización del impacto ambiental”, patrocinado por la Facultad Interdisciplinaria de Ciencias Biológicas y de Salud de la Universidad de Sonora.

## REFERENCIAS

- Ashok A, Regmi G, Romero-Núñez A, Solis-López M, Velumani S, Castaneda H. 2020. Comparative studies of CdS thin films by chemical bath deposition techniques as a buffer layer for solar cell applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 31:7499–7518.
- Arreola-Jardón G., González LA, García-Cerda LA, Gnade B, Quevedo-López MA, Ramírez-Bon R. 2010. Ammonia-free chemically deposited CdS films as active layers in thin film transistors. *Thin Solid Films* 519(1):517–520.
- Cabrera-German D, García-Valenzuela JA, Cota-Leal M, Martínez-Gil M, Aceves R, Sotelo-Lerma M. 2019. Detailed characterization of good-quality SnS thin films obtained by chemical solution deposition at different reaction temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing* 89:131–142.
- García-Valenzuela JA, Castelo-González OA, Baez-Gaxiola MR, Sotelo-Lerma M. 2013. Detailed analysis of five aspects addressed to minimize costs and waste in the chemical bath deposition of CdS films using the  $\text{Cd}B\text{-AC}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{-AOH-(NH}_2)_2\text{CS}$  system. *Materials Sciences and Applications* 4:386–405.

- García-Valenzuela JA, Cota-Leal M, Corona-Martínez DO, Baez-Gaxiola MR, Martínez-Gil M, Sotelo-Lerma M, Cabrera-German D. 2019. On the adherence of chemically deposited CdS films to common inorganic substrates: effect of Cd<sup>2+</sup> concentration in solution, substrate surface chemistry, and reaction temperature. *ChemistrySelect* 4:1650-1665.
- García-Valenzuela JA, Baez-Gaxiola MR, Cota-Leal M. 2022. Problems with the adhesion of chemical-solution-deposited films? Solving the problem of CdS thin film adhesion with a very simple and green chemical procedure. *Chemistry Letters* 51:177–181.
- Grozdanov I. 1994a. Deposition of Electrically Conductive, Microwave Shielding, and IR-Detecting Inorganic Coatings on Polymer Films. *Chemistry Letters* 23:551–554.
- Grozdanov I. 1994b. A simple and low-cost technique for electroless deposition of chalcogenide thin films. *Semiconductor Science and Technology* 9(6):1234.
- Hernández-Borja J, Vorobiev YV, Ramírez-Bon R. 2011. Thin film solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia-free process. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(7):1882–1888.
- Hodes G. 2002. *Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films*. New York City, NY, USA: Marcel Dekker.
- Lundin B, Kitaev GA. 1965a. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Neorganicheskie Materialy* 1:2102-2106. (Chem. Abstracts, 64, 9393d, 1965, 1966)
- Lundin B, Kitaev GA. 1965b. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorgan. Materialy* 1:2107-2112. (Chem. Abstr., 64, 9400 g, 1965, 1966)
- Lundin B, Kitaev GA. 1967. *Izobret., Prom. Obratstvy, Tovarnye Znaki* 44:18. (Chem. Abstr., 68, 80061n, 1967, 1968).
- Mazón-Montijo DA, Sotelo-Lerma M, Quevedo-López M, El-Bouanani M, Alshareef HN, Espinoza-Beltrán FJ, Ramírez-Bon R. 2007. Morphological and chemical study of the initial growth of CdS thin films deposited using an ammonia-free chemical process. *Applied Surface Science* 254(2):499–505.
- Mazón-Montijo DA, Sotelo-Lerma M, Rodríguez-Fernández L, Huerta L. 2010. AFM, XPS and RBS studies of the growth process of CdS thin films on ITO/glass substrates deposited using an ammonia-free chemical process. *Applied Surface Science* 256(13):4280–4287.
- Mejia AL, Salas-Villasenor L, Avendano-Bolivar A, Horvath J, Stiegler H, Gnade BE, Quevedo-Lopez MA. 2011. Low-temperature hybrid CMOS circuits based on chalcogenides and organic TFTs. *IEEE Electron Device Letters* 32(8):1086–1088.
- Ochoa-Landín R, Sandoval-Paz MG, Ortuño-López MB, Sotelo-Lerma M, Ramírez-Bon R. 2009. Observations on the influence of pH control on the properties of chemically deposited CdS films in an ammonia-free system. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 70(6):1034–1041.
- Ochoa-Landín R, Sastre-Hernández J, Vigil-Galan O, Ramírez-Bon R. 2010. Chemically deposited CdS by an ammonia-free process for solar cells window layers. *Solar Energy* 84(2):208–214.
- Ortuño-López MB, Valenzuela-Jáuregui JJ, Sotelo-Lerma M, Mendoza-Galván A, Ramírez-Bon R. 2003. Highly oriented CdS films deposited by an ammonia-free chemical bath method. *Thin Solid Films* 429(1-2):34–39.
- Ortuño-López MB, Sotelo-Lerma M, Mendoza-Galván A, Ramírez-Bon R. 2004a. Chemically deposited CdS films in an ammonia-free cadmium–sodium citrate system. *Thin Solid Films* 457(2):278–284.
- Ortuño-López MB, Sotelo-Lerma M, Mendoza-Galván A, Ramírez-Bon R. 2004b. Optical band gap tuning

- and study of strain in CdS thin films. *Vacuum*, 76(2-3):181–184.
- Pilkington LAB, Bickerstaff K. 1959. Manufacture of flat glass, US Patent No. 2 911 759.
- Pilkington LAB. 1969. Review lecture: The float glass process. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 314(1516):1–25.
- Rafati Rahimzadeh M, Rafati Rahimzadeh M, Kazemi S, Moghadamnia A. 2017. Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine* 8(3):135–145.
- Salas-Villasenor L, Mejia I, Hovarth J, Alshareef HN, Cha DK, Ramírez-Bon R, Gnade BE, Quevedo-Lopez MA. 2010. Impact of gate dielectric in carrier mobility in low temperature chalcogenide thin film transistors for flexible electronics. *Electrochemical and Solid-State Letters* 13(9):H313–H316.
- Salas-Villasenor L, Mejia I, Sotelo-Lerma M, Gnade BE, Quevedo-Lopez MA. 2012. Performance and stability of solution-based cadmium sulfide thin film transistors: Role of CdS cluster size and film composition. *Applied Physics Letters* 101(26):262103.
- Sandoval-Paz MG, Sotelo-Lerma M, Mendoza-Galván A, Ramírez-Bon R. 2007. Optical properties and layer microstructure of CdS films obtained from an ammonia-free chemical bath deposition process. *Thin Solid Films* 515(7-8):3356–3362.
- Sandoval-Paz MG, Ramírez-Bon R. 2009a. Analysis of the early growth mechanisms during the chemical deposition of CdS thin films by spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films* 517(24):6747–6752.
- Sandoval-Paz MG, Ramírez-Bon R. 2009b. Chemically deposited CdS films from ammonia-free processes. *Deposition, Characterization and Applications of Semiconductor Thin Films. Research Signpost*. 21–50.
- Sandoval-Paz MG, Ramírez-Bon R. 2011. Optical and structural properties of chemically deposited CdS thin films on polyethylene naphthalate substrates. *Thin Solid Films* 520(3):999–1004.
- Sotelo-Lerma M. 2009. Synthesis of semiconductor material films from aqueous solution: Chemical bath deposition. *Deposition, Characterization and Applications of Semiconductor Thin Films. Research Signpost*. 1–19.
- Vorobiev YV, Horley PP, Hernández-Borja J, Esparza-Ponce HE, Ramírez-Bon R, Vorobiev P, Pérez C, González-Hernández J. 2012. The effects of porosity on optical properties of semiconductor chalcogenide films obtained by the chemical bath deposition. *Nanoscale Research Letters* 7:483.

# Propuesta para la Mejora De La Eficiencia del Proceso de Producción en un Obrador de Carnicería

## Proposal for the Enhancement of Production Efficiency in a Meat Processing Facility

Guirette-Barbosa, O.A.,<sup>1</sup> Correa- Aguado, M.H.,<sup>2\*</sup> Carrera-Escobedo, J.L.,<sup>1</sup> Zepeda-Valles, G.,<sup>2</sup> Reyes-Sánchez, J. de J.,<sup>3</sup> Cleva, M.,<sup>4</sup> Cardoso Pérez, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Coordinación de Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica de Zacatecas, Plan de Pardillo S/N parque industrial, 99056, Fresnillo, Zacatecas, México. Tel. +52(493)9357106.

<sup>2</sup>Unidad Académica Preparatoria, Programa 3, Universidad Autónoma de Zacatecas, Niño Artillero s/n, Industrial, 98090, Fresnillo, Zacatecas, México. Tel. +52(493)9320765.

<sup>3</sup>Coordinación de Ingeniería en Gestión Empresarial, Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo, Tecnológico #16, Solidaridad, 99010, Fresnillo, Zacatecas, México. Tel. +52(493)9839600

<sup>4</sup>Facultad Regional Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional, C. French 414, H3506 Resistencia, Chaco, Argentina. Tel. +54(362)4432683

\*Corresponding Author: [mariahosannairaiscorreaaguado@gmail.com](mailto:mariahosannairaiscorreaaguado@gmail.com)

Recibido: 18 de Abril de 2025

Aceptado: 2 de Octubre 2025

### Resumen

El presente estudio analiza la eficiencia en los procesos de producción de carne en la sucursal Mercado de Abastos de Obrador Fresnillo, ubicada en Fresnillo, Zacatecas, México. Se identificaron variaciones en los rendimientos de producción y la falta de uniformidad en el manejo de productos cárnicos. Se realizó un enfoque de investigación cuantitativo mediante la medición de pérdidas (mermas) y la evaluación de la eficiencia del personal para determinar mejoras en el proceso. Se emplearon herramientas de calidad, como el Pareto para identificar las causas de las pérdidas. Posteriormente, se propuso un modelo de asignación de tareas para el personal, con el objetivo es reducir el desperdicio y mejorar el rendimiento del proceso de producción. Con la implementación de este modelo se busca mejorar la competitividad, efectividad y satisfacción del cliente de la empresa. Como resultado, se destaca la necesidad de una atención especial en la capacitación y en mantener al personal constantemente informado acerca de los procedimientos de trabajo que les aplique en la organización, junto con un estricto control de variables clave del proceso. Esta investigación sienta las bases para una dirección estratégica de mejora continua.

**Palabras clave:** Eficiencia, Obrador, Mejora Continua, Rendimiento.

### Abstract

This study analyzes the efficiency of meat production processes at the Mercado de Abastos branch of Obrador Fresnillo, located in Fresnillo, Zacatecas, México. Variations in production yields and a lack of uniformity in the handling of meat products were identified. A quantitative research approach was employed by measuring losses (waste) and assessing personnel efficiency to identify process improvement opportunities. Quality tools, such as the Pareto chart, were used to identify the leading causes of losses. Subsequently, a personnel assignment model was proposed to reduce waste and improve production yield. The implementation of this model aims to enhance the company's competitiveness, effectiveness, and customer satisfaction. As a result, the findings highlight the need for special attention to training and to keeping personnel constantly informed about the specific work procedures applicable to them within the organization, along with strict control of key process variables. This research lays the foundation for a strategic direction on continuous improvement.

**Keywords:** Efficiency, Meat Processing Plant, Continuous Improvement, Performance.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo industrial actual, que se caracteriza por su intensa competencia, el rendimiento y la calidad en la fabricación son fundamentales para alcanzar el éxito y garantizar la supervivencia en el mercado. Esto es especialmente cierto en el sector cárnico, donde la calidad no solo influye en las ganancias de las empresas, sino que también tiene un impacto directo en la seguridad alimentaria y en la percepción que los consumidores tienen de los productos. La carne, al ser un alimento altamente perecedero, requiere una atención meticulosa en cada etapa de su producción (Giampaolo-Orlandoni, 2012). Esto implica no solo mantener condiciones de almacenamiento adecuadas, sino también seguir secuencias de producción estandarizadas y contar con un equipo de trabajo bien capacitado que garantice un producto final óptimo y seguro para el consumo (Palacios, 2003).

En este contexto, la empresa Obrador Fresnillo, ubicada en el "Mercado de Alimentos", ha estado enfrentando algunos desafíos en su productividad. Entre los problemas más destacados se encuentran el aumento en los niveles de desperdicio, la inconsistencia en los rendimientos de los productos y las variaciones en las prácticas de manejo del personal. Estos problemas no solo afectan la eficiencia operativa, sino que también pueden poner en riesgo la calidad del producto final, lo que podría llevar a una pérdida de confianza por parte de los consumidores y, en consecuencia, a una disminución en las ventas (Moreno-Pino et al., 2021). Además, la falta de procedimientos estandarizados, un control de calidad sin certificar y un sistema de seguimiento limitado dificultan la identificación de problemas en el proceso en general. Esto significa que, cuando surgen problemas, las soluciones pueden tardar mucho tiempo en implementarse, lo que agrava aún más la situación (Pulido-Rojano et al., 2020).

El objetivo principal de este artículo es analizar y proponer mejoras en los procesos de producción de carne en Obrador Fresnillo. Para ello, se comenzó con un diagnóstico exhaustivo que permitiera identificar las principales causas de ineficiencia en la operación actual.

Utilizando un enfoque cuantitativo y metódico, y herramientas como el análisis de Pareto y diversos indicadores de rendimiento, se buscó desarrollar un modelo de mejora continua que se adapte a las particularidades de la empresa. Este modelo no solo se enfocará en optimizar los procesos internos, sino que también fomentará una cultura de calidad y mejora constante entre el equipo.

La implementación de estas mejoras tendrá como objetivo transformar al obrador en un actor más eficaz dentro de la red alimentaria local, haciéndolo más competitivo y rentable, y al mismo tiempo, más comprometido con la producción de calidad y seguridad. Estas mejoras no solo beneficiarán a Obrador Fresnillo, sino que también contribuirán a elevar los estándares de calidad en el sector cárnico en general, promoviendo un entorno más seguro y saludable para todos los consumidores (Lin et al., 2025).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque metodológico de este estudio es cuantitativo, con un diseño de tipo descriptivo y analítico (Totosaus, 2007; Sánchez-Escalante et al., 2008). Se realizó un diagnóstico en la sucursal Mercado de Abastos de Obrador Fresnillo, enfocado en la evaluación de los procesos de producción, poniendo especial énfasis en la manipulación de productos cárnicos, incluyendo carne de res, cerdo y pollo.

Para la recolección de datos, se diseñó un registro sistemático de variables clave: peso inicial del producto, peso final tras la manipulación, cantidad de merma generada, condiciones de almacenamiento (temperatura y humedad), experiencia del operario y tiempo empleado en cada etapa del proceso. Esta información fue recopilada durante un periodo de observación directa de cuatro semanas (en octubre y noviembre de 2023), con la participación activa de los cinco colaboradores asignados al área de producción.

Se emplearon herramientas estadísticas básicas

como el análisis porcentual de rendimiento y merma, así como diagramas de Pareto para identificar las principales fuentes de pérdida. Asimismo, se documentaron las prácticas operativas de los trabajadores y se aplicaron entrevistas estructuradas para conocer sus percepciones sobre las condiciones de trabajo, la capacitación recibida y su influencia en la eficiencia de los procesos (Venegas-Fornias, & Valladares-Díaz, 1999; Güemes-Vera, 2007).

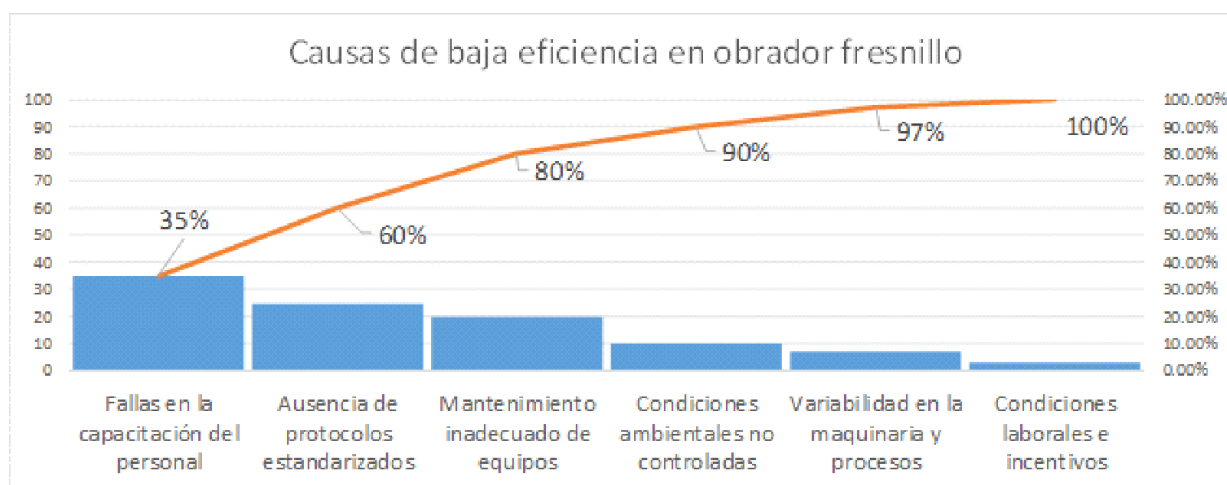
Las condiciones ambientales fueron monitoreadas utilizando termómetros digitales calibrados y tarjetas de control de humedad relativa, con el fin de identificar posibles desviaciones que afectarían los datos a obtener en el estudio. También se evaluó el estado del equipo de refrigeración y corte, verificando su funcionamiento, mantenimiento y adecuación a las necesidades de producción (Vidal-Lago, 1999; Rey-Rodríguez & Ortiz-Zamora, 2024).

Como propuesta de central de mejora, se realizó un análisis del método de trabajo y de la forma de asignar las tareas a los colaboradores de la organización. Se eligieron 9 variables de las cuales fueron analizados sus valores históricos y cómo se relacionaban con las tareas a

las que eran asignados los operarios y el nivel de desempeño que se obtenía. Esto permitió identificar que la asignación de tareas no respondía a ningún lineamiento y por consecuencias en la mayoría de las veces se hacía con criterios muy poco claros. Toda la información obtenida se sistematizó en una base de datos y se procesó mediante hojas de cálculo para obtener un método de asignación de tareas más sistematizado (Idrogo-Torres & Delgado-Tapia, 2024).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos reportados en este estudio han permitido identificar diferencias significativas en el rendimiento y el desperdicio de productos cárnicos procesados en una de las sucursales del Mercado de Abastos. A través de un análisis de Pareto (ver figura 1) se pudo determinar que las fallas en la capacitación del personal, ausencia de protocolos estandarizados y el mantenimiento inadecuado de los equipos deberían ser abordadas para poder generar mejoras significativas en la eficiencia del proceso.



**Figura 1.** Diagrama de Pareto de las principales causas de baja eficiencia en el proceso de producción del Obrador Fresnillo.

La inestabilidad observada en la gráfica de la figura 2 –un cambio de nivel- sugiere la presencia de causas especiales vinculadas al proceso de producción

(Barreiro, 2017). Explícitamente, se debe a que hubo un cambio de día a partir de la observación 21 y las máquinas utilizadas (principalmente sierra cinta para carne y una

cubicadora) fueron asignadas a los operarios conforme se iban presentando a laborar. Así pues, esto evidencia que cada operario puede tener diferentes niveles de experiencia, técnicas de trabajo o criterios para el manejo del producto, lo cual impacta en la consistencia de los tiempos de operación. Asimismo, el cambio entre equipos —por ejemplo, si se alternan sierras, embutidoras o

cámaras de refrigeración con distintos niveles de mantenimiento o calibración— también puede introducir variaciones significativas en el proceso. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de establecer protocolos estandarizados y capacitación continua para minimizar la variabilidad y recuperar el control estadístico del proceso (Cruz, 2015).



**Figura 2.** Gráfica de control de lecturas individuales del tiempo de operación (minutos), con zona de inestabilidad resaltada

El rendimiento de un obrador representa la proporción del producto aprovechable que se obtiene tras el proceso de despiece, una vez eliminadas las mermas como grasa excesiva, huesos, piel y fluidos. Este indicador es fundamental para evaluar la eficiencia del proceso productivo, ya que incide directamente en la rentabilidad de la empresa, el control de los desperdicios y la estandarización de los productos ofrecidos al cliente. En particular, el análisis de los rendimientos permite identificar posibles áreas de mejora en la técnica de corte, el uso de maquinaria, la capacitación del personal y las condiciones operativas. Por tanto, una evaluación precisa del rendimiento es clave para implementar estrategias de mejora continua y asegurar un aprovechamiento óptimo de la materia prima cárnica. Para la medición de esta variable se eligieron tres productos estrella de la tienda Obrador Fresnillo, las cuales fueron: Bistec de Puerco, Bistec de Res (bola, paloma, top sirloin, etc.) y milanesa de pollo. Con base en los datos históricos con los que se contaba en la empresa se determinaron los límites mínimos y máximos de rendimientos para cada uno de los productos

estrellas, los cuales se muestran en la tabla 1.

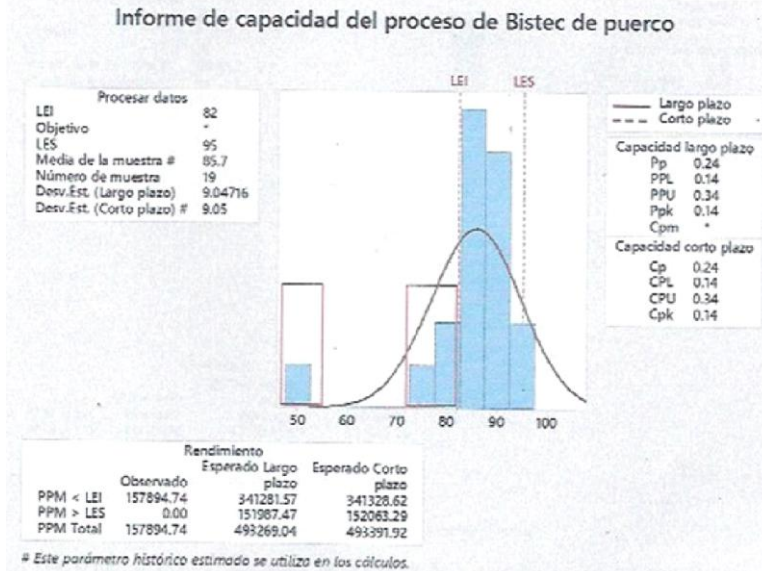
**Tabla 1.** Límites de Especificación de Rendimiento por Tipo de Producto Cárnico.

| Redimiento (%) | Bistec de Puerco | Bistec de Res | Milanesa de Pollo |
|----------------|------------------|---------------|-------------------|
| Límite mínimo  | 82               | 84            | 70                |
| Límite Máximo  | 95               | 95            | 88                |

El análisis de la información de los rendimientos de estos productos arrojó indicadores de capacidad con valores muy bajos para dos de los productos estrella. Para el bistec de puerco todos los indicadores tanto a corto como a largo plazo (Cp, Cpk, Pp y Ppk) arrojaron valores por debajo de 0.3 (ver figura 3), lo cual nos indica que el proceso no es capaz de mantenerse dentro de los límites y por lo tanto no es adecuado, requiriéndose hacer modificaciones serias en el mismo. También se generaron valores extremadamente altos en los indicadores de partes por millón (PPMs) fuera de los límites, y más específicamente de denota una fuerte tendencia hacia el

límite inferior de especificación (LEI), lo cual es una señal de que el proceso no es capaz de lograr cumplir de manera

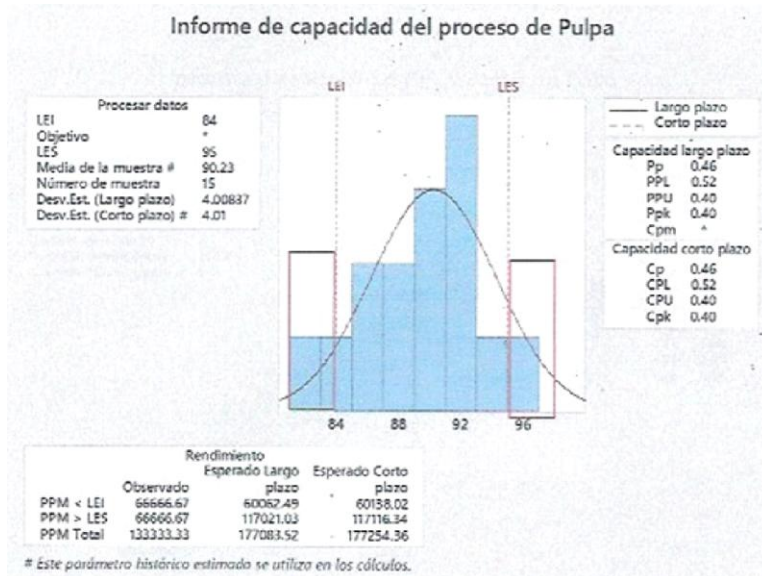
constante y contundente con el rendimiento mínimo especificado por la organización. Newtoniano (Figura 4).



**Figura 3.** Análisis de Capacidad del Proceso para el Bistec de Puerco

Al avanzar con el análisis, se identificó que los cortes de res también mostraron cierta ineficiencia en el comportamiento de sus rendimientos. En particular, los resultados de la capacidad para cumplir con las especificaciones de rendimiento fueron relativamente más altos que los del bistec de puerco, alcanzando valores tanto

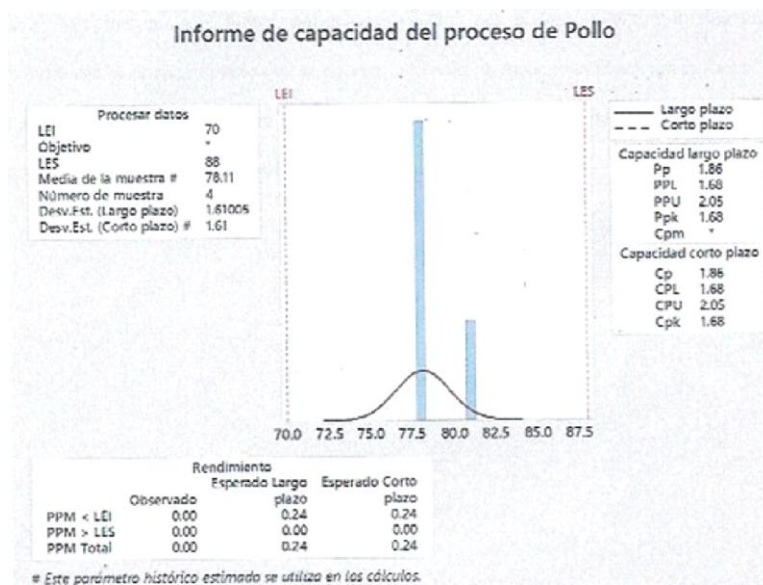
a corto como a largo plazo de 0.4 o superiores (ver figura 4). Esto indica que, en términos generales, el proceso de producción de bistec de res es más efectivo que el de puerco, pero dista mucho de ser un proceso de excelencia, ya que para serlo estos valores deberían estar en el orden de 1.33 o superiores.



**Figura 4.** Análisis de Capacidad del Proceso para el Bistec de res

Por otro lado, en el caso del pollo marinado, se encontraron cifras significativas en su capacidad (mayores a 1.33) para cumplir con las especificaciones de rendimiento. Esta información mostrada en la figura 5 hace ver que se están teniendo muy buenos resultados en el rendimiento de este tipo de carne, lo que se puede atribuir a la presencia de métodos estandarizados al

manipular este tipo de carne, lo que ha llevado a que cada operador realice el procedimiento de acuerdo a un aprendizaje adquirido por capacitación o adiestramiento y mejora de las habilidades gracias a un seguimiento, generando así una variabilidad mínima que impacta positivamente en la eficiencia.



**Figura 5.** Análisis de Capacidad del Proceso para la carne de pollo

Esta capacidad mostrada por la carne de pollo para cumplir con las especificaciones de rendimiento se convierte en una fuente importante de eficiencia y reducción de desperdicio. Dentro de las razones principales de porqué este tipo de carne no muestra las deficiencias de rendimiento respecto a los otros dos tipos de carne anteriores es posible mencionar las siguientes:

a) Hay diferencias en las herramientas utilizadas, el tiempo de manejo y las condiciones de almacenamiento. El deshuese y fileteado de pollo es más rápido y genera cortes uniformes. En la res y el puerco hay mayor complejidad en el corte y la necesidad de separar músculos específicos incrementan el desperdicio. Todos estos factores impactan directamente en el resultado final del producto.

b) El pollo entero, especialmente si se procesa para filetes o milanesas tiene menos partes no comestibles en proporción al peso total inicial, en comparación con el puerco o la res.

c) En la res o el puerco, el despiece implica quitar mayor cantidad de huesos pesados, grasa dura y tejido conectivo, lo que disminuye los valores del rendimiento porque todos esos componentes se consideran como merma.

La comparación de estos tres productos estrella evidencia que las diferencias encontradas pueden ser explicadas en dos vertientes: la primera que es muy evidente es la naturaleza de producto cárnico; la res y el puerco incluyen procesos largos y pesados, mientras que el pollo es un proceso corto y homogéneo. En el puerco y en la res existe una mayor variabilidad, que es una variable originada por el tamaño del animal. El pollo tiene un tamaño más homogéneo y no ocupa maquinaria especializada. La segunda vertiente son las condiciones globales de operación del obrador: inexistentes o deficientes protocolos de trabajo, asignación al azar o desordenada de las tareas a los operarios y capacitación deficiente o inexistente.

Con base en todo lo anterior, esta investigación propuso un modelo de asignación de tareas que, con base en el comportamiento histórico de distintas variables, pudiese asignar de manera óptima a los operarios a los distintos tipos de productos cárnicos. Para la construcción del modelo se establecieron nueve variables, las cuales se mencionan a continuación:

- a) Edad. - Se eligió esta variable dada la correlación presente entre la fuerza física y la velocidad de ejecución.
- b) Años de experiencia en el sector cárnico. - Con esa variable se valora la experiencia general en el ramo.
- c) Antigüedad en la empresa. - Esta variable se toma en cuenta porque con ella se mide el conocimiento por parte del individuo de los protocolos internos de operación de la organización.
- d) Cursos de formación específicos en deshuese, cortes finos y manipulación higiénica.
- e) Historial de productividad: rendimiento promedio obtenido en tareas previas
- f) Merma generada en tareas anteriores.
- g) Tiempo promedio de ejecución de tareas (operarios más rápidos pueden adaptarse mejor a carnes con procesos largos, como res).
- h) Nivel de rotación. - qué tan versátil es para el manejo de los diferentes tipos de carnes
- i) Volumen de producción requerido ese día (Por ejemplo, si se esperan más pedidos de pollo, se priorizan operarios más rápidos y consistentes).

La salida del modelo fue la recomendación de

cual tipo de carne debería ser asignado el operario (cerdo, res o pollo).

El modelo se diseñó para que ponderara las variables de entrada de forma diferenciada para cada tipo de carne. Se planteó de forma que priorizara rapidez y consistencia en el caso del pollo, equilibrio entre técnica y rendimiento para el cerdo y mayor especialización y precisión en la res. Las fórmulas de cálculo se implementaron en una hoja de cálculo que permitió registrar los datos de cada operario y, de forma automática, calcular un puntaje por producto y sugerir la asignación óptima.

Para verificar el desempeño del modelo, se alimentó con información de los operarios de la sucursal analizada. Posteriormente, se realizaron pruebas variando la demanda del día (baja, media y alta) en los tres tipos de carne, de manera que se evaluara la sensibilidad del sistema ante diferentes escenarios de producción. Los resultados arrojaron que, con las condiciones de priorización y búsqueda de equilibrio en la asignación de las tareas por tipo de carne a los operarios, la asignación estaba bien distribuida de acuerdo al número de operarios, asignando por lo general 2 operarios a los cortes de Pollo, dos a los de res y uno a la de cerdo. Solo en aquellos casos en que se dieran una combinación de alta demanda de cerdo, se hacía una reasignación de los operarios. La tabla 2 muestra un extracto de las 27 combinaciones posibles y las asignaciones de operarios que el modelo realizó.

**Tabla 2.** Asignación de tareas por tipo de carne a los operarios de la empresa sujeta a estudio

| Demanda Pollo | Demanda Res | Demanda Cerdo | Op. 1 | Op. 2 | Op. 3 | Op. 4 | Op. 5 |
|---------------|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Baja          | Baja        | Baja          | pollo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Baja        | Media         | pollo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Baja        | Alta          | Cerdo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Media       | Baja          | Pollo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Media       | Media         | Pollo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Media       | Alta          | Cerdo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |
| Baja          | Alta        | Baja          | Pollo | Cerdo | Res   | Pollo | Res   |

Los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 2 señalan que, bajo las condiciones de ponderación asignadas a las distintas variables y con parámetros de referencia usados (edad, experiencia, etc.), el sistema propuesto asigna de manera diferenciada a un solo operario, manteniendo de manera constante los demás 4 operarios al mismo tipo de carne. Esto se constituye como un resultado equilibrado y congruente con las necesidades productivas y de atención a los clientes.

El modelo propuesto es resultado del análisis del comportamiento de varias variables, y como tal, puede usarse como apoyo por parte de la empresa en las decisiones de asignación de personal. Sin embargo, es importante considerar que en un marco de contextos reales, habrá situaciones que harán que el modelo no sea certero. Por ejemplo, ante la inclusión de operarios nuevos; Esto situación afectaría los valores de entrada de varias variables, específicamente en la antigüedad en la empresa, cursos tomados, historial de productividad y demás relacionadas con la existencia de un historial. Ante esta situación se propone que se considere un tiempo de formación del operario, en el que acumule cierta cantidad de información en esas variables mencionadas, para que así posteriormente puede ser cargada esta información al modelo y pueda ser asignado de manera adecuada al tipo de carne en que podría ser más conveniente para la organización

## CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la propuesta del modelo puede ser una importante herramienta para la empresa sujeta a estudio, no solo en la facilitación de la asignación de tareas, sino que también puede ser usada como un mecanismo de aprendizaje organizacional, al reflejar la relación existente entre características del personal y la eficiencia alcanzada en distintos procesos. Incluso, podría servir como herramienta para el área de recursos humanos al momento de diseñar sus descripciones de puestos, haciendo énfasis en las variables de entrada al modelo para posibles aspirantes a ingresar a la plantilla laboral de la empresa.

También el modelo podría ayudar a identificar

las lagunas en capacitación del personal. Al alimentarse el mismo con datos como “Cursos de formación específicos” o “historial de productividad” arrojaría asignaciones coherentes con la cantidad de cursos tomados. Es decir, si un operario recibe menos cursos o es poco productivo porque no cuenta con la formación, pierde muchos puntos para estar en los cortes de res y tiende más a ser reasignado a cerdo o pollo, donde los requisitos técnicos son más bajos y el paso asignado a la capacitación es menor. La empresa pues, en el afán de fomentar la capacitación, podría generar beneficios adicionales a los operadores que se encuentren en el área de res, por ser el área que requiere más cortes complejos y donde la empresa obtiene la mayor ganancia. De igual forma, la merma generada en tareas anteriores y el tiempo promedio de ejecución de tareas expondrá, –con base en la asignación de los operarios a las tareas- a aquellos operarios que realizan sus tareas de forma más adecuada (al presentar datos con menos merma) y de forma más rápida, contribuyendo con eso a identificar los métodos y las formas que arrojan un proceso óptimo, y documentar todo eso en un procedimiento, para estandarizar las operaciones por tipo de carne, y con esto disminuir la variabilidad en tiempo de operación y en rendimiento.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los propietarios de la empresa “Obrador Fresnillo” por todas las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación.

## REFERENCIAS

- Barreiro, D. 2017. La tecnología alimentaria se adapta a una nueva realidad. *Tecnología de la carne*. V. 262. <https://www.eurocarne.com/boletin/imagenes/26207.pdf>
- Cruz, J. 2015. El sector español de tecnología para la industria cárnica sobrevive al estancamiento de la demanda nacional merced a las exportaciones. *Eurocarne*. V. 1. <https://www.eurocarne.com/boletin/imagenes/23503.pdf>

- Giampaolo-Orlandoni, M. 2012. Gestión de la Calidad: Control Estadístico y Seis Sigma. *Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*. V. 14. ISSN: 1317-0570. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99323311008>
- Güemes-Vera, N. 2007. Utilización de los derivados de cereales y leguminosas en la elaboración de productos cárnicos. *NACAMEH*, V. 1. [http://www.geocities.com/nacameh\\_carnes/index.html](http://www.geocities.com/nacameh_carnes/index.html)
- Idrogo-Torres, Y. Delgado-Tapia, D. 2024. Tecnologías Emergentes Usadas en el Envasado y Procesamiento de Productos Cárnicos Convencionales y No Convencionales. *Ciencia Latina*. I: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i4.12295](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12295)
- Lin, T.-H., Huang, L.-C., Chen, Y.-Y., Lee, L.-C., y Lin, D.-Y. M. 2025. Implementing Process Capability Index (Cpk) for Effective Product Quality Stabilization: The Case of a Lock Manufacturing Company. *Sensors and Materials*, 37(3): 1211–1227.
- Moreno-Pino, M., Cobas-Aguilera, F. y Suárez-Franco, E. 2021. Aplicación de metodología para la realización del control estadístico de la calidad de procesos”, *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS*. <https://www.eumed.net/es/revistas/rilcoDS/25-noviembre21/calidad-procesos>
- Palacios, J. 2003. Función y aplicabilidad del control estadístico de la calidad en los servicios sociales. *Revista Cuadernos de Trabajo Social*. V. 16. ISSN. 0214-0314.
- Pulido-Rojano, A., Ruiz-Lázaro, A. y Ortiz-Ospino, L. 2020. Mejora de procesos de producción a través de la gestión de riesgos y herramientas estadísticas. *Revista de Ingeniería Chilena*. V. 28. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000100056>
- Rey-Rodríguez. J. y Ortiz-Zamora, A. 2024. Estrategias Técnicas y Tecnológicas en el Desarrollo de Productos Cárnicos Saludables: Una Revisión de Literatura y Análisis Bibliométrico. *LIMENTECH CIENCIA Y TECNOLOGÍA ALIMENTARIA*. ISSN Electrónico 2711-3035. V. 22.
- Sánchez-Escalante, A., Torrescano-Urrutia, G., Camou-Arriola, J., González-Méndez, N. y Hernández-Watanabe, G. 2008. Sistemas combinados de conservación para prolongar la vida útil de la carne y los productos cárnicos. *NACAMEH*, V. 2. ISSN: 2007-0373. [Sistemas combinados de conservación para prolongar la vida útil de la carne y los productos cárnicos - Dialnet](#)
- Totosaus, A. 2007. Productos cárnicos emulsionados bajos en grasa y sodio. *NACAMEH*, V. 1. ISSN: 2007-0373. <http://cbs.izt.uam.mx/nacameh/>
- Venegas-Fornias, O. y Valladares-Díaz, C. 1999. Clasificación de los Productos Cárnicos. *Rev Cubana Alimentación y Nutrición*. V. 1.
- Vidal-Lago, J. 1997. Tecnología de los embutidos curados. *Journal of Food*. V. 1. ISSN:1135-8122. <https://doi.org/10.1080/11358129709487572>

## Síntesis verde óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica* y su aplicación en la fotodegradación de colorantes

### Green synthesis of zinc oxide (ZnO) using *Ephedra californica* extracts and its application in dye photodegradation

Quevedo Robles, R.V.<sup>1</sup>, Arce Barajas, A.G.<sup>2</sup>, Cota Leal, M.A.<sup>1</sup>, Ochoa Estrella, F.J.<sup>1</sup>, Luque Morales, P.A.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, C. P.85024, Ciudad Obregón, Sonora México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño-Universidad Autónoma de Baja California, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

\*Corresponding Author: [pluque@uabc.edu.mx](mailto:pluque@uabc.edu.mx)

Recibido: 27 de enero de 2025

Aceptado: 08 de mayo de 2025

#### Resumen

En este trabajo se reporta la síntesis verde de óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos de *Ephedra californica* en concentraciones 1%, 3% y 5% p/v (peso/volumen) los cuales actúan como agentes reductores y estabilizantes, con el objetivo de evaluar su influencia en la formación ZnO. Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Espectroscopia Ultravioleta Visible (UV-Vis). En el espectro de FTIR se observó una banda centrada a 440 cm<sup>-1</sup>, característica del enlace Zn-O, confirmando la formación de ZnO. Asimismo, el análisis de UV-Vis mostró una disminución del bandgap conforme incrementaba la concentración del extracto. La actividad fotocatalítica se evaluó en la degradación de tres colorantes modelo: azul de metileno, naranja de metilo y rodamina B bajo radiación UV. El ZnO sintetizado con 5% de extracto mostró una mayor eficiencia en la degradación del azul de metileno (99.63% en 180 min), mientras que para los otros colorantes se obtuvieron resultados óptimos con concentraciones intermedias. Estos resultados demuestran el potencial de la síntesis verde como una alternativa eco-amigable para la producción de ZnO con aplicaciones en el tratamiento de agua contaminada.

**Palabras clave:** Síntesis verde; óxido de zinc; *Ephedra californica*; fotocatalisis; tratamiento de agua.

#### Abstract

In this work, the green synthesis of zinc oxide (ZnO) using *Ephedra californica* extracts at concentrations of 1%, 3%, and 5% w/v (weight/volume) is reported. The extracts act as reducing and stabilizing agents to evaluate their influence on ZnO formation. The obtained materials were characterized by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Ultraviolet Visible Spectroscopy (UV-Vis). The FTIR spectrum showed a band centered at 440 cm<sup>-1</sup>, characteristic of the Zn-O bond, confirming the formation of ZnO. Likewise, the UV-Vis analysis revealed a decrease in the bandgap as the extract concentration increased. The photocatalytic activity was evaluated in the degradation of three model organic dyes, methylene blue, methyl orange, and rhodamine B, under UV radiation. The ZnO synthesized with 5% extract exhibited the highest efficiency in degrading methylene blue (99.63% in 180 min), while optimal results for the other dyes were obtained with intermediate extract concentrations. These results demonstrate the potential of green synthesis as an eco-friendly, sustainable alternative for producing ZnO with applications in wastewater treatment.

**Keywords:** Green synthesis; zinc oxide; *Ephedra californica*; photocatalysis; water treatment.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para todos los organismos y constituye un componente esencial en los procesos biológicos, agrícolas e industriales. Sin embargo, las actividades antropogénicas han generado una contaminación creciente de los cuerpos de agua, particularmente por el vertido de colorantes provenientes de la industria papelera, cosmética, farmacéutica y textil (Singh & Sinha, 2025). Se estima que más de diez mil tipos de pigmentos y colorantes sintéticos se utilizan actualmente en estas industrias, de los cuales aproximadamente el 15% se desecha en los efluentes (Slama et al., 2021). Estos compuestos presentan estructuras químicas complejas que les confieren alta estabilidad y resistencia a los métodos convencionales de tratamiento, lo que los convierte en contaminantes persistentes y de difícil eliminación (Kayani et al., 2025). La industria textil se ha convertido en la principal causa de contaminación del agua debido al uso de grandes cantidades de colorantes orgánicos. Se estima que en el mundo se producen anualmente más de 70 000 toneladas de colorantes orgánicos, y hasta un 20 % se pierde durante el procesamiento industrial (Al-Tohamy et al., 2022). Esta situación afecta no solo la calidad del agua, sino también la biodiversidad acuática y la salud humana, debido a la bioacumulación y a la toxicidad de los compuestos derivados de su degradación (Barzinjy et al., 2020; Nguyen et al., 2018).

Entre los métodos de tratamiento de aguas residuales se encuentran la coagulación, la adsorción, la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Aunque eficaces, estas técnicas suelen ser costosas, generan subproductos secundarios y no siempre garantizan la completa eliminación de los contaminantes (Mudhoo et al., 2020; My Hanh Le et al., 2022). Frente a estas limitaciones, los procesos avanzados de oxidación, como la fotocatálisis heterogénea, han cobrado relevancia por su capacidad de degradar compuestos orgánicos hasta su mineralización completa, produciendo únicamente dióxido de carbono y agua como subproductos (Yuvaraja et al., 2025).

El óxido de zinc (ZnO) se ha consolidado como un fotocatalizador eficiente gracias a su estabilidad química, biocompatibilidad, bajo costo y capacidad para absorber radiación en la región ultravioleta (Bhaskar & Bhame,

2024). En los últimos años, la síntesis verde de materiales ha surgido como una alternativa sustentable a los métodos químicos tradicionales en la síntesis de ZnO, empleando extractos vegetales ricos en flavonoides, fenoles y otras biomoléculas capaces de reducir y estabilizar nanopartículas metálicas (Al-darwesh et al., 2024). En este contexto, *Ephedra californica* representa una fuente natural promisorio debido a su contenido fitoquímico y su adaptabilidad a condiciones áridas. El presente trabajo propone la síntesis verde de ZnO utilizando extractos de *E. californica* en distintas concentraciones, con el objetivo de evaluar su eficiencia fotocatalítica en la degradación de tres colorantes modelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Preparación de extracto de *Ephedra californica*

Los tallos secos de *Ephedra californica* fueron adquiridos en un supermercado en Baja California, México. El material vegetal se limpió cuidadosamente con agua desionizada para eliminar impurezas superficiales y posteriormente se secó. Una vez seco, se trituró hasta obtener un polvo fino. Para la obtención del extracto de *Ephedra californica*, se pesaron diferentes cantidades del material vegetal (Figura 1), para obtener concentraciones de 1%, 3% y 5%, las cuales se colocaron en 60 mL de agua desionizada. Las mezclas fueron colocadas en agitación magnética durante 2 horas, posteriormente, las suspensiones se colocaron en un baño térmico a 60 °C durante 1 hora para obtener la extracción de compuestos bioactivos como flavonoides, fenoles y alcaloides. El extracto obtenido se filtró utilizando papel Whatman No. 4 y se almacenó para su posterior uso en la síntesis de ZnO.

### Caracterización de ZnO

Las nanopartículas sintetizadas fueron caracterizadas mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La técnica UV-Vis se empleó para identificar el borde de absorción característico del ZnO y estimar la energía de la banda prohibida mediante el método de TAUC. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro Lambda 365 (Perkin Elmer). Por su parte, la técnica FTIR permitió identificar los grupos funcionales asociados al extracto vegetal y confirmar la presencia de enlaces Zn-O. Los espectros se obtuvieron en un espectrofotómetro Perkin Elmer, utilizando el modo ATR en el rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ .

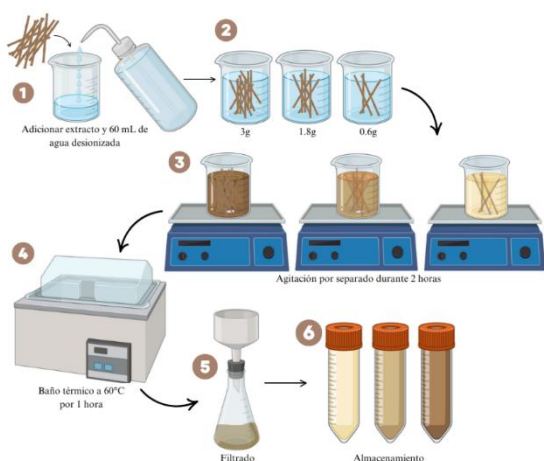


Figura 1. Obtención de extractos.

### Síntesis verde de nanopartículas de ZnO

La síntesis de óxido de zinc se realizó empleando como precursor nitrato de zinc hexahidratado  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . En un vaso de precipitado, se colocaron en agitación magnética 2 gramos de la sal precursora de Zinc en 45 mL del extracto vegetal previamente preparado, Figura 2. La mezcla se mantuvo en agitación constante 1 hora bajo temperatura ambiente. Posteriormente, las soluciones se colocaron en un baño térmico durante 14 horas hasta tener una apariencia caramelizada. Las muestras fueron transferidas a capsulas de porcelana y se calcinaron en una mufla a 400  $^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora. Finalmente, el polvo obtenido fue molido y almacenado para su posterior uso.

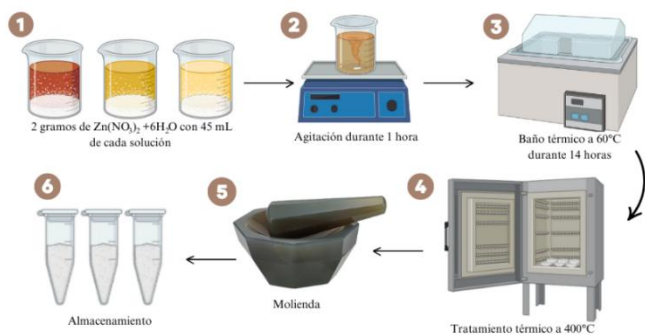


Figura 2. Proceso de síntesis de ZnO.

### Evaluación fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de ZnO se evaluó en la degradación de tres colorantes modelo: azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) y rodamina B (RhB). Se prepararon soluciones acuosas de cada colorante con una concentración de 15 ppm. En un experimento típico, se colocaron 50 mg de ZnO en 50 mL de la solución del colorante y se mantuvo en agitación magnética durante 30 minutos en oscuridad para alcanzar el equilibrio de adsorción-desorción. Posteriormente, las suspensiones se irradiaron con luz ultravioleta (10 W, 18  $\text{mJ cm}^{-2}$ ) durante 180 minutos. Cada 30 minutos se tomaron alícuotas de la solución, las cuales se centrifugaron para separar el catalizador, y el sobrenadante se analizó por espectroscopía UV-Vis a fin de determinar la concentración remanente del colorante. La eficiencia de degradación se calculó mediante la ecuación (Ec.):

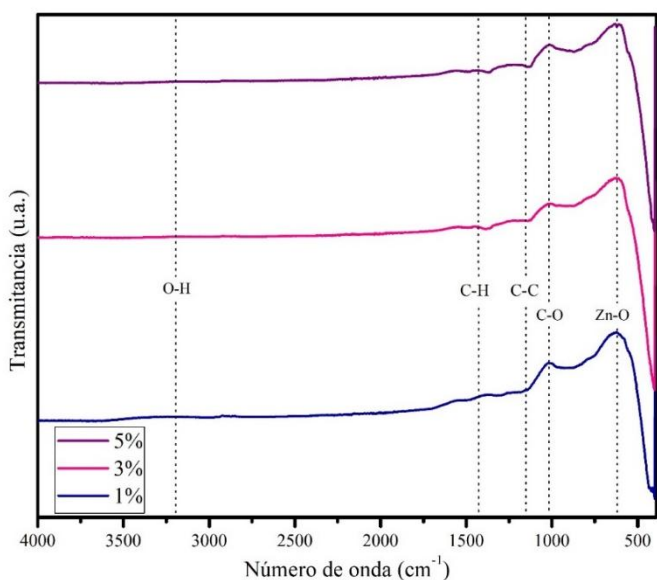
$$\text{Degradación (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:  $C_0$  es la concentración inicial y  $C_t$  es la concentración dependiente del tiempo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se presentan los espectros de absorción infrarroja correspondientes a las tres síntesis de ZnO. La banda centrada en 440  $\text{cm}^{-1}$ , presente en los tres espectros, se atribuye a la vibración del enlace Zn-O, lo que confirma

la formación del óxido de zinc (Vargas et al., 2021). Además, en la región de grupos funcionales y en la región de huellas dactilares, se observan otras bandas de absorción infrarroja asociadas con residuos del extracto vegetal empleado durante la síntesis. La banda centrada en  $3200\text{ cm}^{-1}$  se relaciona con la vibración de estiramiento del enlace O-H, mientras que las señales alrededor de  $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$  se asignan a las vibraciones de estiramiento del enlace C-O. Asimismo, la banda a  $1156\text{ cm}^{-1}$  se asocia al estiramiento del enlace C-C, vinculado con la formación de compuestos fenólicos y aromáticos. Finalmente, la banda observada a  $1426\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a la vibración del enlace C-H (Abizi-Moqadam et al., 2025).



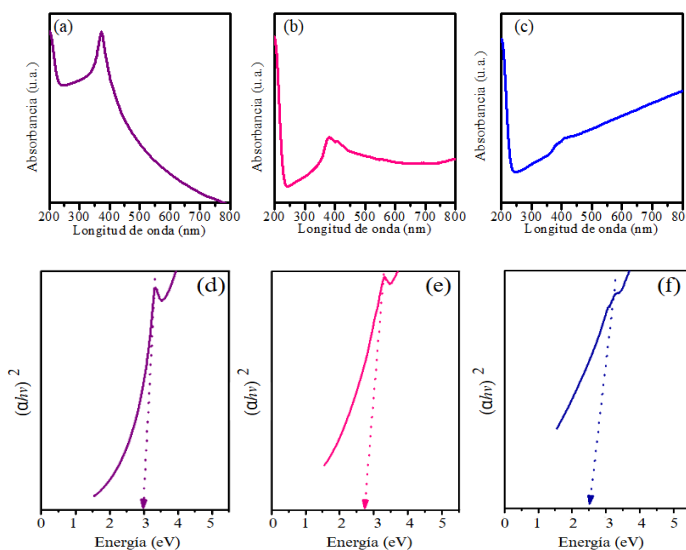
**Figura 3.** Espectro FTIR de nanopartículas de ZnO utilizando concentraciones del extracto de 1%, 3% y 5%.

En la Figura 4 (a-c) se presentan los espectros de absorción del óxido de zinc. Estos muestran con una banda de absorción máxima centrada a 373 nm, 376 nm y 381 nm para las muestras de ZnO sintetizadas con 5%, 3% y 1% p/v de extracto, respectivamente. Esta variación se en el máximo de absorción debe a la cantidad de extracto involucrado en la síntesis (Almarhoon et al., 2022). Posteriormente, se determinó la energía de la banda prohibida ( $E_g$ ), es decir, la energía necesaria para promover un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, empleando el modelo de Tauc Ec.2:

$$(\alpha hv)^{1/n} = B(hv - E_g) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción (Lambert-Beer),  $hv$  es la energía del fotón incidente,  $B$  es una constante,  $E_g$  es la energía de banda prohibida y  $n$  es el tipo de transición electrónica  $n=1/2$ .

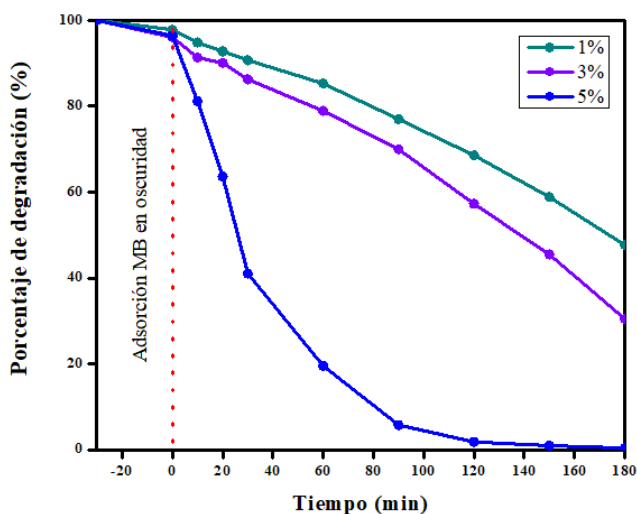
Se determinó un bandgap de 2.98 eV para el ZnO sintetizado con 5% de extracto vegetal (Figura 4 d), mientras que para el ZnO obtenido con 3% de extracto, el valor disminuyó a 2.73 eV (Figura 4 e). Por su parte, el ZnO preparado con 1% de extracto presentó un  $E_g$  de 2.52 eV (Figura 4 f). La disminución observada en la energía de banda prohibida puede atribuirse a la presencia de moléculas orgánicas procedentes del extracto vegetal empleado durante la síntesis (Villegas-Fuentes et al., 2023). Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en estudios recientes, donde los extractos naturales actúan no solo como agentes reductores y estabilizantes, sino también como modificadores ópticos, introduciendo defectos superficiales o niveles intermedios de energía en la estructura del ZnO. Estas alteraciones favorecen la absorción de luz y contribuyen a una mayor eficiencia fotocatalítica (Khan et al., 2025).



**Figura 4.** Espectros UV-Vis de ZnO (a) 5%, (b) 3% y (c) 1%. (d) 5%, (e) 3% y (f) 1% corresponde al modelo de Tauc.

La evaluación de la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de ZnO se realizó con tres colorantes diferentes, azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) y rodamina B (RhB) (Figura 5, 6 y 7), bajo irradiación con luz ultravioleta.

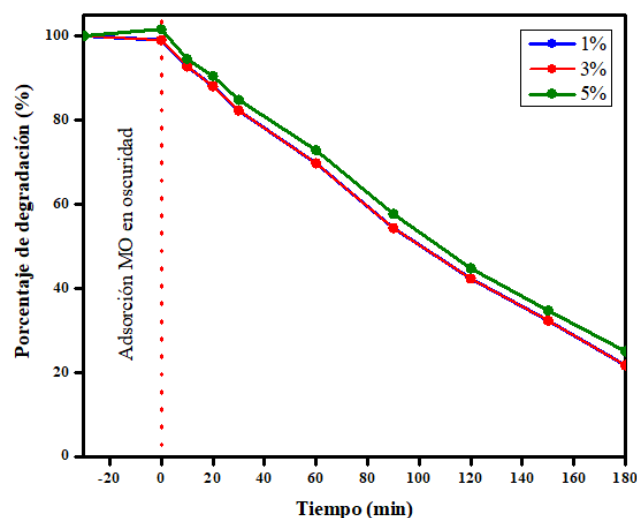
La Figura 5 muestra el comportamiento de la degradación del azul de metileno (MB) en presencia de los distintos fotocatalizadores de ZnO. Después de 20 minutos de irradiación, el ZnO sintetizado con 5% de extracto alcanzó una degradación del 36%, mientras que las muestras obtenidas con 3% y 1% presentaron valores de 10% y 7%, respectivamente. Transcurrida una hora de reacción, la degradación de MB aumentó hasta 81% para el ZnO con la mayor concentración de extracto, en contraste con las muestras sintetizadas con menores concentraciones de *Ephedra*, las cuales mostraron porcentajes inferiores al 21%. Tras 90 minutos de fotocatalisis, se logró una degradación del 94% utilizando ZnO con 5% de extracto, alcanzando un 98% a los 120 minutos y una degradación casi completa (~100%) después de 180 minutos de reacción.



**Figura 5.** Porcentaje de degradación de MB utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

La degradación del naranja de metilo utilizando ZnO biosintetizado con extractos de *Ephedra californica* al 5%, 3% y 1% mostró un incremento gradual en la eficiencia fotocatalítica con el tiempo, alcanzando valores de 75-78% tras 180 minutos de irradiación, Figura 6. A

diferencia de lo observado con el azul de metileno, la concentración del extracto no produjo variaciones en la degradación de MO. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza aniónica y estructura azo del MO, que limita su interacción con la superficie del ZnO. Además, la presencia de residuos orgánicos del extracto podría actuar como barrera parcial en la adsorción del colorante. No obstante, la degradación sostenida confirma la eficacia del ZnO biosintetizado como fotocatalizador verde, cuya actividad depende tanto de la concentración del extracto como de las propiedades estructurales del contaminante.

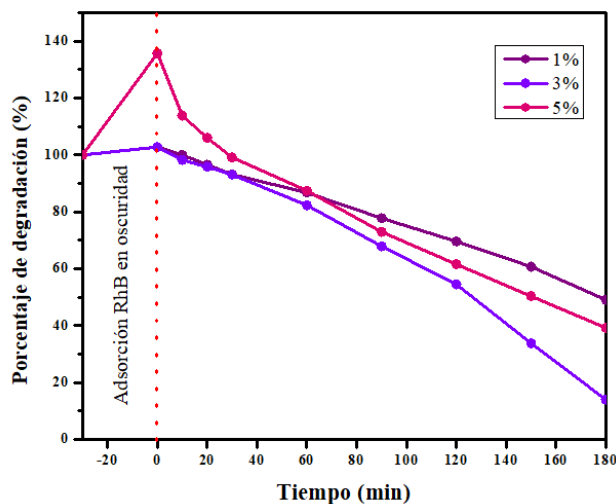


**Figura 6.** Porcentaje de degradación de MO utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

La degradación de rodamina B (RB) utilizando ZnO biosintetizado con extractos de *Ephedra californica* al 1%, 3% y 5% mostró un incremento progresivo con el tiempo (Figura 7), alcanzando una eficiencia máxima de 86% a los 180 minutos para el catalizador con 3% de extracto. En las primeras etapas se observó un incremento en la absorbancia, posiblemente asociados a procesos de adsorción-desorción del colorante sobre la superficie del ZnO antes del equilibrio. La muestra con 3% presentó la mejor actividad fotocatalítica, mientras que las concentraciones más altas o bajas mostraron una ligera disminución en el rendimiento, lo que sugiere un efecto óptimo intermedio del contenido de extracto.

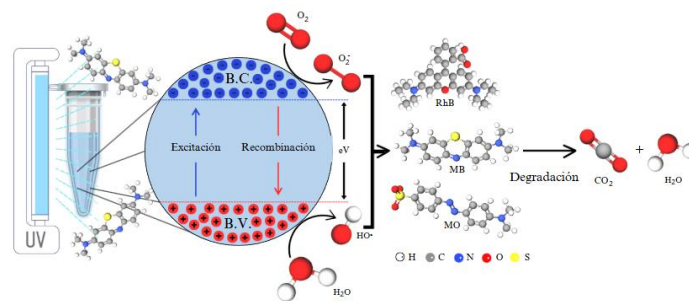
Los estudios de degradación de los colorantes modelo

demonstraron que los materiales de ZnO sintetizados con extracto de *Ephedra californica* presentan una actividad catalítica dependiente tanto de la estructura del colorante como de la concentración del extracto utilizado. Por ello, estos materiales representan una alternativa prometedora para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, como los colorantes.



**Figura 7.** Porcentaje de degradación de RhB utilizando ZnO con diferentes concentraciones de *Ephedra californica*.

En la Figura 8 se muestra mecanismo de fotodegradación de los colorantes. Posterior a la adsorción del colorante en la superficie del ZnO, se irradia con luz ultravioleta. Los electrones de la banda de valencia (B.V. en color rojo) se excitan y pasan a la banda de conducción (B.C. en azul), produciendo un hueco en la B.V. y un electrón en la B.C. Los pares electrón-hueco reaccionan con el H<sub>2</sub>O y el O<sub>2</sub>, se generan reacciones redox sobre la superficie, ayudando a la producción de radicales hidroxilo (HO•) y radicales superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) los cuales reaccionan con los contaminantes degradándolos hasta su mineralización, dióxido de carbono y agua (Shukla et al., 2025; Sulaiman et al., 2025).



**Figura 8.** Propuesta de mecanismo de degradación de los colorantes.

## CONCLUSIÓN

La síntesis verde de nanopartículas de ZnO utilizando extractos de *Ephedra californica* resultó ser un método eficiente, económico y ambientalmente sostenible. La concentración del extracto influye directamente en el rendimiento y las propiedades fotocatalíticas del material. Los materiales de ZnO demostraron una alta capacidad para degradar colorantes, en especial el azul de metileno, evidenciando su potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales. Este trabajo contribuye al desarrollo de estrategias verdes para la producción de ZnO con impacto ambiental positivo.

## REFERENCIAS

Abizi-Moqadam, A., Mortazavi-Derazkola, S., Zare-Bidaki, M., Osmani, F., & Alizadeh, L. (2025). In vitro Investigation of Antimicrobial and Antioxidant Properties of Green Silver Nanoparticles Synthesized Using Ephedra gerardiana Plant Extract. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 26. <https://doi.org/10.2174/0113892010349133241120075750>

Al-darwesh, M. Y., Ibrahim, S. S., & Mohammed, M. A. (2024). A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications. *Results in Chemistry*, 7, 101368. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101368>

Almarhoon, Z. M., Indumathi, T., & Kumar, E. R. (2022). Optimized green synthesis of ZnO nanoparticles:

- Evaluation of structural, morphological, vibrational and optical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(30), 23659–23672. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09125-5>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Barzinjy, A. A., Hamad, S. M., Aydin, S., Ahmed, M. H., & Hussain, F. H. S. (2020). Green and eco-friendly synthesis of Nickel oxide nanoparticles and its photocatalytic activity for methyl orange degradation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(14), 11303–11316. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03679-y>
- Bhaskar, A. R., & Bhame, S. (2024). A review on ZnO and its modifications for photocatalytic degradation of prominent textile effluents: Synthesis, mechanisms, and future directions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112553. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112553>
- Kayani, K. F., Mohammed, S. J., Mustafa, M. S., & Aziz, S. B. (2025). Dyes and their toxicity: Removal from wastewater using carbon dots/metal oxides as hybrid materials: a review. *Materials Advances*, 6(16), 5391–5409. <https://doi.org/10.1039/D5MA00572H>
- Khan, M. M. A., Siddique, S., Khan, M. K. A., Liu, B.-T., & Latif, A. (2025). Barium-doped ZnO nanorods fabricated via Piper nigrum leaf extract: A green route for enhanced photocatalytic efficiency. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 138(1), 413–431. <https://doi.org/10.1007/s11144-024-02742-7>
- Mudhoo, A., Ramasamy, D. L., Bhatnagar, A., Usman, M., & Sillanpää, M. (2020). An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 197, 110587. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110587>
- My Hanh Le, T., Nuisin, R., Mongkolnavin, R., Painmanakul, P., & Sairiam, S. (2022). Enhancing dye wastewater treatment efficiency in ozonation membrane contactors by chloro- and fluoro-organosilanes' functionality on hydrophobic PVDF membrane modification. *Separation and Purification Technology*, 288, 120711. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120711>
- Nguyen, V. N., Tran, D. T., Nguyen, M. T., Le, T. T. T., Ha, M. N., Nguyen, M. V., & Pham, T. D. (2018). Enhanced photocatalytic degradation of methyl orange using ZnO/graphene oxide nanocomposites. *Research on Chemical Intermediates*, 44(5), 3081–3095. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3294-3>
- Shukla, H., Gautam, R., Sushma, & Kumari, N. (2025). A comprehensive review: Photodegradation of dyes with rare earth doped metal oxide nanoparticles for wastewater treatment. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 200, 112593. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2025.112593>
- Singh, R., & Sinha, A. (2025). A critical review of recent advancements in the photocatalysis process, mechanism, and degradation pathways for the removal of phthalates from the contaminated water matrix. *Journal of Environmental Management*, 377, 124663. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124663>
- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Sulaiman, J. M. A., Altalbawy, F. M. A., Kumar, A., Kanjariya, P., Rekha, M. M., Siva Prasad, G. V., Singh, D., Albadr, R. J., Saydaxmetova, S., Bhakuni, P. N., Athab, A. H., Mansoor, A. S., Radi, U. K., Abd, N. S., & Muzammil, K. (2025). Recent advances in carbon nanomaterials:

- Removal, photodegradation and electrochemical detection of tetracycline, a review. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 113897. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.113897>
- Vargas, M. A., Rivera-Muñoz, E. M., Diosa, J. E., Mosquera, E. E., & Rodríguez-Páez, J. E. (2021). Nanoparticles of ZnO and Mg-doped ZnO: Synthesis, characterization and efficient removal of methyl orange (MO) from aqueous solution. *Ceramics International*, 47(11), 15668–15681. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.137>
- Villegas-Fuentes, A., Rosillo-de La Torre, A., Vilchis-Nestor, A. R., & Luque, P. A. (2023). Improvement of the optical, photocatalytic and antibacterial properties of ZnO semiconductor nanoparticles using different pepper aqueous extracts. *Chemosphere*, 339, 139577. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139577>
- Yuvaraja, G., Wen, C.-T., Huang, S.-Y., Wang, Y.-L., Munagapati, V. S., Vijaya, Y., Koteswararao, R., Choi, H. Y., & Sangaraju, S. (2025). Recent advances on TiO<sub>2</sub> based hybrid aerogels for photocatalytic degradation of dyes: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 179, 114649. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114649>

## D-alulosa, Un Alimento Funcional con Características Anticariogénicas: Revisión Bibliográfica

### D-Allulose, a functional food with anticariogenic properties: a literature review

Cavazos López, E.N.<sup>1</sup>, Rubio Ríos, A.<sup>2</sup>, Esquivel, J.C.<sup>3</sup>, Velázquez Manzanares, M.<sup>2</sup>, De la Garza Ramos, M.<sup>4</sup>,  
Flores Flores, D.A.<sup>5</sup>, Torres Reyes, P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarios, Universidad Autónoma de Coahuila.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Unidad Sureste, Saltillo Coahuila 25260, México.

<sup>3</sup>Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León.

<sup>4</sup>Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Coahuila. Unidad Sureste, Saltillo Coahuila, México.

\*Corresponding Author: [enriquecavazos@uadec.edu.mx](mailto:enriquecavazos@uadec.edu.mx)

Recibido: 15 de agosto de 2025

Aceptado: 15 de octubre de 2025

#### Resumen

La caries dental es una enfermedad crónica prevalente asociada con el consumo frecuente de azúcares fermentables y bacterias como *Streptococcus mutans*. En respuesta, los alimentos funcionales y los edulcorantes no cariogénicos han cobrado relevancia, destacando la D-alulosa, un monosacárido de bajo contenido calórico y sabor similar a la sacarosa. Este no es fermentado por bacterias orales, por lo que no genera ácidos ni favorece la formación de biopelícula, además de aportar propiedades antioxidantes y metabólicas beneficiosas. Esta revisión analiza evidencia de estudios in vitro, en animales y humanos que indica que la D-alulosa inhibe el crecimiento bacteriano, reduce la acidez oral y previene la desmineralización dental. Se compara favorablemente con edulcorantes como el xilitol y el sorbitol, sin efectos gastrointestinales adversos a dosis normales y con mejor aceptación sensorial. La seguridad de la D-alulosa ha sido reconocida por la Food and Drug Administration (FDA) y por la Food Standards Australia New Zealand (FSANZ), además de su aprobación en China y América Latina. Sin embargo, la European Food Safety Authority (EFSA) advierte que aún existen vacíos en datos de genotoxicidad y ensayos prolongados. En base a esto, la D-alulosa se perfila como una alternativa prometedora para prevenir la caries y sustituir el azúcar.

**Palabras clave:** Azúcares, Caries dental, *Streptococcus mutans*, D-alulosa, Prevención, Revisión Bibliográfica.

#### Abstract

Dental caries is a prevalent chronic disease associated with the frequent consumption of fermentable sugars and bacteria such as *Streptococcus mutans*. In response, functional foods and non-cariogenic sweeteners have gained relevance, with D-allulose standing out as a low-calorie monosaccharide with a taste like sucrose. It is not fermented by oral bacteria, thus not producing acids or promoting biopelícula formation, and additionally provides antioxidant and metabolic benefits. This review analyzes evidence from in vitro, animal, and human studies indicating that D-allulose inhibits bacterial growth, reduces oral acidity, and prevents dental demineralization. It compares favorably with sweeteners such as xylitol and sorbitol, showing no gastrointestinal side effects at normal doses and better sensory acceptance. The safety of D-allulose has been recognized by the Food and Drug Administration (FDA) of the United States and the Food Standards Australia New Zealand (FSANZ), as well as approved in China and Latin American countries. However, the European Food Safety Authority (EFSA) notes that gaps remain in genotoxicity data and long-term clinical trials. D-allulose emerges as a promising alternative for dental caries prevention and sugar replacement.

**Keywords:** Sugars, Dental caries, *Streptococcus mutans*, D-allulose, Prevention, Literature review.

## INTRODUCCION

La caries dental es una de las enfermedades bucales crónicas más comunes a nivel mundial, y representa un importante desafío para los sistemas de salud pública. Se estima que entre el 90 % y el 95 % de la población mundial ha experimentado caries dental en algún momento de su vida, lo que subraya su alta prevalencia y su impacto en la salud bucodental global (Frencken et al., 2017). La caries es el resultado de un proceso multifactorial que implica la desmineralización progresiva del esmalte dental, causada por ácidos orgánicos producidos por bacterias presentes en la placa dental, especialmente *Streptococcus mutans* y *Lactobacillus*. Estas bacterias metabolizan carbohidratos fermentables, particularmente la sacarosa, produciendo ácidos que disminuyen el pH en la superficie del diente y provocan la pérdida de minerales del esmalte (Fejerskov et al., 2015). Si el proceso no se controla mediante medidas preventivas adecuadas —como la higiene oral, el uso de flúor y la modificación de la dieta, puede progresar hacia capas más profundas del diente, afectando la dentina e incluso la pulpa, generando dolor, infecciones e incluso la pérdida de la pieza dental (Pitts et al., 2017).

Uno de los factores más relevantes en el desarrollo de la caries es el consumo excesivo de azúcares, particularmente en el contexto de estilos de vida modernos caracterizados por una alta ingesta de alimentos ultraprocesados y bebidas azucaradas (Organización Mundial de la Salud, 2025). La evidencia científica ha demostrado que la exposición frecuente a azúcares fermentables aumenta significativamente el riesgo de caries dental, además de contribuir al desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles como obesidad, diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares (Moynihan et al., 2014; Hong et al., 2018). Según el estudio Global Burden of Disease (GBD), una de las principales amenazas para la salud a nivel global es la mala alimentación, combinada con el sedentarismo, factores que contribuyen significativamente a la carga mundial de enfermedades (Abbfati et al., 2020).

Frente a este contexto epidemiológico, los alimentos funcionales han cobrado gran relevancia en las últimas décadas como una estrategia para mejorar la

salud pública (Fekete, 2025). Estos alimentos no solo aportan beneficios nutricionales básicos, sino que también proporcionan efectos positivos sobre funciones específicas del organismo, reduciendo el riesgo de enfermedades o mejorando la calidad de vida (Latham, 2002). Dentro de esta categoría, los edulcorantes alternativos no cariogénicos han ganado especial atención en el ámbito de la odontología, debido a su capacidad de reemplazar al azúcar sin favorecer la proliferación bacteriana ni la producción de ácidos dañinos para el esmalte dental.

Los polioles como el xilitol y el eritritol son ejemplos ampliamente estudiados en la salud bucal. El xilitol ha demostrado ser eficaz en la reducción de caries dentales al inhibir la producción de ácidos por bacterias orales y promover la remineralización dental y se ha reportado que no puede ser metabolizado eficientemente por *S. mutans*, lo que limita su crecimiento y reduce la producción de ácidos (Söderling, 2025). Por su parte, el eritritol ha mostrado una mayor eficacia que el xilitol y el sorbitol en la mejora de la salud oral, reduciendo la acumulación de placa, la acidez y la cantidad de *S. mutans* en saliva y placa dental (Fujii et al., 2025). Sin embargo, recientemente ha surgido una nueva alternativa con alto potencial funcional: la D-alulosa, también conocida como psicosa (Wang et al., 2024). Este azúcar raro ha generado un gran interés a nivel mundial debido a su bajo contenido calórico y sus posibles beneficios para la salud, particularmente en el manejo de la diabetes y la obesidad (Wang et al., 2024). Investigaciones sugieren que la D-alulosa puede ofrecer beneficios como la pérdida de peso, el mejor control glucémico y la reducción de los niveles de insulina (Ruby et al., 2025). Además, estudios han demostrado que la D-alulosa atenúa las concentraciones de glucosa postprandial en personas sanas (Yuma et al., 2023). Estos hallazgos destacan el potencial de la D-alulosa como ingrediente funcional en la salud oral.

La D-alulosa es un monosacárido epímero de la fructosa con un perfil organoléptico muy similar al de la sacarosa, pero con una carga calórica casi nula. Desde el punto de vista odontológico, este azúcar raro no es fermentado por las bacterias cariogénicas, lo que lo convierte en un edulcorante potencialmente

anticariogénico. Han et al. (2020) describen la D-alulosa como un epímero de la fructosa en el carbono C-3, con un sabor que representa aproximadamente el 70 % de la dulzura de la sacarosa y casi sin calorías.

Además, estudios recientes han mostrado que la D-alulosa podría tener propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y efectos positivos sobre el metabolismo de la glucosa, lo cual es especialmente relevante para personas con riesgo de desarrollar diabetes tipo 2 (Chen et al., 2022). Estas propiedades funcionales convierten a la D-alulosa en un candidato prometedor no solo como sustituto del azúcar, sino también como componente activo en estrategias de prevención de enfermedades orales y metabólicas.

En este sentido, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda reducir el consumo de azúcares libres a menos del 10 % de la ingesta calórica total diaria y, de ser posible, mantenerlo por debajo del 5 %, con el fin de mejorar la salud general y bucodental (OMS, 2015). Informar a la población sobre los efectos adversos del consumo excesivo de azúcar, así como promover el uso de edulcorantes alternativos como la D-alulosa, puede contribuir significativamente a la reducción de enfermedades orales y sistémicas, y se alinea con estrategias de salud pública orientadas a fomentar hábitos alimentarios más saludables.

Dado el creciente interés en el desarrollo de alimentos funcionales con propiedades específicas para la salud oral, esta revisión bibliográfica tiene como objetivo analizar las características de la D-alulosa como edulcorante funcional, haciendo énfasis en su potencial anticariogénico. Se abordarán sus propiedades químicas, su metabolismo, los mecanismos por los cuales podría inhibir la formación de caries, así como los estudios disponibles que respaldan su seguridad y eficacia como alternativa a los azúcares tradicionales en la prevención de enfermedades bucodentales.

**Azúcares y salud bucal.** La relación entre el consumo de azúcares fermentables y la caries dental ha sido ampliamente documentada en la literatura científica. El consumo de azúcares libres constituye un factor de riesgo principal para la caries dental, ya que las bacterias presentes en la placa metabolizan estos azúcares para producir ácidos que desmineralizan el esmalte dental (Organización Mundial de la Salud, 2025). Estudios

recientes confirman que una alta ingesta diaria de azúcares simples se asocia con niveles elevados de caries en adultos (Sarmadi et al., 2025). Además, una revisión sistemática realizada en niños de familias de bajos ingresos evidenció una asociación positiva entre el consumo de azúcares añadidos y la experiencia de caries dental (Desrosiers et al., 2025).

En este contexto, resulta relevante considerar que la interacción entre nutrición y salud bucal inicia desde etapas muy tempranas de la vida. Durante el embarazo, los cambios hormonales incrementan la susceptibilidad a enfermedad periodontal y gingivitis, al tiempo que el adecuado estado nutricional materno particularmente hierro, ácido fólico, vitamina D, vitamina B12, calcio y yodo es esencial para el desarrollo craneofacial del feto (Flores y col., 2024). Posteriormente, la lactancia materna aporta no solo nutrientes e inmunoglobulinas fundamentales, sino también estímulos funcionales que favorecen la relación armónica de los maxilares y ejercen un efecto protector frente a maloclusiones. En los primeros dos años de vida, la introducción temprana de azúcares libres, el uso prolongado del biberón y la ausencia de higiene oral desde la erupción dentaria se asocian con la aparición de caries de la primera infancia. Por ello, se subraya la necesidad de un abordaje interdisciplinario entre odontólogos, pediatras y nutriólogos, con el fin de integrar la salud bucal en las estrategias de nutrición materno-infantil como un componente preventivo de gran impacto en la calidad de vida.

La OMS (2015) identifica la caries como uno de los principales problemas de salud bucal a nivel mundial, vinculada directamente al consumo frecuente de carbohidratos fermentables como sacarosa, glucosa y fructosa. Estos azúcares sirven como sustrato para bacterias cariogénicas, especialmente *S. mutans*, que los metabolizan para producir ácidos orgánicos, principalmente ácido láctico, disminuyendo el pH del biopelícula oral por debajo del umbral crítico (aproximadamente 5,5), lo que provoca la desmineralización del esmalte dental (Marsh, 2010).

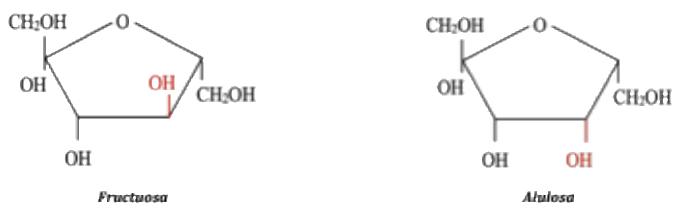
Diversos estudios han mostrado que dietas ricas en azúcares simples se correlacionan con una mayor prevalencia de caries, especialmente en poblaciones pediátricas y en regiones con acceso limitado a servicios de salud bucal (Moynihan et al., 2014). Ante este

panorama, ha surgido un creciente interés por identificar alternativas al azúcar que no solo no contribuyan al desarrollo de caries, sino que incluso puedan ejercer un efecto protector sobre la salud bucal.

**Alimentos funcionales y su papel en la prevención de enfermedades.** El concepto de alimentos funcionales ha evolucionado desde su introducción en Japón en la década de 1980, inicialmente como una estrategia para mejorar la salud pública mediante la incorporación de componentes bioactivos en la dieta (Carrillo, 2024). Estos productos no solo aportan valor nutricional básico, sino que además contienen componentes biológicamente activos que pueden mejorar la salud o reducir el riesgo de enfermedades (Granato et al., 2010). En el contexto de la salud bucal, los alimentos funcionales se han explorado por su capacidad para inhibir la adhesión bacteriana, modular el pH bucal o promover la remineralización dental (Gibson et al., 2006).

Entre los ingredientes funcionales más estudiados con potencial anticariogénico se encuentran los polifenoles, probióticos, caseínas y ciertos edulcorantes no cariogénicos, como el xilitol y, más recientemente, la D-alulosa (D-psicosa), un azúcar raro con propiedades únicas que lo posicionan como un prometedor agente funcional (Kimura et al., 2011).

**D-alulosa: origen, estructura y metabolism.** La D-alulosa es un monosacárido cetohehexosa, isómero de la fructosa, cuya estructura química es  $C_6H_{12}O_6$ . A pesar de tener una composición similar a la fructosa, la D-alulosa presenta diferencias significativas en su metabolismo y efectos fisiológicos. Se encuentra de forma natural en pequeñas cantidades en frutas como higos, pasas y jarabe de arce (Matsuo et al., 2006) (Figura 1)



**Figura 1.** Comparación de la estructura química de la Fructuosa y D-Alulosa

Debido a su baja disponibilidad natural, su producción industrial se realiza a partir de la conversión enzimática de D-fructosa mediante epimerasas,

específicamente D-tagatosa 3-epimerasa (Kim et al., 2006). Debido a su baja disponibilidad natural, la producción industrial de D-alulosa se realiza a partir de la conversión enzimática de D-fructosa mediante epimerasas, principalmente la D-tagatosa 3-epimerasa o D-alulosa 3-epimerasa. Estas enzimas pertenecen a la familia de las ketosa 3-epimerasas y catalizan la epimerización en el carbono 3 (C-3) de la D-fructosa, generando la D-alulosa como su epímero estructural. En el nivel molecular, la enzima induce una inversión de configuración en el C-3 mediante un mecanismo de desprotonación y reprotonación que transcurre a través de un intermediario enediol o enediolato, sin modificar los demás centros quirales del esqueleto hexósico. Este proceso es asistido por residuos catalíticos (como Asp o Glu) que actúan como donadores y aceptores de protones, y por la presencia de cationes metálicos divalentes ( $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  o  $Zn^{2+}$ ) que estabilizan la carga negativa del intermediario y orientan los grupos hidroxilo del sustrato en el sitio activo (Jiang et al., 2020; Wang et al., 2020; Guan et al., 2024).

La reacción es reversible y alcanza un equilibrio en el que típicamente se obtiene entre 20 y 30 % de D-alulosa a partir de D-fructosa. Por ello, los procesos industriales emplean estrategias de optimización enzimática y de bioproceso, tales como la inmovilización de enzimas, la eliminación continua del producto o la ingeniería de mutaciones dirigidas que mejoran la estabilidad térmica, la afinidad por el sustrato o el desplazamiento del equilibrio hacia la formación de D-alulosa. Gracias a estos avances, se ha logrado obtener D-alulosa en cantidades suficientes para su aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y nutracéutica (Patel et al., 2021; Wang et al., 2024). Esta conversión permite obtener D-alulosa en cantidades suficientes para su aplicación en la industria alimentaria y farmacéutica, ya que los avances recientes en métodos biotecnológicos (conversión enzimática e inmovilización de enzimas, mejora de estabilidad térmica, optimización de sustratos y expresión de enzimas en sistemas grado alimenticio) han incrementado tanto los rendimientos como la viabilidad a gran escala de su producción, haciendo posible su uso como edulcorante bajo en calorías y agente funcional en alimentos y productos farmacéuticos (Wang et al., 2024).

Una de las características más destacables de la D-alulosa es su bajo contenido calórico. Aporta aproximadamente 0.2 kcal/g, lo que representa menos del 10% del contenido energético de la sacarosa (Hayashi et al., 2010). Además, tiene un poder edulcorante de aproximadamente el 70% del azúcar de mesa, lo que la convierte en un sustituto atractivo en productos dirigidos a personas con necesidades dietéticas especiales, como diabéticos o individuos con obesidad (Han et al., 2016).

**Propiedades fisiológicas y beneficios metabólicos.** Diversos estudios in vivo e in vitro han explorado los efectos fisiológicos de la D-alulosa, particularmente su influencia en el metabolismo de la glucosa, la regulación del peso corporal y la prevención de enfermedades metabólicas (Tani, et al., 2023). Según Iida et al. (2010) el consumo de D-alulosa reduce la respuesta glucémica postprandial en humanos, probablemente al inhibir la absorción intestinal de glucosa y aumentar la secreción de GLP-1 (péptido similar al glucagón tipo 1), lo que mejora la sensibilidad a la insulina. También se ha demostrado que la D-alulosa puede reducir el almacenamiento de grasa hepática y disminuir la ganancia de peso corporal en modelos animales, lo que sugiere un potencial uso como agente antiobesidad (Matsuo et al., 2002). En este sentido, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) reconoció en 2019 a la D-alulosa como segura (GRAS, por sus siglas en inglés) y la eximió de ser incluida como "azúcar añadida" en las etiquetas nutricionales, reforzando su posición como edulcorante funcional.

#### **Efectos de la D-alulosa sobre la microbiota oral.**

La D-alulosa, aunque estructuralmente similar a la fructosa, presenta un comportamiento metabólico distinto en la placa dental, ya que no es fermentable por *S. mutans*, lo que previene la acidificación del medio bucal y la desmineralización del esmalte dental (Kang et al., 2019; Mukaibo et al., 2022). En un estudio de Kim et al. (2011), se observó que soluciones al 5% de D-alulosa no promovieron la producción de ácido láctico en cultivos de *S. mutans*, en comparación con controles positivos con sacarosa. Asimismo, se reportó una menor adhesión bacteriana sobre superficies dentales tratadas con D-alulosa, lo cual sugiere un efecto inhibitorio sobre la formación de biopelícula. Estos hallazgos son relevantes, ya que la formación de placa bacteriana es un paso

esencial en la progresión de la caries.

Además, algunas investigaciones indican que la D-alulosa podría interferir con la síntesis de glucanos extracelulares mediada por la enzima glucosiltransferasa, lo que compromete la cohesión del biopelícula dental y reduce la virulencia de las bacterias cariogénicas (Kimura et al., 2013). Si bien estos resultados aún deben ser validados en estudios clínicos a gran escala, representan un avance significativo en la búsqueda de edulcorantes con funciones más allá de la simple sustitución calórica.

**Comparación con otros edulcorantes no cariogénicos.** El xilitol ha sido durante décadas el principal referente de edulcorante no cariogénico, respaldado por múltiples estudios que demuestran su capacidad para reducir la incidencia de caries, inhibir el crecimiento de *S. mutans* y estimular el flujo salival. Sin embargo, su uso puede estar limitado por efectos laxantes a dosis elevadas (Söderling et al., 2025). En comparación, la D-alulosa no ha mostrado efectos gastrointestinales adversos significativos a las dosis comúnmente empleadas en alimentos, y su perfil sensorial es más cercano al de la sacarosa, lo que podría facilitar su aceptación por parte del consumidor (Iida et al., 2010). Además, a diferencia de algunos polialcoholes como el sorbitol o el manitol, la D-alulosa no presenta fermentación colónica significativa, reduciendo el riesgo de flatulencias o malestar intestinal (Livesey, 2003).

No obstante, se requieren más estudios clínicos controlados para comparar directamente la eficacia anticariogénica de la D-alulosa frente a otros sustitutos del azúcar y establecer recomendaciones específicas sobre su dosificación y frecuencia de uso en productos bucales y alimenticios.

**Aplicaciones tecnológicas y alimentarias.** Desde el punto de vista tecnológico, la D-alulosa posee propiedades fisicoquímicas que la hacen viable para su uso en múltiples matrices alimentarias. Es altamente termoestable, soluble en agua y su punto de fusión permite su uso en productos horneados, bebidas, postres y chicles sin alterar significativamente el perfil sensorial. De hecho, la D-alulosa se caracteriza por una solubilidad elevada en agua (Jiang et al., 2020), y su punto de fusión reportado en estudios cristalográficos es de aproximadamente 96 °C (Jiang et al., 2020). Además, variantes de la enzima

epimerasa que la sintetizan han sido desarrolladas con alta termocidad, manteniendo actividad residual significativa a 70–80 °C durante tiempos prolongados (Wang et al., 2024; Cui et al., 2025).

En la industria de la confitería, la incorporación de D-alulosa en caramelos o gomas de mascar ha demostrado ser efectiva para reducir el potencial cariogénico de estos productos, sin comprometer su textura ni sabor (Hayashi et al., 2010). También su combinación con otros ingredientes funcionales, como probióticos o fosfopéptidos de caseína, podría potenciar su efecto preventivo frente a la caries dental. Los probióticos han demostrado en estudios *in vitro* e *in vivo* capacidad para inhibir *S. mutans* y reducir la formación de placa dental (Zhang et al., 2024) y los fosfopéptidos de caseína con fosfato cálcico (CPP-ACP) tienen actividad reconocida de remineralización del esmalte dental y antibiótica sobre biopelículas en revisiones recientes (Gaicaman et al., 2023).

La inclusión de D-alulosa en productos de uso odontológico, como pastas dentales o enjuagues, ha sido propuesta, aprovechando su capacidad para modular la flora oral sin inducir efectos cariogénicos. Aunque aún no se han desarrollado productos comerciales ampliamente evaluados con esta composición, estudios recientes *in vitro* han demostrado que la D-alulosa puede alterar favorablemente la formación de biopelícula y la estructura ecológica de bacterias cariogénicas, lo que abre una línea de innovación prometedora para la formulación de productos para la salud bucal (Han et al., 2025).

**Evaluación toxicológica y seguridad del consumo.** La seguridad del consumo de D-alulosa ha sido evaluada en diversos estudios toxicológicos en animales y humanos. En modelos murinos, no se observaron efectos adversos a dosis de hasta 5 g/kg/día durante períodos prolongados (Matsuo et al., 2006). En humanos, la ingesta diaria recomendada varía entre 0.4 y 0.9 g/kg/día, dependiendo del peso corporal y la sensibilidad individual, sin que se hayan reportado efectos secundarios significativos a corto o mediano plazo (Iida et al., 2010).

La D-alulosa ha sido reconocida por la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) con el estatus de "Generalmente Reconocida como Segura" (GRAS), lo que permite su uso en alimentos sin restricciones específicas en EE. UU.

(FDA, 2017). Esta aprobación se basa en evaluaciones científicas que respaldan su seguridad como sustituto del azúcar en diversos productos alimenticios. De manera similar, en Japón, la D-alulosa ha sido autorizada como ingrediente alimentario seguro, lo que permite su inclusión en alimentos sin necesidad de aprobaciones adicionales (Food Standards Australia New Zealand, 2024). En Corea del Sur, también se ha aprobado como nuevo ingrediente alimentario, facilitando su incorporación en productos comerciales (CIRS Group, 2025). Esta aceptación internacional ha impulsado la producción y disponibilidad de D-alulosa en mercados globales, favoreciendo su uso en bebidas, postres, chicles y productos horneados, sin alterar significativamente su perfil sensorial.

**Evidencia científica de las propiedades anticariogénicas de la D-alulosa.** Recientemente, la D-alulosa ha captado la atención por sus posibles propiedades anticariogénicas. Este texto revisa la evidencia científica disponible sobre los efectos de la D-alulosa en la inhibición de la caries dental, analizando estudios *in vitro* e *in vivo*, mecanismos de acción, y comparaciones con otros agentes anticaries.

**Estudios *in vitro*.** Los estudios *in vitro* han proporcionado valiosa información sobre la interacción entre la D-alulosa y las bacterias orales. Un estudio realizado por Ruby et al. (2025) investigó el efecto de la D-alulosa, la sucralosa y el xilitol sobre la producción de ácido por células de *S. mutans*. Los resultados mostraron que ninguno de estos edulcorantes produjo una caída sostenida del pH por debajo del umbral crítico de 5.5, lo que indica que no son cariogénicos en comparación de azúcares tradicionales. En un estudio anterior, Iida et al. (2013) evaluaron el potencial cariogénico de la D-alulosa en un modelo *in vitro* que simulaba formación de placa dental. Los resultados sugirieron que la D-alulosa no favorece la caída de del pH en la placa dental, lo que implica que no desarrolla caries. Otro estudio *in vitro* llevado a cabo por Hasibul et al. (2018) analizó la capacidad de la D-alulosa para interferir con la formación de biopelículas de *S. mutans*. Los resultados indicaron que la D-alulosa redujo de forma significativa la masa de la biopelícula, sugiriendo que este azúcar raro podría tener un papel preventivo en la acumulación de la placa dental.

**Estudios *in vivo*.** La evidencia *in vivo* también respalda el potencial anticariogénico de la D-alulosa. Durso et al. (2014) realizaron un estudio en ratas alimentadas con una dieta cariogénica suplementada con D-alulosa, después de un periodo de ocho semanas, las

ratas del grupo experimental presentaron un número significativamente menor de lesiones de caries en comparación con las del grupo control que no recibió D-alulosa. En otro estudio en roedores, Hayashi et al. (2010) compararon la incidencia de caries en animales alimentados con sacarosa, xilitol y D-alulosa. Los resultados mostraron que la D-alulosa ofrecía un efecto protector similar al del xilitol, con una menor colonización de bacterias cariogénicas en la cavidad oral.

**Mecanismos propuestos de acción anticariogénica.** Los mecanismos mediante los cuales la D-alulosa ejerce sus efectos anticariogénicos son múltiples y aún se encuentran en estudio. Sin embargo, la literatura científica ha propuesto diversas hipótesis plausibles, entre las que destacan las siguientes:

**Inutilización metabólica por bacterias orales.** Uno de los mecanismos más relevantes es la inutilización metabólica parcial. A diferencia de la glucosa y la fructosa, la D-alulosa induce una producción significativamente menor de ácido por *S. mutans* en ensayos in vitro, lo que sugiere que esta bacteria no la metaboliza de manera eficiente. En el estudio de Han et al. (2025), se observó que los biopelículas cultivados con D-alulosa presentaron un crecimiento bacteriano más lento, menor producción de ácido y una síntesis reducida de polisacáridos extracelulares, en comparación con biopelículas expuestos a azúcares fermentables como la glucosa o la fructosa. Estos hallazgos indican que la D-alulosa no actúa como fuente significativa de ácidos orgánicos responsables de la desmineralización del esmalte dental.

**Inhibición competitiva del transporte de azúcares.** La D-alulosa podría competir con otros azúcares por los transportadores bacterianos sin ser utilizada como fuente energética. Aunque no se ha demostrado todavía en *S. mutans* un mecanismo confirmado de competencia por transportadores, investigaciones recientes sobre el microbioma intestinal evidencian que numerosas bacterias carecen de la enzima AlsE, necesaria para metabolizar D-alulosa, por lo que esta no se utiliza como fuente de carbono (Xu et al., 2025). Este posible mecanismo de competencia impediría la entrada eficiente de carbohidratos fermentables en las bacterias, reduciendo así la producción intracelular de ácido en aquellos sistemas donde los transportadores muestran afinidad por ambas moléculas.

**Disrupción de la síntesis de polisacáridos extracelulares.** Se ha observado que la D-alulosa puede interferir en la síntesis de glucanos insolubles que constituyen parte esencial de la matriz de la biopelícula dental (Miyasawa-Hori et al., 2016). Esta inhibición limita la adhesión bacteriana y la maduración del biopelícula, procesos fundamentales en la patogénesis de la caries.

**Modulación del pH oral.** Debido a que la D-alulosa no es fermentada por la microbiota oral, contribuye a mantener un pH más neutro en la cavidad bucal. Este efecto resulta crucial para prevenir la desmineralización del esmalte, fenómeno que ocurre principalmente cuando el pH desciende por debajo de 5.5 (Larsen et al., 2023).

**Inhibición del crecimiento bacteriano (especialmente de *S. mutans*).** *S. mutans* es considerado el principal agente etiológico en la formación de caries dental debido a su capacidad para adherirse a las superficies dentales, producir ácido láctico mediante la fermentación de carbohidratos y formar biopelículas resistentes que favorecen su persistencia. Un metaanálisis reciente demostró que la prevalencia y abundancia de *S. mutans* es significativamente mayor en individuos con caries activa que en aquellos libres de la enfermedad, confirmando su papel central en la patogénesis dental (Mazurel et al., 2025). Estudios previos han mostrado que la D-alulosa inhibe significativamente el crecimiento de *S. mutans*. Según Kim et al. (2013), este efecto se debe principalmente a que la bacteria no puede metabolizar la D-alulosa como fuente de energía. En medios donde la D-alulosa fue la única fuente de carbono, el crecimiento de *S. mutans* fue mínimo en comparación con glucosa o sacarosa. Asimismo, se ha reportado que la D-alulosa reduce la expresión de genes asociados con la síntesis de glucanos insolubles *gtfB*, *gtfC* y *gtf*, esenciales para la adherencia y acumulación bacteriana sobre la superficie dental (Li et al., 2017).

**Reducción en la producción de ácido.** Uno de los efectos más importantes de la D-alulosa es la disminución de la producción de ácido por parte de bacterias orales. Estudios in vitro han mostrado que *S. mutans* expuesta a D-alulosa produce una caída del pH mucho menos pronunciada que cuando se fermentan azúcares tradicionales como la glucosa o la sacarosa, lo que indica una menor producción de ácido láctico (Ruby et al., 2025). La generación de ácidos orgánicos, principalmente ácido

láctico, resulta del metabolismo de carbohidratos fermentables por *S. mutans* y diversas especies de *Lactobacillus*; por tanto, la reducción inducida por la D-alulosa sugiere un potencial efecto protector frente a la desmineralización del esmalte dental. En cultivos bacterianos, la sustitución de glucosa o sacarosa por D-alulosa produjo una disminución significativa de la acidificación del medio (Hayashi et al., 2010), hallazgo coherente con su naturaleza no fermentable y su contribución a la estabilidad del pH oral, disminuyendo el riesgo de progresión de lesiones cariosas.

**Efecto sobre la formación de biopelículas.** La formación de biopelículas dentales es un paso clave en el desarrollo de la caries. *S. mutans* sintetiza polisacáridos extracelulares a partir de sacarosa, lo que le permite adherirse firmemente al esmalte y agregarse con otras bacterias. Zhang et al. (2022) demostraron que la sacarosa regula selectivamente la síntesis de polisacáridos en *S. mutans* mediante el regulador GcrR, afectando la formación de glucanos extracelulares esenciales para la adhesión y estructuración de las biopelículas. Estudios in vitro han confirmado que la D-alulosa reduce la formación de biopelículas de manera dosis-dependiente. Miyasawa-Hori et al. (2016) reportaron que concentraciones del 2 % de D-alulosa disminuyeron significativamente la masa total del biopelícula y la viabilidad bacteriana. Este efecto se atribuye, en parte, a la interferencia en la producción de glucanos insolubles, esenciales para la cohesión del biopelícula. Además, la D-alulosa podría alterar la expresión de genes relacionados con la adhesión bacteriana y la síntesis de la matriz extracelular, como *spaP* y *gbpB* (Zheng et al., 2018).

**Comparación con otros agentes anticaries.** El xilitol y el sorbitol son polioles ampliamente estudiados por sus efectos anticariogénicos. Ambos han demostrado reducir el número de bacterias cariogénicas y disminuir la incidencia de caries en estudios clínicos. En una revisión sistemática y metaanálisis reciente, Song et al. (2024) encontraron que tanto el xilitol como el sorbitol tuvieron un efecto significativo en la prevención de caries dentales en dientes permanentes de niños y adolescentes, en comparación con placebo o sin tratamiento.

**Comparación con xilitol.** El xilitol es considerado el estándar de oro entre los azúcares no cariogénicos. Es fermentado muy lentamente por *S. mutans*, lo que limita

la producción de ácido. Además, se ha documentado que el consumo regular de xilitol reduce la cantidad de *S. mutans* en saliva y placa dental (Mäkinen, 2010). La D-alulosa muestra un mecanismo de acción similar al de los polioles como el xilitol, aunque con diferencias notables. Mientras que el xilitol ejerce principalmente un efecto bacteriostático, inhibiendo el crecimiento de bacterias cariogénicas, la D-alulosa parece interferir directamente en la formación del biopelícula y en la síntesis de glucanos, con un impacto más marcado en la arquitectura de la biopelícula. En el estudio de Han et al. (2025), los biopelículas formados en presencia de D-alulosa mostraron una menor producción de exopolisacáridos, una estructura menos densa y microcolonias menos desarrolladas en comparación con los biopelículas inducidos por azúcares fermentables como la sacarosa o la glucosa, lo que evidencia que la D-alulosa afecta tanto el crecimiento bacteriano como la organización tridimensional de la biopelícula. En estudios comparativos, como el de Hayashi et al. (2010), se observó que ambos compuestos reducían la incidencia de caries en modelos animales, aunque el xilitol fue ligeramente más eficaz en la reducción de colonias de *S. mutans*.

**Comparación con sorbitol.** El sorbitol es menos eficaz que el xilitol y la D-alulosa en la prevención de la caries. Aunque su fermentación es más lenta que la de la sacarosa, existe evidencia clínica y experimental que indica que ciertas cepas de *S. mutans* y *Lactobacillus* pueden, tras periodos prolongados de exposición o adaptación, metabolizar parcialmente sorbitol y recuperar cierta capacidad acidogénica (Mickenautsch, 2020; Liang et al., 2024). Por el contrario, la D-alulosa presenta un perfil distinto: estudios in vitro recientes muestran que no induce una caída sostenida del pH por debajo del umbral crítico y que reduce la producción de ácidos y la formación y densidad de la matriz del biopelícula, sin evidencias hasta la fecha de un fenómeno de “adaptación” bacteriana análogo al observado con sorbitol (Han et al., 2025; Ruby, et al., 2025). Además, revisiones sistemáticas recientes señalan que, si bien los polioles en general incluido el sorbitol ofrecen beneficios frente a los azúcares fermentables, la magnitud del efecto preventivo varía entre compuestos y favorece a agentes como el xilitol y, emergentemente, a la D-alulosa por su menor potencial fermentable y sus efectos moduladores sobre la

arquitectura del biopelícula (Song et al., 2024; Liang et al., 2024).

Estos hallazgos posicionan a la D-alulosa como un potencial sustituto no cariogénico con ventajas frente a los polioles tradicionales, al mostrar una menor fermentabilidad y un efecto más directo sobre la estructura del biopelícula.

**Ventajas y limitaciones.** En comparación con otros edulcorantes no calóricos como el aspartamo, la sucralosa o la stevia, la D-alulosa posee una ventaja sensorial importante: su sabor es muy similar al de la sacarosa, sin el retrogusto amargo o metálico que puede presentarse con algunos edulcorantes artificiales o naturales. Esta característica la hace más aceptable para los consumidores y mejora la palatabilidad de los productos formulados con ella.

Adicionalmente, en modelos animales y humanos se ha observado que la D-alulosa podría tener efectos beneficiosos sobre el metabolismo de la glucosa y la regulación del peso corporal. Por ejemplo, un estudio en ratas con dieta alta en grasa mostró que la administración de D-alulosa atenuó el aumento de peso, mejoró la sensibilidad a la insulina y mitigó la acumulación de triglicéridos hepáticos (Cayabyab et al., 2024). Esto no solo la posiciona como un candidato interesante en alimentos para pacientes con diabetes tipo 2, sino que también refuerza su utilidad como componente en estrategias preventivas contra enfermedades crónicas, al reducir la exposición a azúcares cariogénicos sin sacrificar sabor.

Otra ventaja relevante es su estabilidad térmica. A diferencia de algunos edulcorantes sintéticos que pueden degradarse bajo condiciones de cocción, la D-alulosa conserva sus propiedades edulcorantes incluso a temperaturas elevadas, lo que la hace adecuada para procesos de horneado y cocción sin riesgo de generar compuestos tóxicos ni perder eficacia dulce (Zhao et al., 2025). Esto facilita su integración en una amplia variedad de productos alimentarios sin necesidad de ajustes formulativos drásticos.

**Posibles efectos adversos o consideraciones toxicológicas.** A pesar de los numerosos beneficios descritos anteriormente, es importante considerar los posibles efectos adversos y las implicaciones toxicológicas del consumo de D-alulosa. Aunque su perfil

de seguridad ha sido evaluado por distintas agencias regulatorias, como la FDA (que la reconoce como GRAS, Generally Recognized As Safe), aún existen aspectos que requieren mayor evidencia a largo plazo. Los estudios toxicológicos recientes han demostrado que la D-alulosa es bien tolerada en humanos cuando se consume en dosis moderadas, sin evidencia de efectos adversos graves. En un ensayo clínico aleatorizado, doble ciego y controlado con placebo, se evaluó la tolerancia gastrointestinal de la D-alulosa en niños, observándose únicamente molestias leves y transitorias (Risso et al., 2024). De manera similar, un estudio en adultos reportó que el consumo diario de 15 g de D-alulosa durante 12 semanas no alteró significativamente la composición del microbioma intestinal ni incrementó la presencia de patógenos entéricos, confirmando su perfil de seguridad (Park et al., 2024). Sin embargo, se han documentado síntomas gastrointestinales leves en algunos participantes, tales como hinchazón, flatulencia y diarrea, especialmente tras la ingesta de cantidades elevadas en un corto período (Iida et al., 2008). Estos efectos son consistentes con los observados en otros polioles o azúcares no absorbidos y se atribuyen a la fermentación colónica mediada por la microbiota intestinal (Sato et al., 2025; Wojtuś et al., 2022).

En cuanto al equilibrio microbiano intestinal, un ensayo clínico aleatorizado y controlado con placebo que evaluó el consumo de 15 g de D-alulosa diarios durante 12 semanas no evidenció cambios significativos en la diversidad microbiana ni en la abundancia de bacterias patógenas, sugiriendo ausencia de disbiosis detectable (Park et al., 2024). No obstante, estudios en modelos animales han indicado que la exposición prolongada podría modificar la composición de la microbiota, con implicaciones aún no completamente claras para la salud general (Hossain et al., 2011).

Respecto a la toxicidad sistémica, estudios preclínicos en ratas y ratones no han mostrado efectos adversos relevantes incluso a dosis elevadas. Un estudio de 90 días con dosis orales repetidas de hasta 5 000 mg/kg/día reportó únicamente cambios menores, estableciendo este nivel como NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) (An et al., 2019). De manera similar, un estudio de teratogenicidad prenatal en ratas SD administró dosis de 1 250, 2 500 y 5 000 mg/kg/día

durante el periodo crítico de gestación y no encontró malformaciones ni efectos adversos maternos o fetales, confirmando un NOAEL de 5 000 mg/kg/día (Sa et al., 2022).

Se recomienda precaución en poblaciones vulnerables, como niños pequeños, mujeres embarazadas y personas con enfermedades gastrointestinales, hasta contar con evidencia más robusta. Por ejemplo, un estudio en niños de 6 a 8 años reportó que dosis de 2,5 y 4,3 g de D-alulosa administradas con alimentos fueron bien toleradas, con efectos adversos leves o moderados; sin embargo, no se evaluó exposición prolongada ni se incluyeron niños más jóvenes o sujetos con trastornos intestinales (Risso et al., 2024). Asimismo, la opinión de la EFSA (2025) sobre la D-alulosa como novel food señala lagunas en los datos relativos a su uso durante el embarazo y en poblaciones especiales, lo que impide establecer su seguridad con certeza en todos los contextos.

Un aspecto crítico aún en evaluación es el potencial efecto acumulativo de la D-alulosa cuando se consume junto con otros edulcorantes. La combinación con eritritol, xilitol u otros sustitutos puede incrementar la fermentación colónica y los síntomas gastrointestinales, debido a efectos osmóticos similares (Wölnerhanssen et al., 2025). Además, la D-alulosa puede competir con otros azúcares por transportadores intestinales como GLUT5 y GLUT2, lo que podría alterar la absorción y metabolismo de compuestos concomitantes (Franchi et al., 2021; Teyssere et al., 2023). Por estas razones, aunque la D-alulosa es generalmente segura, su combinación con otros edulcorantes debe considerarse con cautela, especialmente en individuos con sensibilidad gastrointestinal o condiciones metabólicas específicas (Zhao et al., 2025). Se recomienda la supervisión profesional y establecer límites de ingesta segura considerando el consumo total de edulcorantes, particularmente en dietas especiales o en productos “libres de azúcar” que contienen múltiples sustitutos.

**Limitaciones en la investigación actual.** Pese a las múltiples propiedades potencialmente beneficiosas descritas, la investigación sobre la D-alulosa aún presenta limitaciones importantes que deben ser reconocidas para evitar conclusiones prematuras o sobregeneralizaciones. Una de las principales limitaciones es la escasez de estudios clínicos a largo plazo que evalúen sus efectos en

poblaciones humanas diversas, especialmente en relación con su impacto sobre la salud bucodental. Gran parte de la evidencia disponible sobre los efectos biológicos y metabólicos de la D-alulosa proviene de estudios in vitro o en modelos animales, los cuales, aunque útiles para establecer hipótesis y mecanismos de acción, no siempre se traducen directamente a escenarios clínicos reales. Estas investigaciones han permitido identificar posibles beneficios metabólicos y antiinflamatorios; sin embargo, presentan limitaciones significativas en su extrapolación a humanos debido a diferencias fisiológicas, dosis experimentales elevadas y condiciones controladas difíciles de replicar en contextos clínicos (Daniel et al., 2022).

La falta de ensayos clínicos controlados, doble ciego y con muestras representativas limita la capacidad de generalizar los resultados sobre sus posibles efectos anticariogénicos, por lo que su papel debe considerarse aún como potencial. Investigaciones recientes sugieren que la D-alulosa podría interferir con la adhesión bacteriana y la síntesis de polisacáridos extracelulares, contribuyendo a un ambiente bucal menos propicio para el desarrollo de caries (Yoshii et al., 2022). No obstante, estos hallazgos derivan principalmente de estudios in vitro, cuyas condiciones experimentales no reproducen completamente el entorno oral humano. Asimismo, los estudios que abordan su efecto en la cavidad oral suelen ser de corta duración o con muestras pequeñas, lo que impide establecer relaciones causales concluyentes (FDA, 2020).

Otra limitación relevante se relaciona con la heterogeneidad metodológica entre los estudios disponibles. Las diferencias en las concentraciones empleadas, los métodos de administración, las matrices alimentarias y los modelos experimentales dificultan la comparación entre investigaciones y la sistematización del conocimiento existente. Además, se requiere alcanzar un consenso sobre las dosis efectivas y seguras que permitan obtener beneficios fisiológicos sin riesgos adversos, lo cual todavía no ha sido claramente definido en la literatura científica reciente. (Tabla 1).

También se ha señalado la necesidad de investigaciones que aborden la interacción de la D-alulosa con otros componentes de la dieta y del entorno oral. Por ejemplo, aún se desconoce en gran medida cómo este

monosacárido actúa en presencia de otros azúcares, minerales o proteínas salivales, y si su potencial acción anticariogénica se mantiene en contextos alimentarios complejos. Además, existe un vacío importante respecto a su efecto sobre la remineralización del esmalte dental, aspecto que podría ser clave para justificar su uso con fines terapéuticos y no solo preventivos.

En este sentido, la Food and Drug Administration (FDA, 2020) concluye que la D-alulosa presenta un bajo potencial cariogénico, ya que no induce una disminución del pH de la placa dental por debajo de 5.7, umbral asociado con la desmineralización del esmalte. Sin embargo, no existen hasta la fecha ensayos clínicos bien controlados que demuestren un efecto restaurador del esmalte dental, lo que impide clasificar a la D-alulosa como un agente terapéutico remineralizante.

Desde una perspectiva regulatoria y tecnológica, otro desafío radica en la limitada disponibilidad de la D-alulosa en varios países, así como en los altos costos de producción que obstaculizan su adopción a gran escala en la industria alimentaria. Según Wang et al., (2024), los procesos de obtención de D-alulosa incluida la conversión enzimática, los sistemas de purificación de alta pureza y los requerimientos tecnológicos-energéticos presentan costos significativamente mayores que los de los edulcorantes convencionales, lo que limita su competitividad y su presencia en mercados sensibles al precio.

Si bien se han desarrollado tecnologías emergentes para su síntesis a partir de D-fructosa mediante enzimas como la D-tagatosa-3-epimerasa, su aplicación industrial todavía enfrenta obstáculos técnicos y económicos que restringen su escalabilidad (Izumori, 2002). Esto constituye una limitante práctica para su uso extensivo como sustituto del azúcar en productos comerciales, particularmente en regiones con infraestructuras limitadas o bajos recursos.

Asimismo, la investigación científica sobre la D-alulosa se ha concentrado mayoritariamente en Asia, especialmente en Japón y Corea del Sur, lo que genera un sesgo geográfico significativo. La extrapolación de los resultados obtenidos en esas poblaciones hacia otras con distintos hábitos dietéticos, perfiles genéticos y condiciones ambientales debe realizarse con cautela. La escasez de estudios en contextos latinoamericanos,

africanos o europeos limita la comprensión integral de su efectividad y seguridad en escenarios culturales y dietéticos diversos (Wang et al., 2024). Esta disparidad se debe, en parte, a que la mayoría de las investigaciones recientes provienen de Asia o Norteamérica, donde las condiciones dietéticas, composición del microbioma oral, hábitos de higiene bucal y regulaciones sanitarias difieren considerablemente de otras regiones, lo que podría influir en los resultados obtenidos.

## CONCLUSIONES

La D-alulosa se perfila como una alternativa funcional y segura en el abordaje preventivo de la caries dental, una enfermedad que continúa afectando significativamente a la población mundial, especialmente en países en desarrollo. Su estructura química única y su incapacidad para ser fermentada por bacterias cariogénicas como *S. mutans* le confieren un perfil no cariogénico que contribuye a la preservación del esmalte dental. Además, su bajo contenido calórico y su capacidad para modular los niveles de glucosa la posicionan como un edulcorante favorable en contextos metabólicos, ampliando sus beneficios más allá del ámbito bucodental.

El creciente interés por los alimentos funcionales y el desarrollo de productos “seguros para los dientes” abren una oportunidad valiosa para incorporar la D-alulosa tanto en la industria alimentaria como en productos de higiene oral. Sin embargo, aunque la evidencia preliminar respalda sus propiedades anticariogénicas y su utilidad como sustituto del azúcar, aún se requiere consolidar estos hallazgos mediante estudios clínicos robustos que evalúen su eficacia en distintas poblaciones y a largo plazo.

En este sentido, la D-alulosa no solo representa una innovación en la prevención de enfermedades orales, sino también una herramienta potencial en la promoción de estilos de vida más saludables. Su incorporación en estrategias de salud pública podría contribuir significativamente a reducir la carga global de la caries dental, favoreciendo así una mejor calidad de vida desde un enfoque integral y preventivo.

**Tabla 1.** Comparativa de estudios sobre la capacidad anticariogénica de la D-alulosa

| Referencia                                     | Tipo de estudio                      | Metodología principal  | Modelo de administración               | Medio de prueba                    | Hallazgos principales  | Limitaciones reportadas  |
|--|--------------------------------------|--|--|------------------------------------|--|--|
| Yoshii et al. (2022) <i>Front. Microbiol.</i>  | <i>In vitro</i>                      | Cultivo de <i>S. mutans</i> y cuantificación de polisacáridos extracelulares | Solución acuosa con D-alulosa al 5–10% | Medio BHI (Brain Heart Infusion)   | Reducción significativa de biopelícula y producción de ácido láctico   | No reproduce condiciones salivales ni competencia microbiana oral real.                            |
| Matsuo et al. (2023) <i>Caries Res.</i>        | Animal (ratas Wistar)                | Exposición diaria de esmalte dental a soluciones con D-alulosa vs. sacarosa  | Vía oral (instilación con jeringa)     | Solución azucarada simple          | Menor desmineralización del esmalte y menor conteo de <i>S. mutans</i> | Dosis altas, tiempo corto (4 semanas), no se simuló dieta humana.                                  |
| Han et al. (2024) <i>J. Funct. Foods</i>       | Revisión sistemática                 | Síntesis de evidencia preclínica y de seguridad oral                         | N/A                                    | N/A                                | Sugiere posible efecto protector indirecto vía microbiota oral         | Ausencia total de ensayos clínicos en humanos; falta de estudios con matrices alimentarias reales. |
| Sato et al. (2025) <i>Nutrients</i>            | Animal (modelo de dieta cariogénica) | Administración de dieta con 5% D-alulosa                                     | Oral (mezclada con dieta sólida)       | Dieta sólida con almidón y caseína | Disminución en lesiones cariosas comparado con control                 | Muestra pequeña (n=8), falta de comparación con otros edulcorantes.                                |
| Kawasaki et al. (2023) <i>Food Chem.</i>       | <i>In vitro</i>                      | Evaluación del pH tras fermentación de D-alulosa por microbiota oral         | Suspensión bacteriana salival humana   | Medio buffer fosfato               | D-alulosa apenas fermentada; pH estable >6.0                           | Sin control con saliva real ni biofilm maduro; condiciones estáticas.                              |
| Risso et al. (2024) <i>Food &amp; Function</i> | Clínico (niños)                      | Ensayo cruzado doble ciego sobre tolerancia gastrointestinal                 | Oral, disuelta en bebida               | Bebida saborizada con D-alulosa    | Bien tolerada hasta 4.3 g por dosis                                    | No se evaluaron parámetros bucales ni formación de caries; duración corta.                         |
| Daniel et al. (2022) <i>Br. J. Nutr.</i>       | Revisión narrativa                   | Análisis de seguridad y metabolismo en humanos                               | Diversos (oral)                        | Estudios clínicos previos          | Perfil metabólico seguro y no cariogénico                              | Enfatiza ausencia de evidencia directa anticariogénica.  |

### REFERENCIAS

- Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Murray, C. J. L. 2020. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249.
- An, M. J., Lee, J. S., Park, Y.-C., Park, C. J., Kim, H.J. 2019. 90-Day repeated oral toxicity test of D-allulose produced from *Microbacterium foliorum*. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 109(104485).  
<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.104485>
- Carrillo, C. A. V., Mojica, L. 2024. Revisión histórica y conceptual de los alimentos funcionales: Antecedentes, perspectivas y desafíos. *Journal of Behavior and Feeding*, 4(7), 11–20.  
<https://doi.org/10.32870/jbf.v4i7.48>
- Cayabyab, K. B., Shin, M. J., Heimuli, M. S., Kim, I. J., D’Agostino, D. P., Johnson, R. J., Koutnik, A. P., Bellissimo, N., Diamond, D. M., Norwitz, N. G., Arroyo, J. A., Reynolds, P. R., Bikman, B. T. 2024. The metabolic and endocrine effects of a 12-week allulose-rich diet. *Nutrients*, 16(12), 1821. <https://doi.org/10.3390/nu16121821>
- Chen, Z., Gao, X.-D., Li, Z. 2022. Recent advances regarding the physiological functions and health benefits of D-allulose. *Frontiers in Nutrition*, 9, 904804.  
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.904804>
- Daniel, H., Hauner, H., Hornef, M., Clavel, T. 2022. Allulose in human diet: the knowns and the unknowns. *British Journal of Nutrition*, 128(2), 172–178.  
<https://doi.org/10.1017/S0007114521003172>
- Daniel, H., Hauner, H., Hornef, M., Clavel, T. 2022. Allulose in human diet: the knowns and the unknowns. *British Journal of Nutrition*, 128(2), 172–178.
- Desrosiers, C., Heaton, L. J. 2025. Links between sugar and dental decay in US children from low-income families: Results of a systematic review (Research Report). CareQuest Institute for Oral Health.  
<https://doi.org/10.35565/CQI.2025.2001>
- Durso, S. C., Vieira, L. M., Cruz, J. N., Azevedo, C. S., Rodrigues, P. H., Simionato, M. R. 2014. Sucrose substitutes affect the cariogenic potential of *Streptococcus mutans* biofilms. *Caries Research*, 48(3), 214–222.  
<https://doi.org/10.1159/000354410>
- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). 2025. Safety of D-allulose as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 23(6), e09468.  
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9468>
- Fejerskov O., Nyvad B. y Kidd E. 2015. *Dental caries: the disease and its clinical management*. 3rd ed. Wiley-Blackwell, Oxford, 640 p.
- Flores Flores, D.A., Cavazos López, E.N. 2024. Relationship between oral health and nutrition during pregnancy, nursing, and the first two years of life. In M. G. Salazar & J. M. Rentería (Eds.), *The role of nutrition in integral health and quality of life: Interdisciplinary perspectives and recent research* (pp. 409–426). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781003413585-18>
- Food and Drug Administration. 2020. Contains nonbinding recommendations. Allulose: Exclusion from “Added Sugars” on the Nutrition and Supplement Facts Label (FDA-2020-N-1359-0036). U.S. Department of Health and Human Services.
- Food Standards Australia New Zealand (FSANZ). 2024. Application A1269 – D-Allulose as a novel food. Food Standards Australia New Zealand.  
<https://www.foodstandards.gov.au>
- Franchi, F., Imperatore, F., Carbone, S., Rubino, F. 2021. Effects of D-allulose on glucose tolerance and insulin sensitivity in humans. *BMJ Open Diabetes*

- Research Care, 9(1), e001939.  
<https://doi.org/10.1136/bmjdr-2020-001939>
- Frencken, J. E., Sharma, P., Stenhouse, L., Green, D., Lavery, D., Dietrich, T. 2017. Global epidemiology of dental caries and severe periodontitis – A comprehensive review. *Journal of Clinical Periodontology*, 44(S18), S94–S105. <https://doi.org/10.1111/jcpe.12677>
- Fujii, A., Yamashita, K., Saito, H., Nakajima, K., Takahashi, N., Kuramitsu, H. 2025. Enhanced dominance of nitrate-reducing bacteria using a xylitol/erythritol-based gel as an artificial saliva substitute. *Journal of Oral Science*, 67(1), 12–19. <https://doi.org/10.2334/josnusd.23-0283>
- Giacaman, R. A., Maturana, C. A., Molina, J., Volgenant, C., Fernández, C. E. 2023. Effect of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate added to milk, chewing gum, and candy on dental caries: A systematic review. *Caries Research*, 57(2), 106–118. <https://doi.org/10.1159/000530638>
- Gibson, G. R., Probert, H. M., Van Loo, J., Rastall, R. A., Roberfroid, M. B. 2006. Functional food science and gastrointestinal physiology and function. *British Journal of Nutrition*, 85(S1), S123–S131. <https://doi.org/10.1079/BJN2000267>
- Granato, D., Branco, G. F., Cruz, A. G., Faria, J. A. F., Shah, N. P. 2010. Functional foods and nondairy probiotic food development: Trends, concepts, and products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(3), 292–302. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00110.x>
- Guan, L., Chen, Y., Zhao, H., Wang, Q., Zhang, Y., Sun, Y. 2024. Biochemical characterization, structure-guided mutagenesis, and application of a recombinant D-allulose 3-epimerase from Christensenellaceae bacterium for the biocatalytic production of D-allulose. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1365814. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1365814>
- Han, J., Lee, H., Park, S. 2024. Potential oral health benefits of rare sugars: Mechanistic insights and research gaps in D-allulose studies. *Journal of Functional Foods*, 115, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106020>
- Han, S., Rajitha, K., Park, S., Lim, J., Jung, H.-Y., Kim, J., Kim, D. 2025. Unveiling the impact of allulose on oral microbiota and biofilm formation via a cariogenic potential assessment platform. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15, 1463542. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1463542>
- Han, Y., Thompson, R. L., Gin, H., Kou, L., LeBlanc, J. G., Han, P. 2010. Failure of D-psicose absorbed in the small intestine to metabolize into energy and its low large intestinal fermentability in humans. *Metabolism*, 59(2), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2009.07.014>
- Han, Y., Han, H. J., Kim, A. H., Choi, J. Y., Cho, S. J., Park, Y. B., Choi, M. S. 2020. Alteration of microbiome profile by D-allulose in a high-fat diet-induced obesity mouse model. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69995-1>
- Han, Y., Kwon, E. Y., Yu, M. H., Lee, S. J., Kim, H. J., Kim, S. B., Choi, M. S. 2016. Anti-obesity and anti-diabetic effects of D-psicose. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 59(1), 1–7. <https://doi.org/10.3839/jabc.2016.001>
- Hasibul, K., Nakayama-Imaohji, H., Hashimoto, M., Yamasaki, H., Ogawa, T., Waki, J., Tada, A., Yoneda, S., Tokuda, M., Miyake, M., Kuwahara, T. 2018. D-Tagatose inhibits the growth and biofilm formation of *Streptococcus mutans*. *Molecular Medicine Reports*, 17(1), 843–851. <https://doi.org/10.3892/mmr.2017.8017>
- Hayashi, N., Iida, T., Yamada, T., Izumori, K., Kusunoki, M. 2010. Study on the postprandial blood glucose suppression effect of D-allulose in healthy humans. *Journal of Clinical Biochemistry and*

- Nutrition, 47(2), 155–161.  
<https://doi.org/10.3164/jcfn.10-39>
- Hayashi, N., Iida, T., Yamada, T., Okuma, K., Takehara, I., Yamamoto, T. 2010. Effects of rare sugars on the growth and acid production of oral plaque bacteria. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*, 57(9), 477–482.  
<https://doi.org/10.3136/nskkk.57.477>
- Hayashi, N., Iida, T., Yamada, T., Okuma, K., Takehara, I., Yamamoto, T., Tokuda, M. 2010. Clinical effect of D-psicose on postprandial blood glucose and insulin levels. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 47(2), 161–167.  
<https://doi.org/10.3164/jcfn.10-38>
- Hayashi, N., Tsukamoto, I., Okino, S., Suzuki, C., Takehara, I., Yamamoto, T., Iida, T. 2010. Evaluation of the cariogenicity of rare sugars using an animal model. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*, 57(9), 483–486. <https://doi.org/10.3136/nskkk.57.483>
- Hong, Z., Gao, Y., Lin, W., Chen, Z. 2018. Sugar consumption and health: Is there a role for D-psicose? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(8), 1246–1252.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1245156>
- Hossain, M. A., Yamaguchi, F., Matsuo, T., Tsukamoto, I., Toyoda, Y., Ogawa, M., Izumori, K. 2011. Rare sugar D-allulose: Potential role and therapeutic monitoring in maintaining obesity and type 2 diabetes mellitus. *Pharmacology Therapeutics*, 133(3), 358–365.  
<https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2011.01.005>
- Iida, T., Hayashi, N., Yamada, T., Izumori, K. 2008. Gastrointestinal symptoms after ingestion of D-allulose in healthy adults. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 42(3), 227–229.  
<https://doi.org/10.3164/jcfn.2008030>
- Iida, T., Yamada, T., Hayashi, N., Takehara, I. 2010. D-allulose, a rare sugar, has protective effects against diet-induced obesity in mice. *Journal of Food Science*, 75(9), H253–H259.  
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01815.x>
- Iida, T., Yamamoto, T., Kawai, K. 2013. In vitro evaluation of the cariogenic potential of D-allulose. *Journal of Dental Research*, 92(7), 640–644.  
<https://doi.org/10.1177/0022034513484325>
- Izumori, K. 2002. Functional monosaccharides: Rare sugars with characteristics of promising therapeutic agents. *Pure and Applied Chemistry*, 74(7), 1241–1249.  
<https://doi.org/10.1351/pac200274071241>
- Jiang, S., Xiao, W., Zhu, X., Yang, P., Zheng, Z., Lu, S., Jiang, S., Zhang, G., Liu, J. 2020. Review on D-Allulose: In vivo metabolism, catalytic mechanism, engineering strain construction, bio-production technology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 26.  
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00026>
- Kang, S. M., Ishimoto, M., Kim, J., Hase, T. 2019. D-allulose inhibits oral biofilm formation and suppresses acid production in *Streptococcus mutans*. *Archives of Oral Biology*, 100, 101–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2019.02.006>
- Kawasaki, K., Nakamura, Y., Tsuji, T. 2023. Acidogenic potential of D-allulose compared to other rare sugars in oral microbiota fermentations. *Food Chemistry*, 418, 136875.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136875>
- Kim, H., Yokozeki, K., Nishibuchi, M. 2006. Purification and characterization of a D-tagatose 3-epimerase from *Pseudomonas cichorii* ST-24. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(1), 148–155.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.72.1.148-155.2006>
- Kim, Y., Oh, D.-K. 2013. Production of tagatose and other rare sugars using microbial enzymes. *Advances in Applied Microbiology*, 84, 143–176.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407673-0.00005-9>
- Kim, Y., Hyun, J. H., Kim, J. H., Kwon, O. 2011. Effects of D-psicose on glucose tolerance and insulin

- sensitivity in animal models. *Metabolism*, 60(1), 77–85.  
<https://doi.org/10.1016/j.metabol.2009.12.013>
- Kimura, T., Hayashi, N., Kimura, Y., Izumori, K. 2013. D-Psicose, a rare sugar, inhibits the progression of periodontitis in a mouse model. *Journal of Oral Science*, 55(4), 337–344.  
<https://doi.org/10.2334/josn.55.337>
- Larsen, M. J., Pearce, E. I. 2023. The remineralization of enamel from saliva: A chemical perspective. *Journal of Oral Health*, 12(11), 339.  
<https://doi.org/10.3390/2304-6767>
- Latham, M. C. 2002. *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. FAO.
- Li, Y., Yokoyama, S., Matsumoto-Nakano, M., Nakano, K. 2017. Inhibitory effects of rare sugar D-psicose on biofilm formation by *Streptococcus mutans*. *Scientific Reports*, 7, 4724.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04956-1>
- Liang, N. L., Luo, B. W., Sun, I. G., Chu, C. H., Duangthip, D. 2024. Clinical effects of sugar substitutes on cariogenic bacteria: A systematic review and meta-analysis. *International Dental Journal*. Advance online publication.  
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105069>
- Livesey, G. 2003. Health potential of polyols as sugar replacers, with emphasis on low glycaemic properties. *Nutrition Research Reviews*, 16(2), 163–191. <https://doi.org/10.1079/NRR200367>
- Marsh, P. D. 2010. Controlling the oral biofilm with antimicrobials. *Journal of Dentistry*, 38(Suppl. 1), S11–S15.  
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.04.003>
- Matsuo, T., Baba, Y., Hashiguchi, M., Izumori, K. 2002. D-psicose, a rare sugar, suppresses the glycemic response in rats. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 48(6), 512–515.  
<https://doi.org/10.3177/jnsv.48.512>
- Matsuo, T., Izumori, K. 2006. D-psicose inhibits intestinal  $\alpha$ -glucosidase and suppresses the glycemic response after ingestion of carbohydrates in rats. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 38(2), 79–86. <https://doi.org/10.3164/jc.38.79>
- Matsuo, T., Izumori, K., Shintani, T. 2023. Effect of D-allulose on enamel demineralization and *Streptococcus mutans* growth in animal models. *Caries Research*, 57(4), 312–320.  
<https://doi.org/10.1159/000530631>
- Matsuo, T., Izumori, K., Shintani, T. 2023. Effect of D-allulose on enamel demineralization and *Streptococcus mutans* growth in animal models. *Caries Research*, 57(4), 312–320.  
<https://doi.org/10.1159/000533412>
- Mazurel, D., Brandt, B. W., Boomsma, M., Crielaard, W., Lagerweij, M., Exterkate, R. A. M., Deng, D. M. 2025. *Streptococcus mutans* and caries: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dental Research*, 104(6), 594–603.  
<https://doi.org/10.1177/0022034524123456>
- Mickenausch, S. 2020. Effect of xylitol versus sorbitol: A quantitative systematic review. *BMC Oral Health*, 20, 123. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01107-9>
- Miyasawa-Hori, H., Aizawa, S., Hori, Y. 2016. Effect of rare sugar D-psicose on the growth and biofilm formation of *Streptococcus mutans*. *Journal of Applied Glycoscience*, 63(2), 47–52.  
[https://doi.org/10.5458/jag.jag.JAG-2015\\_014](https://doi.org/10.5458/jag.jag.JAG-2015_014)
- Miyasawa-Hori, H., Aizawa, S., Takahashi, N. 2016. Effect of D-psicose on biofilm formation by *Streptococcus mutans*. *Japanese Journal of Infectious Diseases*, 69(2), 124–129.  
<https://doi.org/10.7883/yoken.JJID.2015.287>
- Moynihan, P. J., Kelly, S. A. M. 2014. Effect on caries of restricting sugars intake: Systematic review to inform WHO guidelines. *Journal of Dental Research*, 93(1), 8–18.  
<https://doi.org/10.1177/0022034513508954>
- Mukaibo, T., Ito, K., Nakashima, K. 2022. Potential anticariogenic effects of rare sugars: Focus on D-

allulose and its influence on oral biofilm metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11302.  
<https://doi.org/10.3390/ijms231911302>

OMS. 2015. *Directriz: Ingesta de azúcares en adultos y niños*. Organización Mundial de la Salud.

OMS. 2025. *Sugars and dental caries*. Organización Mundial de la Salud.

Risso, D., Sánchez-Castillo, B., Bacon, S., Henning, S. M., Lee, R. 2024. Gastrointestinal tolerance of D-allulose in children: An acute, randomized, double-blind, placebo-controlled, cross-over study. *Food & Function*, 15(3), 1342–1351.  
<https://doi.org/10.1039/D3FO04210C>

Sato, M., Yamamoto, K., Yamada, T. 2025. Dietary D-allulose reduces caries incidence in rat model of high-sucrose feeding. *Nutrients*, 17(2), 412.  
<https://doi.org/10.3390/nu17020412>

U.S. Food and Drug Administration. 2017. GRAS Notice 693: D-psicose (D-allulose). U.S. Department of Health and Human Services.  
<https://www.fda.gov/media/102711/download>

Yoshii, K., Takahashi, T., Iida, T. 2022. In vitro evaluation of the anticariogenic potential of D-allulose: Effects on *Streptococcus mutans* biofilm formation and acid production. *Frontiers in Microbiology*, 13, 987654.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.987654>

## Efecto Inhibitorio de Películas de Quitosano y Papaína Activadas con Plasma en *Streptococcus mutans*

### Inhibitory Effect of Plasma-Activated Chitosan-Papain Films on *Streptococcus mutans*

Tascón-Acevedo, P.A.<sup>1</sup>, Reyes-Acosta, Y, K.<sup>1</sup>, Arredondo-Valdés, R.<sup>1</sup>, Reyes-Acosta, A, V.<sup>1</sup>, Segura-Ceniceros, E.P.<sup>1</sup>, Vargas-Segura, A.I.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Research, Faculty of Chemical Sciences

<sup>2</sup>Faculty of Dentistry. Autonomous University of Coahuila, Blvd. Venustiano Carranza and J. Cárdenas s/n, Col. República Oriente, 25280 Saltillo, México.

\*Corresponding Author: [alejandravargas@uadec.uadec.mx](mailto:alejandravargas@uadec.uadec.mx)

Recibido: 9 de abril de 2025

Aceptado: 15 de septiembre de 2025

#### Resumen

El quitosano es un polímero natural con gran potencial en diversas aplicaciones, ha sido ampliamente utilizado en diferentes áreas como la agricultura, para producir bactericidas y fungicidas, entre otros. La papaína es una enzima proteolítica, se utiliza comúnmente para el tratamiento de heridas, ablandamiento de carne, clarificación de cerveza, entre otras aplicaciones, posee propiedades medicinales y ha generado un interés significativo en acelerar el proceso de cicatrización y su actividad antimicrobiana. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto inhibitorio de las películas de quitosano y papaína activadas con plasma sobre *Streptococcus mutans*. Las películas de quitosano-papaína se prepararon utilizando el método de fundición, incorporando quitosano y papaína. Las propiedades estructurales y térmicas de las películas se analizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), revelando interacciones entre el quitosano y la papaína. Un ensayo de actividad enzimática confirmó la función proteolítica de la papaína. La eficacia antimicrobiana de las películas se evaluó mediante el método de difusión en disco de Kirby-Bauer, mostrando resistencia en todos los tratamientos con zonas de inhibición mínimas (< 10 mm). Aunque las zonas de inhibición eran pequeñas, las películas inhibieron el crecimiento bacteriano directamente donde se colocaron. El estudio concluye que las películas de quitosano-papaína exhiben cierta actividad antimicrobiana contra *S. mutans*. Sin embargo, se necesita una mayor optimización para mejorar su eficacia

**Palabras clave:** Papaína, películas, plasma, quitosano, *Streptococcus*.

#### Abstract

Chitosan is a natural polymer with great potential in various applications, has been widely used in different areas such as agriculture, to produce bactericides and fungicides, among others. Papain is a proteolytic enzyme, is commonly used for wound treatment, meat tenderizing, beer clarification, among other applications, it possesses medicinal properties and has generated significant interest in accelerating the healing process and its antimicrobial activity. The objective of this paper is to evaluate the inhibitory effect of chitosan and papain films activated with plasma on *Streptococcus mutans*. Chitosan-papain films were prepared using the casting method, incorporating chitosan and papain. The structural and thermal properties of the films were analyzed using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy, revealing interactions between chitosan and papain. An enzymatic activity assay confirmed the proteolytic function of papain. The antimicrobial efficacy of the films was assessed using the Kirby-Bauer disk diffusion method, showing resistance in all treatments with minimal inhibition zones (< 10 mm). Although the inhibition zones were small, the films inhibited bacterial growth directly where they were placed. The study concludes that chitosan-papain films exhibit some antimicrobial activity against *S. mutans*. However, further optimization is needed to enhance their efficacy.

**Keywords:** Chitosan, films, papain, plasma, *Streptococcus*.

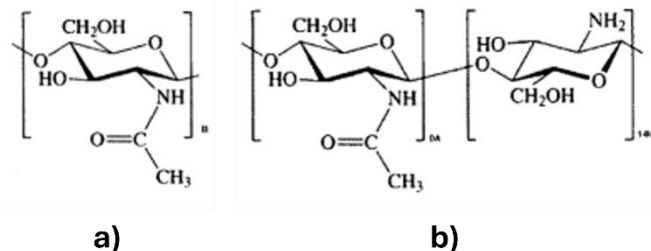
## INTRODUCTION

The consumption of crustaceans generates between 70–80% of waste, mainly from viscera and exoskeletons (García Zapata & Roca Ortega, 2014). In Mexico, the fishing industry produces approximately 60,000 tons of waste annually, with shrimp farming representing a major contributor to coastal pollution (Castellano, 2017; Gutierrez Avella, 2016; Martínez Sánchez et al., 2014). In response to environmental concerns, increasing attention has been directed toward biodegradable and low-impact materials.

Chitosan, obtained from the deacetylation of chitin, is a naturally abundant, renewable, biocompatible, and non-toxic polymer with strong biofilm-forming capacity (Moreno et al., 2012; Singla & Chawla, 2010). It is mainly extracted from the exoskeletons of shrimp, crabs, and other crustaceans (Ahmed & Ikram, 2016), and its large-scale production has been established in several regions, including Japan, North America, Poland, and Russia (Singla & Chawla, 2010). Chitosan can be processed into various forms such as powders, pastes, films, and fibers (Ahmed & Ikram, 2016).

Structurally, chitosan is an amino-polysaccharide composed of repetitive units of 2-acetamido-2-deoxy- $\beta$ -D-glucopyranose and 2-amino-2-deoxy- $\beta$ -D-glucopyranose (Figure 1b). Its nitrogen content is approximately 6.89 %, which provides basic character due to the free amino groups (Giraldo, 2015). Chitosan is soluble in diluted organic acids such as acetic, lactic, and formic acids, and it is classified as chitosan when the degree of deacetylation of chitin (Figure 1a) is  $\geq 50$  % (Ahmad et al., 2015; Ahmed, 2015; Ahmed et al., 2014; Ahmed & Ikram, 2016; Giraldo, 2015; Skotak et al., 2011).

Chitin is the second most abundant natural biopolymer after cellulose and is the main structural component of the exoskeletons of crustaceans and insects (Giraldo, 2015). It is the primary source of chitosan, typically obtained by alkaline deacetylation. This process involves grinding the raw material, followed by deproteinization and demineralization, and finally treatment with concentrated sodium hydroxide at high temperatures (Singla & Chawla, 2010).



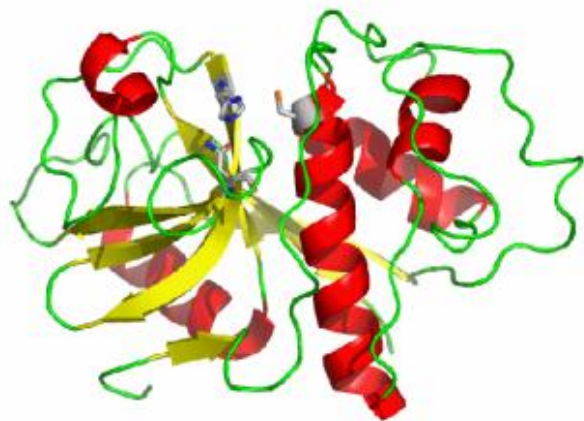
**Figure 1.** (a) Structure of chitin, (b) Structure of chitosan. Taken from Marguerite Rinaudo (2006).

Chitosan exhibits several unique characteristics, including biodegradability, biocompatibility, and non-toxicity (Ayala, 2015). These properties have promoted their use in agriculture (as bactericides, fungicides, and seed coatings), in healthcare (for wound dressings, bactericidal creams, and healing gels), and in wastewater treatment (Velásquez-Lárez, 2006). Furthermore, chitosan is an excellent biofilm-forming polymer, making it valuable for food packaging, surgical sutures, and drug delivery systems (Moreno et al., 2012; Singla & Chawla, 2010).

Biofilms are thin layers of biodegradable material with versatile applications across the food, medical, and agro-industrial sectors. They can incorporate active substances that provide additional properties, such as antimicrobial or enzymatic activity (Orozco Velandia, 2021). Biofilms are generally prepared by either the casting method, which involves dissolving or dispersing the biopolymer and evaporating the solvent, or by compression molding, which exploits the thermoplastic behavior of proteins and polysaccharides under pressure, temperature, and humidity (Orozco Velandia, 2021). Additives such as papain or advanced surface treatments like cold plasma can be integrated to further enhance their functional performance.

Papain is a cysteine protease from *Carica papaya* latex with well-documented proteolytic activity. It hydrolyzes peptide bonds at residues such as arginine, lysine, and glutamine, and is widely used in wound treatment, meat tenderization, and beer clarification (Areas et al., 2015). Structurally, papain consists of 212 amino acids, with cysteine at the catalytic site, a molecular weight of 33 kDa (precursor: 38.9 kDa), and three

disulfide bonds (Cys22–Cys63, Cys56–Cys95, Cys153–Cys200). It presents as a white amorphous powder, slightly hygroscopic, insoluble in water and most organic solvents, but soluble in ethanol and methanol. Its optimal activity occurs at 65 °C and pH 5–7, with an isoelectric point of 9.6. Due to its short shelf life, papain requires storage in a dry, cool environment (Diaz Aliaga, 2019; Areas et al., 2015).



**Figure 2.** Structure of papain. Taken from Proteolytic Enzymes (2009)

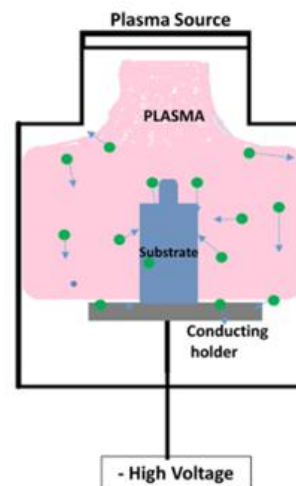
Oral health involves not only caries and gingivitis but also soft tissue lesions affecting the palate, tongue, and floor of the mouth, which can cause pain and impair basic functions such as eating and speaking (Abid et al., 2015; Cárdenas, 2016; Singh et al., 2015; Misrachi & Espinoza, 2005). Infections often complicate wound healing, slowing tissue repair and favoring the proliferation of pathogens such as *Streptococcus mutans*, a major contributor to caries and periodontal disease (Katsura et al., 2001).

Papaya contains bioactive compounds, including proteolytic enzymes such as papain, with recognized antimicrobial and healing properties (Areas et al., 2015). Clinical and experimental studies have shown that papain-based formulations accelerate healing, reduce exudate, and lower infection rates by degrading devitalized tissue and modulating inflammation (Soares et al., 2015; Areas et al., 2015).

Wound healing is a complex but organized process involving inflammation, proliferation, angiogenesis, and

granulation tissue formation, and remodeling through collagen deposition and contraction. Its progression is influenced by factors such as tissue environment, extent of injury, and systemic conditions (González Tuero et al., 2001).

In addition, plasma technology has emerged as a method to enhance the properties of polymeric materials. Plasma treatment modifies surfaces by introducing functional groups and improving hydrophilicity, without altering the bulk structure of the material (Reséndiz, 2005; Nageswaran & Neogi, 2015). Depending on the gas and parameters used, plasma can generate reactive species that interact with polymers, enhancing compatibility with biological systems. Both glow discharge (frequency plasma) and arc plasma are commonly applied, differing in their electrical potential characteristics (Eswaramoorthy & McKenzie, 2017).



**Figure 3.** Schematic diagram of a glow discharge. Taken from Eswaramoorthy & McKenzie, 2017.

The application of plasma in wound dressings is still in its infancy, the purpose of these dressings is to prevent infection and promote the healing process (Eswaramoorthy & McKenzie, 2017), there are different types of dressings, these can be natural or synthetic polymers, fibers, gels, foam, among others, depending on the type of wound to be treated (Breitwieser et al., 2013). Considering this, the objective of this document is to evaluate the inhibitory effect of chitosan and papain films activated with plasma on *Streptococcus mutans*.

## MATERIALS AND METHODS

### Microorganism

The microorganism used in this study was *Streptococcus mutans*, provided by the Department of Nanobiosciences at the Chemical Sciences Faculty of the Universidad Autónoma de Coahuila (Saltillo, Mexico).

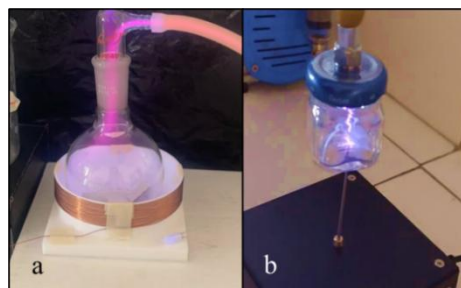
### Preparation of chitosan-papain films

The extraction of chitin was from waste and shrimp residues provided by a local restaurant of Saltillo, Coahuila, México (Las Brazas). The shrimp were washed and ground, then demineralized in an acidic medium (generally hydrochloric acid, HCl), followed by alkaline hydrolysis to extract the chitin. Once the chitin is obtained, deacetylation is carried out in a basic medium, followed by washing and dehydration to obtain chitosan. Papain, casein, cysteine, trichloroacetic acid, and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) were purchased from Sigma-Aldrich Co. Glycerol and phosphate salts (PBS) were purchased from Jalmek (Mexico). All reagents were of analytical grade and used as received.

The films were prepared following the methodology of Orozco et al. (2021). Using the "casting" method, the films were prepared by dissolving 1 % w/v chitosan and 0.1 % w/v papain in an aqueous solution containing 1 % v/v acetic acid, and then incorporating 1 % v/v glycerol as a plasticizer. 40 ml of the obtained solution was poured into disposable plates and then placed in stoves at 45 °C for 48 h. The films were manually recovered and placed between sheets of paper for storage.

### Plasma treatment of films

For the plasma treatment, frequency plasma (PF) and arc plasma (PA) were utilized, provided by the materials department of the Faculty of Chemical Sciences. The films were placed inside a container (Figure 4a and 4b) and subsequently subjected to treatments of 30 and 90 s of PF and PA, while maintaining conditions of 40 W and 500 Hz.



**Figure 4a.** Frequency Plasma (PF) **Figure 4b.** Arc Plasma (PA)

### FTIR Spectroscopy

Infrared spectroscopy (FTIR) was used to characterize the presence of specific chemical groups in the film of chitosan and chitosan-papain. FTIR spectra were obtained in a Perkin-Elmer Spectrophotometer Model GX. Spectra were recorded at 500 to 4000 cm<sup>-1</sup> wavelengths with 30 scans and a resolution of 4 cm<sup>-1</sup>. Spectra were run directly from the solid films without any method of preparation.

### Thermal Analyses

For thermogravimetric analysis (TGA), the equipment used was a PerkinElmer Pyris TGA, which was used to determine the weight variation of the samples upon heating. Approximately 10 mg of each sample was placed in an alumina pan with an empty pan used as a reference. Samples were heated from 30 to 800 °C at a heating rate of 20 °C/min<sup>-1</sup> under an airflow of 20 mL·min<sup>-1</sup>. The Universal Analysis 2000 software, version 4.7, from TA Instruments, was used to plot the thermogravimetric (TG) curves. OriginPro 8.5 was used to analyze the curves.

### Enzymatic Activity Assay

The proteolytic activity of papain was determined as previously described by Câmara da Silva Melo et al. (2023), with modifications. The reaction mixture was 2 mL of 0.01 M phosphate buffer (PBS) at pH 8.0, which contains 0.5 mM EDTA, 5 mM cysteine, and 1.0 ml of 2.0 % w/v casein, as well as 1.0 ml of free enzyme solution,

or pectin-trapped enzyme preparation previously suspended in 1 ml of 0.05 M PBS. The reaction mixture was stirred and heated to 37° C for 20 min; the reaction was subsequently stopped with the addition of 3.0 % w/v trichloroacetic acid. Then, the supernatant was centrifuged for 30 min at 1800 rpm, and the supernatant was measured at 280 nm, showing the presence of amino acids as a product of the enzymatic reaction.

### Inhibition assay

The preparation of antibiograms was carried out following the Kirby-Bauer disk diffusion method, as described by Hudzicki in the 2009 article "Kirby-Bauer Disk Diffusion Susceptibility Test Protocol." A standardized solution of 0.5 MacFarland of *Streptococcus mutans* was prepared, and this was verified by measuring optical density at 625 nm. Subsequently, Mueller-Hinton agar plates were inoculated with 100 µl of the suspension in Petri dishes. The films were then cut into disks and added to the inoculated Petri dishes along with their corresponding controls. The Petri dishes were incubated for 24 hours. After the incubation period, the inhibition zones around each disk were measured in millimeters (mm).

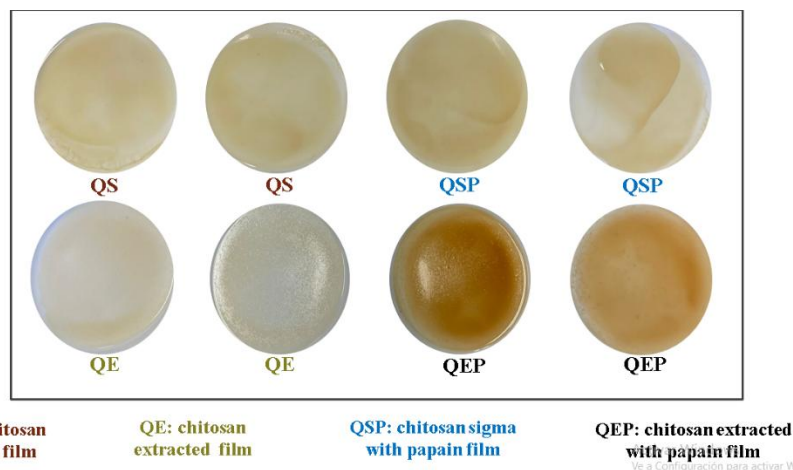
### Statistical Analysis

For the statistical analysis, a completely randomized design was employed, and a mean difference and Tukey test were performed. The statistical package SPSS was used, with the data representing the averages of each replicate for each treatment, and the response variable was the diameter of each inhibition zone in mm. After analyzing the significance level ( $p < 0.05$ ), a Tukey test was conducted for multiple mean comparisons.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Chitosan-papain films

Figure 5 shows four types of prepared films: chitosan sigma films (QS), chitosan extracted films (QE), chitosan sigma films with papain (QSP), and chitosan extracted films with papain (QEP). The main difference between the films is color: the films containing papain are darker.

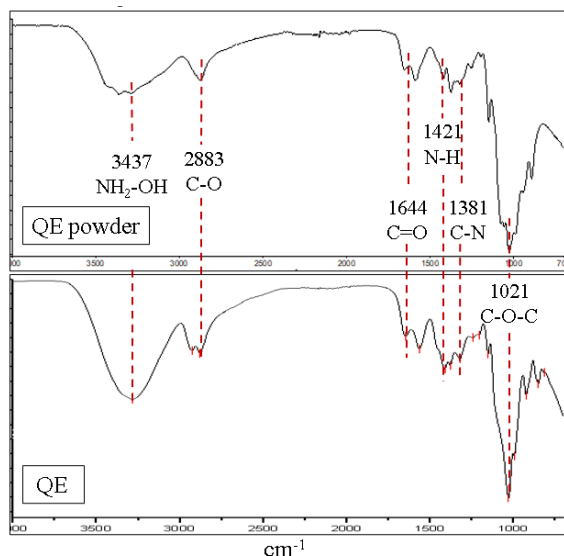


**Figure 5.** Chitosan film and chitosan with papain films

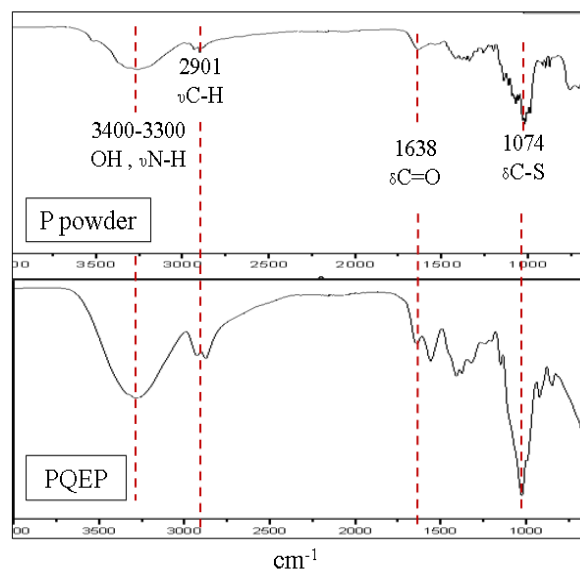
### Papain interactions with chitosan by thermal analyses and FTIR.

Figure 6 shows the FTIR spectra of the extracted chitosan powder and the extracted chitosan film, showing the functional groups of chitosan in both. The OH/NH stretching band around 3437  $\text{cm}^{-1}$  is prominent in both QE powder and QE film, indicating the presence of hydroxyl and amine groups, which are characteristic of chitosan, the C-O stretching at 2883  $\text{cm}^{-1}$  and the C-N stretching at 1381  $\text{cm}^{-1}$  are observed in the QE powder and film, confirming the presence of chitosan's polysaccharide backbone, the amide I band (C=O stretching) near 1644  $\text{cm}^{-1}$  and the amide II band (N-H bending) around 1421  $\text{cm}^{-1}$  suggest the presence of acetylated residues in the chitosan structure, the C-O-C stretching band at 1021  $\text{cm}^{-1}$ , common in chitosan, is also present in both the powder and film, indicating the retention of the polysaccharide structure after film formation, Likewise, in figure 7 shows the papain characteristics peaks, the broad peak around 3400-3300  $\text{cm}^{-1}$  in the papain powder (P powder) corresponds to OH and NH stretching, indicative of proteins. This peak shifts slightly in the PQEP film, likely due to interactions between papain and chitosan. The C-H stretching band at 2901  $\text{cm}^{-1}$  and the C=O stretching band around 1638  $\text{cm}^{-1}$  are characteristic of papain's protein structure, observed in both P powder and PQEP film. The C-S stretching band around 1074  $\text{cm}^{-1}$  is

also observed, which is associated with papain's cysteine residues, a key functional group in papain's enzymatic activity. This band is present in the PQEP film, indicating successful incorporation of papain into the chitosan matrix.



**Figure 6.** Chitosan extracted powder FTIR and chitosan extracted film

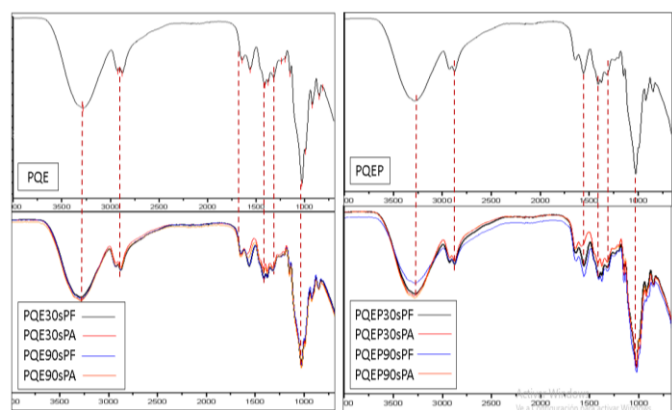


**Figure 7.** Papain powder FTIR and chitosan with papain film (QEP) FTIR.

The shifts and broadening in the OH/NH region (3400-3300  $\text{cm}^{-1}$ ) and the amide bands suggest strong interactions, possibly hydrogen bonding, between

chitosan and papain within the PQEP film. The presence of characteristic peaks for both chitosan and papain in the PQEP spectrum indicates that the functional groups from both components are preserved, confirming the successful formation of the chitosan-papain composite film. The FTIR spectra of the films do not show any new peaks or significant shifts indicative of chemical modification or the formation of new covalent bonds between chitosan and papain. This suggests that the film-forming process primarily involves physical blending rather than chemical crosslinking.

Figure 8 shows the FTIR of all plasma-treated films, where it is observed that no grafted functional groups are present. This indicates that the films successfully underwent plasma erosion treatment at times 30 s and 90 s, as shown by the absence of additional functional groups to which each molecule corresponds.

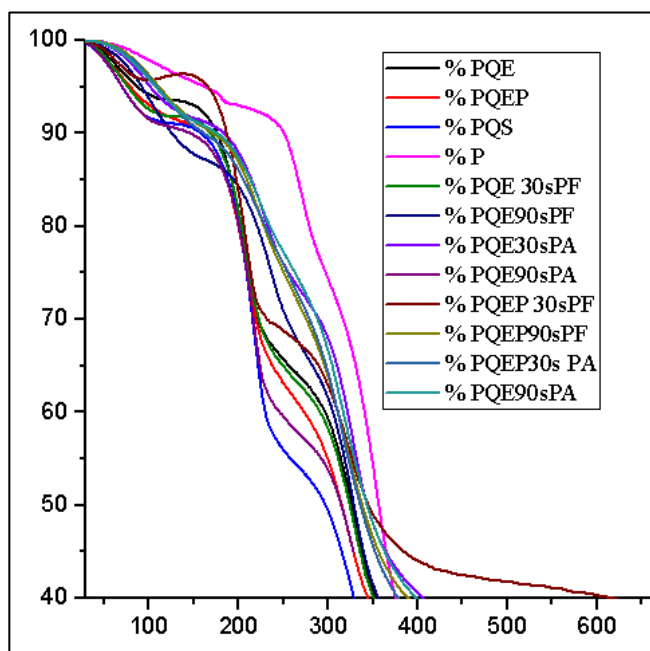


**Figure 8.** FTIR of PQE and PQEP films treated with frequency plasma and arc plasma at 30s and 90s.

The TGA curves show the mass loss of the films as the temperature increases from around 100  $^{\circ}\text{C}$  to 800  $^{\circ}\text{C}$ . Figure 9 shows that all the films follow a similar degradation pattern, with two main degradation stages. The first stage (around 100  $^{\circ}\text{C}$  - 200  $^{\circ}\text{C}$ ) likely corresponds to the loss of water and low molecular weight compounds. The second stage (around 250  $^{\circ}\text{C}$  - 600  $^{\circ}\text{C}$ ) corresponds to the thermal degradation of chitosan, papain, and any other organic components this result can be compared to that of Camara Da Silva (2023) in their article they mentioned that in membrane Ch (Chitosan) 52  $^{\circ}\text{C}$ , the first event had a loss of 3 % and the second event occurred in 278  $^{\circ}\text{C}$  with

a loss of 68 % of mass. In ChPap (chitosan and papain), 2.5 % at 52 °C resulted in a 3.2 % loss, and at 287.14 °C, a 67.12 % loss. In ChPap5 % at 56 °C, there was a loss of 2.4 %, and at 280 °C, there was a loss of 68.63 %. Papain powder presented only one event at 314 °C with a loss of 54.04 % of mass (Câmara da Silva Melo et al., 2023).

The films treated with plasma (both frequency plasma (PF) and arc plasma (PA)) for 30 s and 90 s generally show a slight shift in thermal stability compared to the untreated films (PQE, PQEP, PQS). The differences, though subtle, suggest that plasma treatment may influence the thermal degradation profile, potentially through changes in surface chemistry or crosslinking induced by plasma.



**Figure 9.** TGA of PQE and PQEP films treated with frequency plasma and arc plasma at 30s and 90s

Among the plasma-treated samples, the film treated with frequency plasma for 30 seconds (PQEP 30s PF) appears to have slightly higher thermal stability, with a more gradual mass loss than the others. This could imply that a short plasma treatment enhances the film's resistance to thermal degradation. On the other hand, prolonged plasma treatment (90 s) does not significantly improve thermal stability and might even slightly reduce it. The presence of papain in the films (PQEP, PQEP 30 s PF, PQEP 90 s PF, etc.) does not drastically alter the thermal

degradation pattern compared to films without papain (PQS, PQE). However, films containing papain exhibit slightly different degradation profiles, which may be due to interactions between chitosan and papain, thereby affecting thermal stability.

The TGA curves suggest that while plasma treatment affects the overall thermal stability of the films, it does not cause significant chemical changes or grafting of new functional groups, as indicated by the consistent degradation patterns across the samples.

In conclusion, the TGA analysis indicates that plasma treatment can modify the thermal stability of chitosan-papain films, with frequency plasma at shorter durations showing the most promise for enhancing thermal properties. However, the overall impact of plasma treatment is subtle, and the inherent properties of chitosan and papain dominate the thermal degradation behavior.

#### Measurement of the diameter of the inhibition zone of the treatments.

In Table 1, the meaning comparison of the calculated diameter in mm is presented. It can be observed that these values were relatively low. Additionally, the Tukey test at 95 % confidence indicates that the inhibitory effects of the treatments did not differ significantly, even with the addition of plasma treatment to the films. According to Hudzicki (2009), in the article "Kirby-Bauer Disk Diffusion Susceptibility Test Protocol," the inhibition zones generated against *Streptococcus mutans* indicate resistance in all treatments, as the zones are small (< 10 mm). This result does not align with findings in other research; for example, Chen et al. (2012) found that water-soluble chitosan has a significant effect on dental pathogens and reported that mouthwash containing water-soluble chitosan demonstrated antibacterial activity comparable to that of commercial mouthwashes, exceeding 99.91 % in both in vitro and in vivo experiments. Costa et al. (2013) worked with chitosan of different molecular weights and found that higher-molecular-weight chitosan has greater efficacy against oral pathogens, suggesting that chitosan has the potential to be an alternative to traditional antimicrobials in oral health.

**Table 1.** Diameters of the inhibition zone for each of the treatments.

| Tratament  | Inhibition (mm)  |
|--|------------------|
| Film extracted chitosan (PQE)                                      | 0,0              |
| Film extracted chitosan/papain (PQEP)                              | 8,0 <sup>b</sup> |
| Film extracted chitosan_ Frequency Plasma 30s (PQE 30sPF)          | 8,5 <sup>b</sup> |
| Film extracted chitosan/papain_ Frequency Plasma 30s (PQEP 30sPF)  | 0,0              |
| Film extracted chitosan_ Arc Plasma 30 s (PQE 30sPA)               | 0,0              |
| Film extracted chitosan/papain_ Arc Plasma 30 s (PQEP 30sPA)       | 8,2 <sup>b</sup> |
| Film extracted chitosan_ Frequency Plasma 90s (PQE 90sPF)          | 0,0              |
| Film extracted chitosan/papain_ Frequency Plasma 90s (PQEP 90sPF)  | 7,7 <sup>b</sup> |
| Film extracted chitosan_ Arc Plasma 90s (PQE 90s PA)               | 0,0              |
| Film extracted chitosan/papain_ Frequency Plasma 90s (PQEP 90s PA) | 0,0              |
| Papain (P)   | 0,0              |
| Film chitosan sigma/papain PQS                                     | 8,5 <sup>b</sup> |
| Control (A)  | 26 <sup>a</sup>  |



**Figure 10.** Inhibition test result.

On the other hand, although the obtained zone was minimal, there was no bacterial growth at the film site, as shown in Figure 10; this can be attributed, regardless of

chitosan's antimicrobial activity, to its natural characteristics mean the antimicrobial effect occurs without migration of active agents through the agar; in other words, it does not diffuse into the agar. Therefore, it only inhibits microorganisms in direct contact with chitosan. This is explained by Hosseini et al. (2008). The same occurred in the study by Hernández-Ochoa et al. (2011), in which chitosan films with different molecular weights and mixed with different extracts were evaluated. As a result, the chitosan films at the three molecular weights studied, without the addition of antimicrobials (control), did not exhibit inhibition zones against the tested strains. Inhibition was only observed in the area where the films were placed.

### CONCLUSIONS

Plasma-treated films showed an antimicrobial effect of 32 % against *Streptococcus mutans* compared to the control for 30 seconds and 90 seconds of resistance; however, the films showed inhibition at the site of application, so their antimicrobial effect is still not ruled out.

### REFERENCES

- Ahmad, M., Ahmed, S., Swami, B. L., & Ikram, S. 2015. Preparation and characterization of antibacterial thiosemicarbazide chitosan as efficient Cu (II) adsorbent. *Carbohydrate Polymers*. 132: 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.034>
- Ahmed, S. 2015. Chitosan & its derivatives: A review in recent innovations. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 6(1): 14–30. <https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232>
- Ahmed, S., Ahmad, M., & Ikram, S. 2014. Advanced materials chitosan: A natural antimicrobial agent: A review. *Journal of Applicable Chemistry*. 2(3): 493–503.
- Ahmed, S., & Ikram, S. 2016. Chitosan Based Scaffolds and Their Applications in Wound Healing.

- Achievements in the Life Sciences, 10(1): 27–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.als.2016.04.001>
- Areas C, M. F., Fitoria, I. C., & Matamoros, J. A. 2015. Elaboración de un compuesto farmacológico a base de látex de *Carica papaya* con actividad cicatrizante evaluada en modelo experimental in vivo en ratas Wistar, con amputación de colas en la Facultad de Ciencias Médicas. 151. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Ayala, G. 2015. Efecto Antimicrobiano Del Quitosano: Una Revisión De La Literatura Antimicrobial Effect of Chitosan: a Review. *Scientia Agroalimentaria*. 2: 32–38.
- Breitwieser, D., Moghaddam, M. M., Spirk, S., Baghbanzadeh, M., Pivec, T., Fasl, H., Ribitsch, V., & Kappe, C. O. 2013. In situ preparation of silver nanocomposites on cellulosic fibers- Microwave vs. conventional heating. *Carbohydrate Polymers* 94(1): 677–686  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.077>
- Câmara da Silva Melo, A. E., Ribeiro de Sousa, F. S., Santos-Silva, A. M. dos, Gomes do Nascimento, E., Fernandes-Pedrosa, M. F., Xavier de Medeiros, C. A. C., & Antônio da Silva-Junior, A. 2023. Immobilization of Papain in Chitosan Membranes as a Potential Alternative for Skin Wounds. *Pharmaceutics*. 15(12): 1–14  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15122649>
- Castellano, G. 2017. Aplicaciones de las biopelículas comestibles en la industria alimentaria. *Revista Industria Y Alimentos*. 22–27.
- Díaz Aliaga, J. K. 2019. Aplicación de la enzima papaína obtenida a partir de las semillas de *Carica Papaya* como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR- V.E.S. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.
- Eswaramoorthy, N., & McKenzie, D. R. 2017. Plasma treatments of dressings for wound healing: a review. *Biophysical Reviews*. 9(6): 895–917.  
<https://doi.org/10.1007/s12551-017-0327-x>
- García Zapata, T., & Roca Ortega, J. M. 2014. Industrialización de los crustáceos para la obtención de Quitosano en ungüento con efecto cicatrizante. *Industrial Data*. 11(2): 24  
<https://doi.org/10.15381/idata.v11i2.6047>
- Giraldo, J. 2015. Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. University of Concepcion,  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3350.9287>
- González Tuero, J. H., Rodríguez Ramírez, R., Machado Pineda, M., González Quiala, J., & Cabrera Salazar, J. (001. Heridas métodos de tratamiento. *Rev Cubana Med Gen Integr*. 25717(3): 257–257.
- Gutierrez Avella, D. M. 2016. Quitosano: Un producto útil obtenido de un residuo.  
<https://tribunadequeretaro.com/opinion/quitosano-un-producto-util-obtenido-de-un-residuo/>
- Martínez Sánchez, H. F., Escobedo Lozano, A. Y., Méndez-Gómez, E., Vázquez, A. E., Sol Hernández, M. D. J., & Osuna Lizárraga, A. E. 2014. Evaluación in vivo del efecto cicatrizante de un gel a base de quitosano obtenido de exoesqueleto de camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. *Rev. Colomb. Biotecnol*, XVI(1): 45–50.
- Moreno, A., Cartaya, O., González-Peña, D., Reynaldo, I., & Ramírez, M. A. 2012. Metodología factible para la obtención de quitosano con fines agrícolas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 13(2): 69–76.
- Orozco Velandia, K. D. 2021. Evaluación del proceso de obtención de una biopelícula a partir de pectina extraída de la pulpa de café arábica. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Singla, A. K., & Chawla, M. 2010. Chitosan: some pharmaceutical and biological aspects - an update. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 53(8): 1047–1067.  
<https://doi.org/10.1211/0022357011776441>

- Skotak, M., Ragusa, J., Gonzalez, D., & Subramanian, A. 2011. Improved cellular infiltration into nanofibrous electrospun crosslinked gelatin scaffolds templated with micrometer-sized polyethylene glycol fibers. *Biomedical Materials*, 6(5). <https://doi.org/10.1088/1748-6041/6/5/055012>
- Soares Rodrigues, A. L., Baptistade Oliveira, B. G. R., Futuro, D. O., & Secli, S. R. 2015. Efectividad del gel de papaína en el tratamiento de úlceras venosas: ensayo clínico aleatorio. *Revista Latinoamericana de Enfermagem*. 23(3): 458–465. <https://doi.org/10.1590/0104-1169.0381.2576>
- Velásquez-Lárez, C. 2006. Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. *Avances En Química*. 1(2): 15–21.