

AVANCE TECNOLÓGICO

Cultura, conocimiento y divulgación

37

EDICIÓN SEMESTRAL
AGOSTO 2026
ISSN: 2594-1089

INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN
PARA EL DESARROLLO
SUSTENTABLE





Año 19, No. 37, enero – junio 2026, México,
Tecnológico Nacional de México

Instituto Tecnológico Superior de Libres

ISSN: 2594-108

INFORMACIÓN LEGAL

Avance Tecnológico, año 19, No. 37, enero-junio 2026, es una publicación semestral editada por el Instituto Tecnológico Superior de Libres, Camino Real S/N, Barrio de Tetela, Libres, Puebla, C.P. 73780, México.

ISSN: 2594-1089.

Sitio institucional: www.libres.tecnm.mx

Correo electrónico:

avancetecnologico@libres.tecnm.mx

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2017-081513312100-203.

La revista publica trabajos académicos, científicos y tecnológicos sometidos a procesos de revisión editorial y, cuando corresponde, evaluación por pares.

DIRECTORIO

C. Manuel Viveros Narciso
Secretario de Educación Pública

C. Lizbet Martínez Moreno
Subsecretaria de Educación Superior

Mtro. Jorge Alfonso Martagón Mirón
Dirección General

Dr. Misael Mundo Coxca
Editor en Jefe

Lic. Dania Lizeth Cuenca Candia
Edición y Diseño de Publicación

ÍNDICE

Editorial.....	2
Desarrollo de PetBriz, alimento para mascotas elaborado a partir de biomasa de lombriz dentro de un enfoque de economía circular.....	3
Eficiencia de la inversión pública y desarrollo turístico en Balancán, Tabasco: percepción ciudadana ante el Tren Maya	9
Influencia del tamaño de fibra del raquis del banano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) en materiales lignocelulósicos.....	19
Valorización de plumas de pollo para la obtención de queratina y el desarrollo de biopolímeros sostenibles: una revisión de la literatura científica	26
Diseño del modelo matemático y control PID de velocidad longitudinal para un go kart eléctrico	40

Editorial

Es un gusto presentar la **Edición No. 37 de la Revista Electrónica Arbitrada Avance Tecnológico**, un espacio destinado a la difusión del conocimiento científico, tecnológico y académico generado en instituciones de educación superior y centros de investigación.

Como parte del compromiso con la calidad académica, en esta edición se consolidó el proceso de evaluación mediante arbitraje académico a doble ciego, con la participación de especialistas seleccionados de acuerdo con las áreas temáticas de los manuscritos. Esta valoración permitió sustentar las decisiones editoriales en criterios académicos y científicos, favoreciendo la rigurosidad de los trabajos publicados.

Los artículos reunidos en este número muestran la diversidad temática que distingue a Avance Tecnológico. Sus aportaciones abordan asuntos vinculados con la economía circular, el aprovechamiento de residuos, la producción sustentable, los materiales biobasados, la gestión turística y la inversión pública, además de la modelación matemática y el control aplicado a sistemas de movilidad eléctrica.

En materia de sustentabilidad, se presenta una propuesta para aprovechar residuos sólidos orgánicos mediante procesos de compostaje y vermicompostaje, orientada a obtener biomasa de lombriz para su incorporación en alimentos destinados a mascotas. También se analiza el potencial del raquis de banano como materia prima para elaborar materiales lignocelulósicos, destacando la influencia del tratamiento y del tamaño de la fibra en sus propiedades físicas. A ello se suma una revisión sobre la valorización de plumas de pollo para obtener queratina y desarrollar biopolímeros sostenibles, que expone alternativas para transformar residuos agroindustriales en materiales con valor agregado.

Desde el ámbito de las ciencias económico-administrativas, este volumen incorpora un estudio sobre la inversión pública y el desarrollo turístico en Balancán, Tabasco, a partir de la percepción ciudadana ante la llegada del Tren Maya. Sus resultados permiten reflexionar sobre la relación entre infraestructura, participación comunitaria, gestión pública y desarrollo territorial. Finalmente, se incluye una investigación dedicada al modelado matemático y al control PID de la velocidad longitudinal de un go-kart eléctrico, que aborda, desde la ingeniería y la modelación dinámica, algunos de los desafíos asociados con la movilidad eléctrica y la optimización del comportamiento de sistemas motrices.

En conjunto, las contribuciones de este número evidencian la importancia de impulsar una investigación vinculada con **problemáticas reales, innovación tecnológica, sustentabilidad y desarrollo regional**. La participación de investigadoras e investigadores de diversas instituciones, junto con la colaboración de integrantes de nuestra comunidad académica, fortalece el carácter plural y multidisciplinario de la publicación.

Desde la **Revista Electrónica Arbitrada Avance Tecnológico**, reiteramos nuestro compromiso con la construcción de un espacio académico que favorezca la divulgación responsable del conocimiento y que continúe perfeccionando, edición tras edición, sus procesos editoriales y criterios de calidad.

Agradecemos a las y los autores que confiaron sus trabajos a nuestra revista, así como a la comunidad evaluadora que participaron en el dictamen académico. Su colaboración es fundamental para consolidar este proyecto editorial y mantener abierto un espacio de encuentro entre la academia y la sociedad.

Dr. Misael Mundo Coxca
Presidente del Consejo Editorial
Revista Electrónica Arbitrada Avance Tecnológico

Desarrollo de PetBriz, alimento para mascotas elaborado a partir de biomasa de lombriz dentro de un enfoque de economía circular

JE Fuentes López, DA García López

Resumen: El manejo inadecuado de residuos sólidos orgánicos (RSO), y la creciente demanda de alimentos para mascotas de alta calidad, hacen necesario explorar alternativas sostenibles para solventar problemas integrales. El presente proyecto se estableció como objetivo evaluar la viabilidad del compostaje-vermicompostaje para transformar RSO en biomasa de lombriz y su uso en la elaboración de alimento para mascotas. El desarrollo incluyó la colecta de RSO, precompostaje para su estabilización y vermicompostaje con *Eisenia fetida*. La biomasa cosechada se empleó para producir harina de lombriz, que se incorporó en distintas formulaciones (100%, 50%, 20% y 10%). Se optimizaron condiciones de horneado y se realizó un análisis proximal del producto final. Los resultados mostraron un adecuado proceso de los RSO durante el compostaje con temperaturas superiores a 55°C para desinfectar y eliminar semillas; así como un proceso estable durante la etapa de vermicompostaje (18–23 °C; pH 6–7). Durante la formulación de alimento, un porcentaje del 10% de harina de lombriz presentó la mayor aceptación. Por su parte, el tiempo de horneado en dos fases redujo la humedad por debajo de 5%, y el producto final alcanzó 18% de proteína. Estos resultados demuestran que el proceso permite valorizar RSO y generar ingredientes proteicos alternativos, con potencial para el desarrollo de alimentos para mascotas dentro de un modelo de economía circular.

Palabras Clave: proteína alternativa, economía circular, valorización de residuos, biomasa de lombriz, alimentación animal.

Introducción

El crecimiento poblacional ha generado una alta demanda de alimentos que finaliza con la generación de residuos sólidos orgánicos (RSO). Desafortunadamente, cuando estos residuos no reciben un manejo adecuado pueden generar problemas ambientales como contaminación del suelo y agua, producción de

lixiviados y emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, estos materiales también representan un recurso potencial que puede ser aprovechado mediante tecnologías de tratamiento biológico (Domínguez et al., 2000).

Una alternativa sustentable para el manejo de RSO es el vermicompostaje, proceso en el que las lombrices transforman residuos en un material estabilizado denominado humus o vermicompost, material biológico que aporta nutrientes y materia orgánica al suelo (Villegas-Cornelio & Laines-Canepa, 2017).

Entre las especies más utilizadas para este proceso se encuentra la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*), considerada altamente eficiente para degradar materia orgánica y producir vermicompost (Sharma et al., 2005).

Como otro beneficio adicional a la generación de vermicompost, el cultivo de lombrices permite obtener biomasa de lombriz con alto valor nutritivo. Diversos estudios han demostrado que la harina de lombriz posee un alto contenido proteico superior al 50 %, lo que la convierte en una alternativa viable como ingrediente en la alimentación animal (Carita et al., 2021).

En México, la demanda de alimentos para mascotas ha aumentado significativamente debido al crecimiento del número de hogares con animales de compañía, particularmente perros. Según estimaciones del INEGI (2021) mediante la encuesta ENBIARE, en el país 69.8% de los hogares tenían una mascota, siendo el perro el mayor compañero en los hogares mexicanos (57.4%). Esta tendencia se percibe en crecimiento, ya que muchos jóvenes en la actualidad optan por mascotas como compañeros; por lo cual se vislumbran grandes oportunidades para el desarrollo de nuevas formulaciones de alimentos que utilicen fuentes proteicas alternativas, sostenibles y de alto valor nutricional.

En este contexto, el presente proyecto adquiere relevancia al proponer un modelo de aprovechamiento

de residuos orgánicos basado en principios de economía circular (Figura 1), donde los residuos son transformados en productos de valor agregado como fertilizantes orgánicos y alimentos para mascotas.



Figura 1. Modelo propuesto para crear circularidad en el manejo de RSO hasta la producción de compost y alimento animal.

Metodología

Lugar de investigación y manejo de RSO

El proyecto se desarrolló en el Instituto Tecnológico Superior de Libres (ITSL), en donde existe una campaña permanente de separación de residuos (Figura 2). Los RSO son

colectados y transportados al área de compostaje-vermicompostaje para su procesamiento.



Figura 2. Campaña de separación de residuos en el ITSL

Precompostaje

Tras su colecta, los residuos pasan por un precompostaje que estabiliza la materia orgánica y crea condiciones adecuadas para el vermicompostaje. Este proceso consiste en formar pilas de aproximadamente un metro de altura, combinando material fresco y seco y manteniendo una humedad superior al 70%. Además, se monitorea la temperatura, que debe permanecer por encima de 55 °C durante al menos dos semanas para asegurar un compostaje adecuado. (Figura 3).

Vermicompostaje

El material precompostado se coloca en camas de vermicompostaje con lombrices *Eisenia fetida*, donde se monitorean variables como humedad, temperatura y pH para garantizar condiciones adecuadas. La alimentación se realiza de forma continua cada cuatro semanas, añadiendo una capa de aproximadamente 10 cm de material, junto con riegos periódicos para mantener una humedad cercana al 80%. (Figura 3).



Figura 3. Proceso que incluye la colecta de RSO, precompostaje y vermicompostaje.

Obtención de biomasa de lombriz

La cosecha de lombrices es una etapa crítica por su alto consumo de tiempo y recursos, especialmente cuando se realiza manualmente. Para optimizar este proceso, se implementa un sistema de separación que aprovecha el comportamiento de las lombrices, colocándolas sobre un cernidor expuesto al sol; al evitar la luz, migran hacia abajo y son recolectadas en trampas ubicadas en la parte inferior (Figura 4).

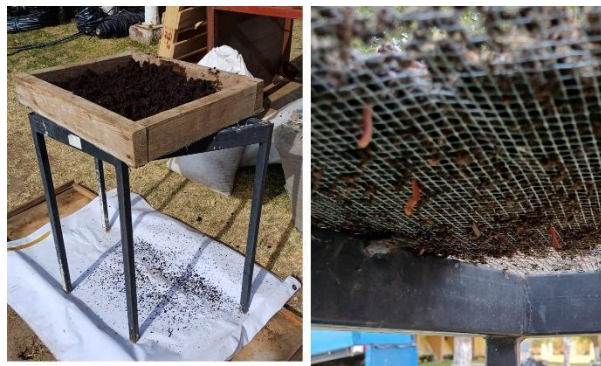


Figura 4. Sistema de separación y cosecha de lombrices

Obtención de harina de lombriz

Para obtener la materia prima que es la harina de lombriz, se realiza un proceso que se compone de varios pasos (Figura 5).



Figura 5. Proceso para obtener la harina de lombriz.

Formulación de alimento para mascotas

Se realizaron diversas pruebas experimentales para desarrollar un alimento para mascotas a base de harina de lombriz, evaluando diferentes formulaciones con variaciones en la concentración de este ingrediente. Los prototipos obtenidos fueron probados para observar su aceptación por parte de perros. Asimismo, se optimizó el tiempo de horneado y se aplicaron tratamientos térmicos con el objetivo de reducir la humedad y evitar el crecimiento de hongos, mejorando así la estabilidad del producto. Finalmente, se analizaron parámetros nutricionales como proteína, grasa, carbohidratos, minerales y humedad, y se diseñaron el nombre y empaque del producto conforme a la normativa mexicana para alimentos de consumo animal.

Resultados

Tratamiento previo de los RSO

Durante la etapa de precompostaje los residuos son procesados para eliminar patógenos e inhibir semillas que puedan germinar posteriormente. Para garantizar esto último, se verificó que la temperatura de la pila de precompostaje se mantuviera por encima de los 55°C por más de dos semanas continuas (Figura 6).

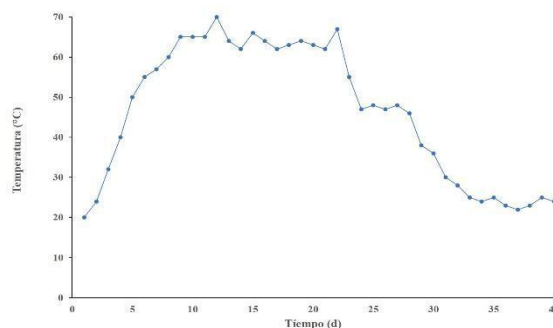


Figura 6. Monitoreo de temperatura en la pila de precompostaje de RSO.

Durante la etapa de vermicompostaje se monitorearon la temperatura y el pH de las camas con lombriz. Los resultados (Figura 7) evidenciaron un proceso estable, con temperaturas entre 18 y 23 °C y valores de pH cercanos a 6–7, dentro de rangos adecuados para el desarrollo y actividad de las lombrices.

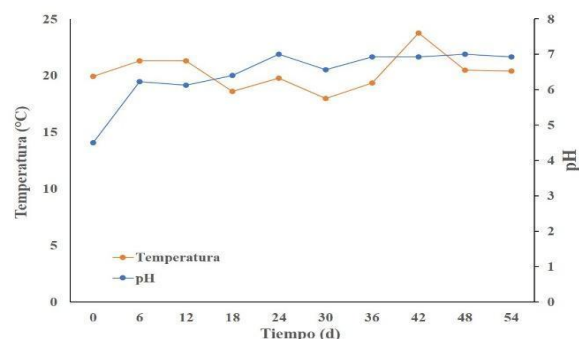


Figura 7. Monitoreo de temperatura en camas de vermicompostaje alimentadas con precompostaje de la etapa anterior.

Formulación de alimento para mascotas

La harina de lombriz obtenida del tratamiento de RSO se utilizó para la elaboración de un alimento para mascotas. Inicialmente, se evaluaron diferentes concentraciones de

harina de lombriz (100%, 50%, 20% y 10%) incorporadas en una masa a base de harinas (Figura 8). La prueba de aceptación, realizada con un total de 10 perros ($n=10$), mostró una mayor preferencia por la formulación con 10% de harina de lombriz, por lo que esta concentración fue seleccionada para el desarrollo del producto final. La prueba de aceptación del alimento se realizó bajo un enfoque observacional y no invasivo, procurando en todo momento el bienestar de los animales participantes. Los perros incluidos en la evaluación fueron expuestos únicamente a una prueba breve de consumo voluntario, sin procedimientos dolorosos, manipulación agresiva ni restricción prolongada de alimento. Se ofrecieron pequeñas porciones de las formulaciones evaluadas en condiciones habituales de manejo, observando su respuesta de aceptación de manera directa. En todo momento se evitó generar estrés, malestar o riesgo para los animales.

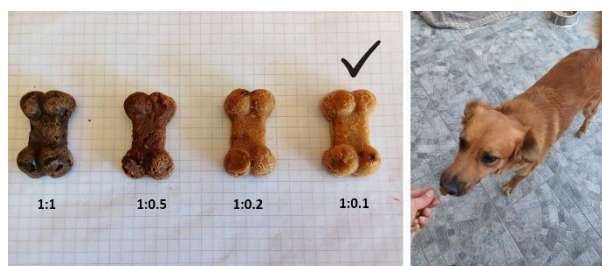


Figura 8. Prueba de concentraciones de harina de lombriz en alimento para perro.

Posteriormente, se evaluaron diferentes condiciones de horneado para obtener un producto con adecuada estructura y bajo contenido de humedad. Se ensayaron tres tratamientos: horneado a alta temperatura por corto tiempo (1 h a 200 °C), un proceso en dos fases (1 h a 150 °C + 2 h a 100 °C) y un tratamiento a baja temperatura por tiempo prolongado (24 h a 70 °C). Los resultados indicaron que el tratamiento a alta temperatura en corto tiempo fue ineficiente, ya que mantuvo un alto contenido de humedad. En contraste, los otros dos tratamientos lograron reducir la humedad por debajo del 5% (Tabla 1). Se seleccionó el método de dos fases, debido a que permite alcanzar niveles similares de deshidratación con un menor consumo de tiempo y energía.

Tabla 1. Prueba de tiempos de horneado para reducir el contenido de humedad.

Tratamiento	% Humedad
1h 200°C	47.22±5.38
1h 150°C+2 h 100°C	4.30±0.76
24 h 70°C	4.01±1.31

Para conocer el porcentaje de componente en el alimento se realizaron pruebas en el laboratorio de industria alimentarias del ITSL y los resultados se observan en la tabla 2. El porcentaje de proteína alcanzado, no es de un nivel de marca premium para perros que supera el 20 o incluso llega hasta un 25%, pero compite con porcentajes de marcas medias a económicas que rondan entre el 12 y 18%. Por lo cual se considera que el producto brinda una cantidad aceptable en términos de proteína.

Finalmente, para el empaquetado provisional del producto se seleccionó un material que brinda protección contra la humedad y permite la apreciación visual del contenido. Asimismo, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-ZOO-1993, se estableció la inclusión de un etiquetado que indique la composición nutrimental del producto. En consecuencia, se incorporó una etiqueta con la información correspondiente a los principios nutritivos, presentada en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de los componentes presentes en el alimento para perro elaborado a partir de harina de lombriz.

Componente	Porcentaje
Proteína	18.0 %
Carbohidratos	59.16%
Grasa	10.20 %
Minerales	9.13%
Humedad	3.42%

Prueba de aceptación

La evaluación de aceptación del alimento se realizó con una muestra piloto de 10 perros ($n=10$), empleada con fines exploratorios para identificar de manera preliminar la formulación con mayor palatabilidad. Debido al carácter inicial del estudio y a la disponibilidad de animales para observación, no se planteó en esta etapa un diseño inferencial de gran escala, sino una prueba comparativa básica entre formulaciones. A cada animal se le ofrecieron las distintas muestras elaboradas con 100%, 50%, 20% y 10% de harina de lombriz incorporada en la mezcla base, registrando la aceptación observada de manera directa. A partir de esta prueba se identificó una mayor preferencia por la formulación con 10% de harina de lombriz, la cual fue seleccionada para la optimización del producto final.

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que el compostaje y vermicompostaje pueden integrarse de manera funcional en esquemas de valorización de residuos sólidos orgánicos, no solo para la producción de abonos, sino también como vía indirecta para la obtención de biomasa con potencial proteico. Este hallazgo coincide con la tendencia actual de explorar fuentes alternativas de proteína dentro de sistemas agroalimentarios más sostenibles, especialmente cuando se articulan con principios de economía circular. Estudios recientes han señalado que las proteínas alternativas deben evaluarse no solo por su composición nutricional, sino también por su aceptabilidad, funcionalidad tecnológica y viabilidad productiva.

En este trabajo, aunque la harina de lombriz representa una fuente proteica con potencial, la prueba de aceptación mostró que su incorporación en altas proporciones puede afectar la palatabilidad del alimento. La preferencia observada por la formulación con 10% sugiere que, en etapas tempranas de desarrollo, niveles moderados de inclusión podrían ser más adecuados para equilibrar aporte nutricional y aceptación por parte del animal. Este resultado es relevante, ya que la aceptación sensorial constituye un factor decisivo en el desarrollo de alimentos para mascotas.

Desde el punto de vista nutricional, el producto final alcanzó un contenido de proteína de 18%, valor que, si bien no corresponde a formulaciones premium, sí se ubica dentro de rangos competitivos frente a productos

comerciales de gama media o económica. No obstante, este resultado también evidencia la necesidad de continuar optimizando la formulación para incrementar el valor proteico y mejorar el balance de nutrientes.

Otro aspecto importante es que el estudio tuvo un alcance exploratorio. La prueba de aceptación se realizó con una muestra reducida, útil para una evaluación preliminar, pero insuficiente para establecer conclusiones generalizables sobre preferencia o desempeño nutricional en perros. Por ello, futuras investigaciones deberán considerar tamaños muestrales mayores, pruebas controladas de palatabilidad y evaluaciones de digestibilidad, inocuidad y estabilidad del producto.

Finalmente, aunque el mercado de alimentos para mascotas ha mostrado creciente interés por proteínas alternativas, la mayor parte del desarrollo comercial reciente se ha concentrado en harinas de insectos. En comparación, la harina de lombriz sigue siendo una opción poco explorada, lo cual representa al mismo tiempo una limitación y una oportunidad de innovación.

Su integración en alimentos para mascotas requerirá fortalecer la evidencia técnica, económica y regulatoria para facilitar su eventual escalamiento comercial.

Futuras líneas de investigación

Como futuras investigaciones de este proyecto se considera mejorar la formulación para proveer un mayor contenido nutricional. Verificar regulaciones existentes para poder generar un producto a la venta. Verificar costos de producción para hacer un producto competitivo. Automatizar procesos, principalmente la cosecha de lombriz. Se pretende explorar otras líneas de alimentación animal como en peces, aves o incluso es posible usar la harina de lombriz para suplementar dietas en animales de granja.

Continuar con el desarrollo de este proyecto es de relevante ya que este proyecto busca el desarrollo sostenible insertándose dentro de un modelo de economía circular y se alinea a objetivos del desarrollo sostenibles como:

ODS 12 – Producción y consumo responsables: Promueve economía circular al transformar residuos en productos de valor.

ODS 13 – Acción por el clima: Evita que residuos orgánicos acumulen.

ODS 15 – Vida de ecosistemas terrestres: El vermicompostaje favorece la salud del suelo.

Conclusiones

El proyecto mostró que el manejo adecuado de RSO puede convertirse en una oportunidad para generar nuevos productos y modelos de negocio sustentable

La lombriz cosechada se puede transformar en harina con alto contenido proteico, la cual presenta potencial para su uso en alimentos para animales.

Fue posible desarrollar un alimento para mascotas con harina de lombriz como fuente de proteína.

Referencias

- Domínguez, J., Edwards, C., & Webster, M. (2000). Vermicomposting: A process for the stabilization of organic wastes.
- García-López, D. (2025). Evaluación de dos fuentes orgánicas (humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*) en la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Tecnología en Marcha*, 38(3), 45-53.
- García-López, D. (2025). Pequeños habitantes del suelo: las lombrices, ingenieras del suelo. *Voces del Suelo*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). En México, 69.8 % de los hogares tienen al menos una mascota (Comunicado de prensa núm. 702/21). <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/7021>
- Maisarah, S., et al. (2022). Vermicomposting as a sustainable approach for organic waste recycling.
- Sharma, S., et al. (2005). Earthworms in waste management and sustainable agriculture.
- Villegas-Cornelio, V., & Laines-Canepa, J. (2017). Vermicompostaje. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.

Currículo corto de los autores

Jhoel Esteban Fuentes López. Estudiante de la licenciatura en ingeniería en innovación agrícola sustentable, actualmente concluyendo el octavo semestre académico en el Instituto Tecnológico Superior de Libres Puebla.

Daniel Alejandro García López. Doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología A.C. (2021). Actualmente es docente e investigador en la academia de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable del TecNM campus Libres. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (nivel candidato) y perfil deseable PRODEP. Sus líneas de investigación incluyen microbiología ambiental, manejo y gestión de recursos y agroecología. Contacto: daniel.gl@libres.tecnm.mx

Eficiencia de la inversión pública y desarrollo turístico en Balancán, Tabasco: percepción ciudadana ante el Tren Maya

L. A. Méndez Jiménez, K. Landero Valenzuela, R. E. Coop Abreu, N. Gutiérrez Posadas

Resumen

La llegada del Tren Maya al municipio de Balancán, Tabasco, abrió una ventana de oportunidad para diversificar la economía local mediante el turismo. Sin embargo, la disponibilidad de infraestructura federal no garantiza por sí sola, transformaciones territoriales equitativas si la gestión municipal de la inversión pública carece de planificación estratégica, evaluación de resultados y participación comunitaria. Bajo un diseño metodológico mixto secuencial exploratorio, con encuesta estructurada a 154 residentes (agosto-diciembre 2025), observación de campo en cuatro sitios turísticos y revisión documental de fuentes gubernamentales, el estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia percibida de la inversión pública en turismo y caracterizar su impacto desde la perspectiva de los actores locales durante el período 2023-2025. Los hallazgos muestran reconocimiento ciudadano de mejoras en infraestructura y empleo, junto con brechas persistentes en conectividad vial, transparencia presupuestal, formación de capital humano y participación comunitaria efectiva. Se concluye que la eficiencia técnica del gasto no se traduce automáticamente en desarrollo equitativo y que el capital cívico expresado en una disposición ciudadana a participar del 92.6% constituye un activo institucional subaprovechado. El estudio cierra con recomendaciones orientadas a fortalecer el ciclo completo de la inversión pública turística municipal.

Palabras clave: inversión pública, gestión turística, Tren Maya, Balancán, turismo comunitario, gobernanza turística, evaluación de políticas públicas.

Introducción

El turismo se ha consolidado como uno de los vectores más dinámicos del desarrollo económico en América Latina, con capacidad de activar cadenas productivas locales, generar empleo y movilizar recursos hacia

territorios históricamente marginados de los circuitos del crecimiento (Organización Mundial del Turismo [OMT], 2023). En México, el sector aportó una proporción relevante del producto interno bruto nacional durante 2022, con una recuperación sostenida tras la pandemia (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2023). Esta dinámica adquiere particular relevancia en el contexto del Tren Maya, un megaproyecto federal que reconfigura la conectividad y la oferta turística del sureste del país.

Balancán, municipio de la Región de los Ríos de Tabasco, reúne condiciones excepcionales para el desarrollo turístico: ecosistemas ribereños del Usumacinta, la zona arqueológica de Moral-Reforma, el Área Natural Protegida Wanhá y una gastronomía regional de identidad reconocible (Secretaría de Turismo del Estado de Tabasco [SECTUR Tabasco], 2022). Con 66,745 habitantes y una economía predominantemente agropecuaria (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020), el municipio ve en el turismo una alternativa real de diversificación económica. No obstante, la brecha entre el potencial patrimonial y el desempeño turístico efectivo persiste, y se atribuye en medida significativa a deficiencias estructurales en la gestión de la inversión pública, tal como documentaron ya Coop Abreu et al. (2018) en un diagnóstico previo sobre la infraestructura turística municipal.

La pregunta central de este trabajo es: ¿cuál es la eficiencia percibida de la gestión de la inversión pública en el desarrollo turístico de Balancán durante el período 2023-2025, y qué impacto le atribuyen los actores locales? Responderla tiene implicaciones prácticas inmediatas, pues cada peso mal aplicado representa una oportunidad de desarrollo perdida para comunidades que aún dependen mayoritariamente del sector primario (Fondo Monetario Internacional [FMI], 2020). El Fondo Nacional de Fomento al Turismo reporta avances físicos y financieros considerables en la construcción del megaproyecto (Fonatur, 2023); sin embargo, esos reportes documentan sobre todo la ejecución de la obra federal, no la calidad de la gestión municipal

complementaria, que constituye el objeto específico de este estudio.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: tras una síntesis del marco teórico sobre inversión pública y turismo, se describe el diseño metodológico mixto adoptado, se presentan y discuten los resultados principales, y se formulan conclusiones y recomendaciones orientadas a mejorar el ciclo completo de la inversión pública en turismo sustentable.

El objetivo general de este estudio consistió en evaluar la eficiencia percibida de la inversión pública en el desarrollo turístico de Balancán, Tabasco, durante el período 2023-2025, así como caracterizar su impacto desde la perspectiva de los actores locales en el contexto de la llegada del Tren Maya. De este propósito general se desprenden cuatro objetivos específicos: (a) identificar la percepción ciudadana sobre las mejoras observables en infraestructura turística y su distribución territorial; (b) analizar los principales retos que enfrenta el sector turístico municipal desde la óptica de los residentes; (c) determinar el nivel de disposición ciudadana a participar en la gestión turística local, como indicador de capital cívico; y (d) formular recomendaciones orientadas a fortalecer el ciclo completo de la inversión pública turística municipal, desde la preinversión hasta la evaluación ex post.

Marco Teórico

Inversión pública, eficiencia y desarrollo turístico

La inversión pública comprende las erogaciones gubernamentales orientadas a crear, ampliar o mejorar activos físicos e institucionales, con efectos multiplicadores de mediano y largo plazo sobre la economía y el bienestar social (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú [MEF], 2019). Desde la perspectiva keynesiana, el gasto público en inversión activa la demanda agregada y dinamiza el empleo en contextos de insuficiencia de inversión privada (Keynes, 1936/2003; Dornbusch et al., 2009). El Banco Interamericano de Desarrollo advierte, sin embargo, que en países con instituciones fiscales débiles las pérdidas de eficiencia del gasto público pueden alcanzar hasta 4.4% del producto interno bruto regional, derivadas de fallas en la selección de proyectos, sobrecostos de ejecución y ausencia de evaluación ex post (Izquierdo et al., 2018).

Distinguir entre dos nociones de eficiencia resulta fundamental para evaluar inversiones turísticas (Afonso et al., 2013). La eficiencia técnica consiste en maximizar los resultados obtenidos dado un nivel determinado de recursos. La eficiencia asignativa, en cambio, consiste en orientar esos mismos recursos hacia los usos de mayor valor social. Un proyecto puede ejecutarse en tiempo y forma, pero orientarse a atractivos de bajo impacto turístico, o a la inversa. La Nueva Gestión Pública (Hood, 1991; Osborne & Gaebler, 1992) y el enfoque de gobernanza turística (Bramwell & Lane, 2011) ofrecen marcos normativos complementarios que insisten en la planificación por resultados, la coordinación interinstitucional y la participación ciudadana como condiciones estructurales de la eficiencia.

El ciclo de la inversión pública y la evaluación ex post

El ciclo de vida de la inversión pública comprende tres fases: preinversión (identificación, formulación y evaluación del proyecto), inversión (ejecución) y postinversión (operación, mantenimiento y evaluación de resultados) (Secretaría de Hacienda y Crédito Público [SHCP], 2022). La evidencia internacional señala que las pérdidas de eficiencia más severas se producen en los eslabones extremos del ciclo: en la preinversión, por la selección de proyectos sin análisis riguroso de costo-beneficio social, y en la postinversión, por la ausencia sistemática de evaluación que retroalimente la política pública (Rajaram et al., 2014). En el contexto mexicano, la Auditoría Superior de la Federación ha documentado reiteradamente que la evaluación ex post de proyectos turísticos financiados con recursos federales presenta deficiencias estructurales que impiden la rendición de cuentas y el aprendizaje institucional (ASF, 2023).

Turismo sustentable, comunitario y Tren Maya

El turismo sustentable satisface las necesidades de los visitantes actuales y de las regiones receptoras, al tiempo que protege los recursos para las generaciones futuras (OMT, 2023). El turismo comunitario agrega una dimensión de empoderamiento: las comunidades no solo reciben beneficios, sino que ejercen agencia sobre el modelo turístico y la gestión de sus recursos naturales y culturales (Zorn & Farthing, 2007). Esta perspectiva adquiere especial relevancia en contextos como Balancán, donde el acervo de conocimiento ecológico local sobre los humedales del Usumacinta difícilmente puede ser sustituido por técnicos externos.

El Tren Maya con aproximadamente 1,500 kilómetros de longitud y conexión entre cinco estados del sureste mexicano representa el megaproyecto de infraestructura de mayor envergadura ejecutado en la región en las últimas décadas (Gobierno de México, 2023). Su impacto territorial, no obstante, tiende a ser asimétrico: los beneficios económicos documentados se concentran en los estados y municipios con oferta turística ya consolidada, mientras que entidades como Tabasco, orientadas históricamente al sector energético, capturan una proporción considerablemente menor de la derrama generada por el proyecto (Espinosa Ovando et al., 2023). La literatura sobre megaproyectos de transporte advierte, además, que la infraestructura ferroviaria despliega su pleno potencial de desarrollo solo cuando se acompaña de inversiones complementarias en conectividad secundaria, formación de capital humano y servicios de recepción (Coop Abreu et al., 2018; Perroux, 1955).

Los antecedentes empíricos más próximos a este estudio provienen del propio corredor del Tren Maya en el sureste mexicano. Espinosa Ovando et al. (2023) documentan que los beneficios económicos del megaproyecto se han distribuido de manera desigual entre los cinco estados de la ruta: mientras Quintana Roo capitaliza una derrama turística consolidada desde hace décadas, Tabasco continúa posicionado como destino de negocios vinculado al sector energético, con una afluencia turística marginal frente a la de sus vecinos peninsulares. En el ámbito municipal, Coop Abreu et al. (2018) ya habían advertido, antes de la llegada del tren, que Balancán arrastraba rezagos estructurales en infraestructura, señalización y superestructura turística que limitaban su capacidad de aprovechar el patrimonio natural y arqueológico del municipio. Más recientemente, Landero Valenzuela et al. (2024) identificaron, en las comunidades rurales de Balancán con recursos turísticos, una tensión persistente entre el interés de los visitantes por prácticas sustentables y la ausencia de esquemas locales de gestión que garanticen su continuidad. Estos tres estudios, realizados por integrantes del mismo cuerpo académico que suscribe la presente investigación, configuran una línea de trabajo acumulativa sobre la que este artículo pretende avanzar, al incorporar de manera explícita la dimensión de la eficiencia de la inversión pública como variable explicativa del rezago turístico municipal.

Metodología

La investigación adoptó un diseño mixto secuencial exploratorio (Creswell & Creswell, 2018), que privilegia los datos cuantitativos como base y los complementa con evidencia cualitativa de campo para profundizar en los mecanismos causales subyacentes a los patrones estadísticos. Esta triangulación metodológica fortalece la validez interna del estudio (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Instrumentos y procedimiento

Se aplicó una encuesta estructurada con 15 ítems distribuidos en seis bloques temáticos: perfil sociodemográfico, percepción del desarrollo turístico, atractivos turísticos, inversión pública y transparencia, retos y participación comunitaria, e impacto económico. Los ítems de opinión y actitud utilizaron escala Likert de cinco puntos (1 = muy en desacuerdo/muy insatisfecho; 5 = totalmente de acuerdo/muy satisfecho). El instrumento fue validado mediante juicio de dos docentes investigadores de la Licenciatura en Administración del Instituto Tecnológico Superior de los Ríos (ITSR) y ajustado tras una prueba piloto con 15 participantes no incluidos en la muestra final; el Anexo A resume su estructura completa por bloques temáticos.

La encuesta se aplicó tanto en formato presencial como en espacios públicos de la cabecera municipal y en las instalaciones del ITSR como en modalidad digital mediante Google Forms, durante el período agosto-diciembre de 2025. De forma complementaria, se realizaron tres visitas de campo en septiembre y noviembre de 2025 a los principales atractivos del municipio: la zona arqueológica de Moral-Reforma, la Estación El Triunfo del Tren Maya, el museo arqueológico José Gómez Panaco y las cascadas de Reforma. Las visitas incluyeron días laborales y fines de semana, con el propósito de capturar la variabilidad en el flujo de visitantes.

Consideraciones éticas

La aplicación del instrumento se rigió por los principios de consentimiento informado, confidencialidad y anonimato. Antes de responder, cada participante fue informado de manera verbal en la modalidad presencial y mediante el encabezado del formulario en la modalidad digital sobre el propósito académico del estudio, el carácter voluntario de su participación, la posibilidad de

abandonar la encuesta en cualquier momento sin consecuencia alguna, y el uso exclusivamente agregado y estadístico de la información recabada. No se solicitaron datos que permitieran identificar individualmente a los encuestados nombre, domicilio exacto o identificación oficial, y las bases resultantes se resguardaron en formato anonimizado, accesible únicamente al equipo de investigación. Por tratarse de un estudio de percepción con riesgo mínimo, que no implicó intervención alguna sobre la integridad física, psicológica o patrimonial de los participantes, el protocolo fue revisado y avalado internamente por la Academia de Investigación de la Licenciatura en Administración del ITSR, en congruencia con los lineamientos institucionales de ética en la investigación del Tecnológico Nacional de México.

Población y muestra

La población objetivo comprendió a residentes mayores de 18 años del municipio de Balancán y de los municipios limítrofes de Tenosique y Candelaria, dado que los atractivos y las rutas de acceso vinculadas al Tren Maya en esta subregión no respetan estrictamente los límites político-administrativos. Se establecieron como criterios de inclusión: (a) residencia habitual en el municipio de Balancán o en los municipios limítrofes señalados, (b) edad igual o mayor a 18 años, y (c) disposición voluntaria a participar tras haber sido informado del propósito del estudio. Se excluyó a personas menores de edad, a visitantes ocasionales sin residencia en la región y a servidores públicos directamente responsables de la administración de los proyectos de inversión evaluados, con el fin de reducir el riesgo de sesgo de deseabilidad institucional en las respuestas.

El tamaño muestral de 154 casos válidos se estableció con base en los parámetros habituales para estudios exploratorios con muestreo no probabilístico intencional en ciencias sociales. La literatura metodológica recomienda un mínimo de 100 a 150 casos para permitir un análisis descriptivo estable por subgrupos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). Este rango se ajustó, además, de manera pragmática a la capacidad operativa del equipo de campo durante el periodo de levantamiento.

El procedimiento de selección combinó dos estrategias. La primera fue un muestreo por conveniencia en espacios públicos de la cabecera municipal y en las

instalaciones del ITSR. La segunda fue un muestreo de bola de nieve para la aplicación digital, en el que los primeros respondientes compartieron la liga del formulario dentro de su propia red social. Este procedimiento no permite calcular un error muestral formal ni generalizar los resultados al conjunto de la población municipal. Si logra, en cambio, capturar la heterogeneidad territorial y sectorial buscada: la muestra final quedó compuesta por 64.3% de residentes de Balancán, 16.2% de Tenosique, 9.1% de Candelaria y 10.4% de otras localidades. Esta distribución refleja razonablemente la dinámica territorial del área de influencia del Tren Maya en la Región de los Ríos.

Entre los sesgos esperados de este procedimiento destacan tres. El primero es un sesgo de accesibilidad digital: la aplicación mixta (presencial y por Google Forms) pudo subrepresentar a la población de mayor edad o con menor conectividad, particularmente en localidades rurales alejadas de la cabecera municipal. El segundo es un sesgo de autoselección, propio de cualquier muestreo no probabilístico, en la medida en que las personas con mayor interés previo en el tema turístico pudieron mostrarse más dispuestas a participar. El tercero es un posible sesgo de deseabilidad social en las preguntas sobre transparencia presupuestal, que se intentó mitigar mediante la aplicación anónima del instrumento. Estas limitaciones se retoman en la sección de discusión.

El análisis cuantitativo empleó estadística descriptiva, frecuencias absolutas y relativas, medidas de tendencia central procesada en Google Sheets. El análisis cualitativo del diario de campo siguió un procedimiento de codificación temática inductiva, que identificó patrones recurrentes clasificados en categorías emergentes coherentes con los ejes del marco teórico.

Resultados

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la eficiencia percibida por los residentes respecto de la inversión pública turística, y no a un cálculo técnico de eficiencia presupuestal a partir de datos de ejecución del gasto, en virtud de las limitaciones de acceso a información financiera desagregada que se detallan en la discusión.

Perfil sociodemográfico y contexto económico

Como se observa en la Tabla 1, del total de participantes 41.6% declaró residir toda su vida en el municipio y un 24% adicional señaló más de diez años de arraigo territorial. Esta mayoría de residentes de larga data otorga al estudio una perspectiva de cambio histórico que trasciende la coyuntura. Respecto al perfil sectorial, 64.1% se identificó como público en general, 18.3% como servidor público, 15% como profesionista y 4.6% como empresario. La actividad económica predominante identificada fue la agricultura y ganadería (78.6%), seguida del comercio y servicios (20.1%) y el turismo (14.3%), lo que confirma el perfil económico poco diversificado del municipio y su dependencia del sector primario.

Tabla 1. Perfil sociodemográfico de los participantes (n = 154)

Variable	Categoría	Frecuencia (%)
Tiempo de residencia	Toda la vida	41.6
	Más de 10 años	24.0
	5 a 10 años	20.4
	Menos de 5 años	14.0
Sector	Público en general	64.1
	Servidor público	18.3
	Profesionista	15.0
	Empresario	4.6
Actividad económica predominante	Agricultura/ganadería	78.6
	Comercio y servicios	20.1
	Turismo	14.3

Nota. Elaboración propia con base en la encuesta aplicada (n = 154), agosto-diciembre de 2025.

Percepción del impacto del Tren Maya

Aproximadamente un tercio de los encuestados expresó insatisfacción con el nivel de desarrollo turístico alcanzado, argumentando que las expectativas generadas por el Tren Maya no se han traducido en beneficios tangibles para sus comunidades. Un porcentaje similar se declaró satisfecho o muy satisfecho, y reconoció mejoras en la afluencia de visitantes, en la generación de empleos vinculados al sector y en el surgimiento de nuevos emprendimientos de servicios turísticos. Esta distribución heterogénea de percepciones no resulta inesperada: la literatura sobre megaproyectos turísticos

documenta que los efectos distributivos son asimétricos y tienden a concentrarse en quienes se ubican en la proximidad geográfica y social del proyecto (Murray, 2020; Sassen, 2020).

La Tabla 2 muestra el ordenamiento de los atractivos turísticos según su potencial de impacto post-Tren Maya, que presenta también una consistencia notable: los sitios arqueológicos encabezaron las menciones (61.4%), seguidos de las áreas naturales (57.5%), la gastronomía regional (52.9%), las expresiones culturales y fiestas patronales (51.6%) y la infraestructura turística existente (28.1%). Solo 4.6% de los encuestados consideró que el municipio carece de atractivos relevantes, lo que refleja un consenso ciudadano sobre la riqueza patrimonial del territorio. La zona arqueológica de Moral-Reforma representa, en particular, una oportunidad de diferenciación competitiva real: a diferencia de sitios saturados como Palenque o Chichén Itzá, ofrece una experiencia más íntima para el segmento de turismo arqueológico especializado.

Tabla 2. Atractivos turísticos con mayor potencial de impacto percibido

Atractivo turístico	Menciones (%)
Sitios arqueológicos (Moral-Reforma)	61.4
Áreas naturales (Usumacinta, Wanhá)	57.5
Gastronomía regional	52.9
Cultura y tradiciones	51.6
Infraestructura turística existente	28.1
Sin atractivos relevantes	4.6

Nota. Elaboración propia. Pregunta de opción múltiple; los porcentajes no suman 100%.

Inversión pública, infraestructura y transparencia

Una proporción significativa de los encuestados reconoció mejoras observables en infraestructura turística general, rehabilitación de espacios públicos, mejora de imagen urbana y señalización básica en algunos sitios, lo que sugiere un impacto físico perceptible de las inversiones. La percepción sobre la

inversión en vías de acceso a los atractivos fue, en cambio, marcadamente menos favorable: la conectividad vial emergió como el déficit más urgente desde la perspectiva ciudadana. Este resultado coincide con la literatura especializada en gobernanza turística, que identifica la accesibilidad como uno de los determinantes centrales de la competitividad de un destino (Bramwell & Lane, 2011).

Respecto a la distribución percibida de la inversión por tipo de sitio, las zonas arqueológicas concentraron el mayor reconocimiento de inversión (38.2%), seguidas de parques y espacios recreativos (36.2%), hoteles y hospedaje (34.9%), gastronomía y mercados locales (18.5%), áreas naturales protegidas (12.3%), centros culturales comunitarios (8.7%) y señalización y accesos viales (7.1%). Este patrón revela una brecha entre los atractivos con mayor potencial turístico, áreas naturales y conectividad y los que reciben mayor inversión pública percibida. La transparencia presupuestal fue señalada, además, como un desafío estructural: los participantes identificaron dificultades para acceder a información clara sobre los montos invertidos y los criterios de priorización de proyectos, hallazgo coherente con las observaciones de la ASF (2023).

Retos, participación comunitaria y capital cívico

Los retos del turismo municipal, ordenados por frecuencia de mención, configuran una agenda de política pública precisa: falta de capacitación del personal turístico (41.2%), escasa promoción turística (36.6%), costos elevados de acceso a los servicios (34.0%), impacto ambiental del Tren Maya (32.0%), infraestructura insuficiente (31.4%), desplazamiento de comunidades (29.4%), inseguridad (22.9%) y problemas de conectividad digital (18.3%).

El posicionamiento de la capacitación como reto prioritario merece una reflexión particular. La calidad de la experiencia turística depende decisivamente del capital humano local: guías con conocimiento profundo del patrimonio, prestadores de servicio con competencias básicas en idiomas e higiene, artesanos capaces de narrar el valor cultural de sus productos. La ausencia de programas sistemáticos de formación constituye una brecha que la sola inversión en infraestructura física difícilmente logra compensar.

El hallazgo más esperanzador del estudio es, quizás, el relativo al capital cívico: 53.3% de los encuestados manifestó disposición total a participar en las decisiones sobre el turismo local, y un 39.3% adicional expresó disposición condicionada a recibir mayor apoyo institucional. Solo 8.7% mostró desinterés. Esta alta voluntad participativa 92.6% en términos agregados, constituye un activo institucional subaprovechado, que puede convertirse en ventaja competitiva real del destino si se traduce en mecanismos formales de gobernanza turística participativa (CEPAL, 2022; Izquierdo et al., 2018).

Discusión

Los resultados del presente estudio configuran un cuadro complejo que no admite lecturas simplistas. El Tren Maya ha tenido un impacto positivo pero desigual en el desarrollo turístico de Balancán: ha mejorado la conectividad, ha incrementado la visibilidad del municipio en los circuitos turísticos regionales y ha generado empleos incipientes vinculados al sector. Al mismo tiempo, ha puesto en evidencia déficits estructurales de la gestión pública local que preexistían al proyecto y que la inversión federal, por sí sola, no puede subsanar.

Desde la perspectiva del gasto público, los hallazgos confirman la advertencia de Izquierdo et al. (2018): las instituciones con capacidad técnica limitada tienden a generar pérdidas sistemáticas que afectan tanto la selección como la evaluación de los proyectos. La ausencia documentada de indicadores de desempeño turístico vinculados a las inversiones municipales impide identificar qué funciona y qué no, y perpetúa ciclos de inversión con bajo retorno social. Esta limitación no es exclusiva de Balancán; la ASF (2023) la identifica como un patrón estructural en los municipios turísticos mexicanos.

Conviene matizar, no obstante, que la percepción ciudadana capturada en este estudio no es la única dimensión de la eficiencia, ni la más objetiva. El acceso limitado del equipo de investigación a datos administrativos desagregados sobre ejecución presupuestal turística a nivel municipal señalado ya como criterio de exclusión metodológica impide construir indicadores objetivos de eficiencia técnica, y obliga a depender, en mayor medida, de la percepción ciudadana como proxy de impacto. A esta limitación se

suman las tres fuentes de sesgo descritas en el apartado de muestra: la subrepresentación digital de la población de mayor edad, la autoselección propia del muestreo no probabilístico y la posible discapacidad social en las respuestas sobre transparencia. Futuros estudios deberían integrar análisis de gasto real solicitado por la vía de transparencia municipal con percepciones ciudadanas, para una evaluación más robusta y menos dependiente de un único tipo de evidencia.

La distribución asimétrica de beneficios detectada es congruente con la literatura sobre megaproyectos turísticos de transporte (Espinosa Ovando et al., 2023; Murray, 2020): quienes tienen vínculos directos con la cadena de valor turística perciben beneficios concretos, mientras que los habitantes de ejidos y rancherías más alejados de la estación ferroviaria experimentan los costos, encarecimiento de la vida, presión sobre los recursos naturales sin acceder proporcionalmente a los beneficios. Esta asimetría, si no se corrige mediante políticas activas de distribución, puede profundizar las desigualdades territoriales internas del municipio.

Desde el marco del turismo sustentable (OMT, 2023; Zorn & Farthing, 2007), Balancán se encuentra en un momento de bifurcación crítica: puede avanzar hacia un modelo de turismo de base comunitaria, culturalmente responsable y ecológicamente sensato, que aproveche el Tren Maya como puerta de entrada y no como fin en sí mismo; o puede deslizarse hacia un modelo de extracción turística que concentre los beneficios en actores externos y deteriore los activos patrimoniales que hacen atractivo al municipio. La diferencia entre ambas trayectorias depende, en gran medida, de la calidad de la gestión pública y de la capacidad organizativa de las comunidades.

Conclusiones

Este estudio aporta evidencia empírica sobre cómo perciben los residentes de Balancán, Tabasco, la gestión de los recursos públicos destinados al turismo durante el período 2023-2025. Cinco conclusiones sustantivas emergen del análisis.

Primera: la eficiencia técnica en la ejecución del gasto turístico no garantiza el impacto equitativo ni la transformación territorial sostenible. Las inversiones reconocibles en infraestructura no han sido acompañadas de sistemas de planificación estratégica, evaluación de

resultados ni participación comunitaria que aseguren su pertinencia social.

Segunda: el Tren Maya representa una oportunidad histórica de reposicionamiento turístico, pero su aprovechamiento pleno requiere una estrategia multinivel que articule la infraestructura federal con inversiones complementarias municipales en conectividad vial secundaria, señalización, servicios de recepción y formación de capital humano.

Tercera: la percepción ciudadana refleja una distribución asimétrica de beneficios que correlaciona con la proximidad a la cadena de valor turística, señal de una inequidad territorial interna que la gestión pública debe atender activamente.

Cuarta: la capacitación de prestadores de servicios turísticos emerge como la prioridad más urgente desde la perspectiva de los propios actores locales, por encima incluso de la inversión en nueva infraestructura física.

Quinta: la alta disposición ciudadana a participar (92.6%) expresión concreta del capital cívico municipal documentado en este estudio, constituye un activo institucional subaprovechado. La construcción de mecanismos formales de gobernanza participativa podría transformar esa voluntad en ventaja competitiva real del destino turístico.

Entre las líneas de investigación futura que este trabajo abre, destacan: el análisis comparativo de municipios con y sin estación del Tren Maya en Tabasco; la evaluación del impacto ambiental sobre los ecosistemas del Usumacinta; el análisis de género en la distribución de beneficios; y los estudios de seguimiento longitudinal que capturen la trayectoria completa del impacto turístico en el horizonte 2027-2030, idealmente combinados con acceso a datos presupuestales desagregados que permitan superar la limitación central de este estudio.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos, se formulan cinco recomendaciones orientadas a mejorar el ciclo completo de la inversión pública en turismo en Balancán.

R1. Institucionalizar la evaluación ex post. El gobierno municipal, con apoyo del ITSR y la SECTUR Tabasco, debería establecer un sistema de indicadores de

desempeño turístico vinculados a cada proyecto de inversión, con reporte semestral y publicación en el portal de transparencia municipal.

R2. Crear un Comité Municipal de Turismo con representación multisectorial. Integrado por empresarios, comunidades rurales, sector académico y sociedad civil, este órgano consultivo reduciría la discrecionalidad política en la asignación de recursos e incrementaría la legitimidad social de las inversiones.

R3. Diseñar un programa municipal de capacitación en turismo sustentable. En articulación con el ITSR, la SECTUR federal y el CONOCER, orientado a la certificación de estándares de calidad, atención al cliente en inglés básico, buenas prácticas de turismo sustentable y plataformas digitales de comercialización.

R4. Desarrollar una ruta turística integral que conecte la Estación El Triunfo con los principales atractivos del municipio. Con señalización interpretativa, transporte local, guías certificados y productos gastronómicos y artesanales, diseñada de manera participativa con las comunidades del recorrido.

R5. Fomentar cooperativas turísticas comunitarias. Con acompañamiento en asesoría legal, acceso a financiamiento de la banca de desarrollo (NAFIN, FIRA, FOCIR) y asistencia técnica para planes de negocio viables, priorizando a mujeres y jóvenes como sujetos de liderazgo.

Referencias

- Afonso, A., Romero, A., & Monsalve, E. (2013). Public sector efficiency: Evidence for Latin America (Discussion Paper No. IDB-DP-279). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0006949>
- Auditoría Superior de la Federación [ASF]. (2023). Informe general ejecutivo de la Cuenta Pública 2022. Cámara de Diputados del Congreso de la Unión. <https://www.asf.gob.mx>
- Bramwell, B., & Lane, B. (2011). Critical research on the governance of tourism and sustainability. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(4–5), 411–421.
- <https://doi.org/10.1080/09669582.2011.580586>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2022). Perspectivas del turismo en América Latina y el Caribe: hacia una recuperación sostenible. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org>
- Coop Abreu, R. E., Huicab García, Y., & Landero Valenzuela, K. (2018). Diagnóstico de la estructura, infraestructura y superestructura del municipio de Balancán, Tabasco como destino turístico, con enfoque en la teoría de sistemas. En E. Pérez Campuzano y V. E. Mota Flores (Coords.), *Desarrollo regional sustentable y turismo*. Universidad Nacional Autónoma de México / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5.^a ed.). SAGE Publications.
- Dornbusch, R., Fischer, S., & Startz, R. (2009). *Macroeconomía* (10.^a ed.). McGraw-Hill.
- Espinosa Ovando, G., Martínez de Escobar Fernández, A., Rodríguez Ocaña, M. A., Martínez Prats, G., & Gaitán Espinosa, M. (2023). El Tren Maya, repercusiones socioeconómicas, sustentables y competitivas - turística del Sureste Mexicano. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 1809–1830. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.718>
- Fonatur. (2023). *Tren Maya: informe de avance físico y financiero*. Fondo Nacional de Fomento al Turismo. <https://www.gob.mx/fonatur>
- Fondo Monetario Internacional [FMI]. (2020). *Well spent: How strong infrastructure governance can end waste in public investment*. <https://doi.org/10.5089/9781513511818.071>
- Gobierno de México. (2023). *Tren Maya: presentación general del proyecto*. Presidencia de la República. <https://www.gob.mx/trenmaya>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

- Hood, C. (1991). A public management for all seasons? *Public Administration*, 69(1), 3–19. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9299.1991.tb00779.x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2023). Cuenta Satélite del Turismo de México 2022. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>
- Izquierdo, A., Pessino, C., & Vuletin, G. (Eds.). (2018). Mejor gasto para mejores vidas: Cómo América Latina y el Caribe puede hacer más con menos. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0001217-es>
- Keynes, J. M. (2003). Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero (J. de Azcárate Flórez, Trad.). Fondo de Cultura Económica. (Obra original publicada en 1936)
- Landero Valenzuela, K., Huicab García, Y., & Coop Abreu, R. E. (2024). Percepción del visitante en el desarrollo de prácticas sustentables y sostenibles en las comunidades rurales de Balancán, Tabasco que cuentan con recursos turísticos. En P. Wong González y V. E. Mota Flores (Coords.), *Nuevas dinámicas internacionales y reconfiguración regional del turismo* (pp. 317–330). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional.
- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú [MEF]. (2019). Directiva general del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones. MEF. <https://www.mef.gob.pe>
- Murray, I. (2020). Capitalismo y turismo en España: del “milagro económico” a la “gran crisis” (2.ª ed.). Alba Sud Editorial.
- Organización Mundial del Turismo [OMT]. (2023). World Tourism Barometer, 21(1). OMT. <https://doi.org/10.18111/wtobarometereng>
- Osborne, D., & Gaebler, T. (1992). Reinventing government: How the entrepreneurial spirit is transforming the public sector. Addison-Wesley.
- Perroux, F. (1955). Note sur la notion de pôle de croissance. *Économie Appliquée*, 8(1–2), 307–320.
- Rajaram, A., Le, T. M., Biletska, N., & Brumby, J. (2014). A unified framework for public investment management. En A. Rajaram, T. M. Le, K. Kaiser, J.-H. Kim y J. Frank (Eds.), *The power of public investment management: Transforming resources into assets for growth* (pp. 19–39). World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0316-1_ch2
- Sassen, S. (2020). La ciudad global: Nueva York, Londres, Tokio (2.ª ed.). Katz Editores.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público [SHCP]. (2022). Lineamientos para la evaluación de programas y proyectos de inversión. SHCP. <https://www.hacienda.gob.mx>
- Secretaría de Turismo del Estado de Tabasco [SECTUR Tabasco]. (2022). Plan Estatal de Desarrollo Turístico 2019–2024. Gobierno del Estado de Tabasco.
- Zorn, E., & Farthing, L. (2007). Communitarian tourism: Hosts and mediators in Peru. *Annals of Tourism Research*, 34(3), 673–689. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2007.02.002>

Anexo A. Estructura del instrumento aplicado

El cuestionario constó de ítems organizados en seis bloques temáticos, aplicados de forma presencial y digital entre agosto y diciembre de 2025. La Tabla A1 resume su composición.

Tabla A1

Bloques temáticos del instrumento de encuesta

Bloque	Contenido evaluado	Tipo de ítem
1. Perfil sociodemográfico	Residencia, tiempo de arraigo, sector de actividad	Opción múltiple
2. Percepción del desarrollo turístico	Satisfacción con el desarrollo alcanzado	Escala Likert
3. Atractivos turísticos	Potencial de impacto por atractivo	Opción múltiple
4. Inversión pública y transparencia	Distribución percibida de la inversión, acceso a información	Escala Likert
5. Retos y participación comunitaria	Principales retos, disposición a participar	Opción múltiple / Likert
6. Impacto económico	Empleo, emprendimientos, ingresos percibidos	Escala Likert

Nota. Elaboración propia. El instrumento completo, la base de datos anonimizada y el reporte de similitud institucional se remiten como archivos complementarios junto con este manuscrito.

Currículo corto de los autores

L. A. Méndez Jiménez. Doctor en Administración, por la Universidad Valle del Grijalva, año de titulación 8 de noviembre de 2019. Docente de la Licenciatura en Administración, Instituto Tecnológico Superior de los Ríos (Tecnológico Nacional de México). Miembro del cuerpo académico en consolidación Ciencias Socioeconómico-Administrativas. <https://orcid.org/0000-0002-7603-8756> - Contacto: luismendez142014@gmail.com.

K. Landero Valenzuela. Doctora en Administración, por la Universidad Valle del Grijalva, año de titulación 12 de

julio de 2019. Docente de la Licenciatura en Administración, Instituto Tecnológico Superior de los Ríos (Tecnológico Nacional de México). Miembro del cuerpo académico en consolidación Ciencias Socioeconómico-Administrativas. <https://orcid.org/0000-0003-4561-0155>

R. E. Coop Abreu. Doctor en Administración, por la Universidad Valle del Grijalva, año de titulación 29 de julio de 2019. Docente de la Licenciatura en Administración, Instituto Tecnológico Superior de los Ríos (Tecnológico Nacional de México). Miembro del cuerpo académico en consolidación Ciencias Socioeconómico-Administrativas. <https://orcid.org/0000-0002-9412-7031>

N. Gutiérrez Posadas. Doctor (C) en Administración Gerencial, por la Universidad Benito Juárez, en curso. Máster en Administración de Empresas con especialidad en Finanzas Corporativas. Docente en Administración de Empresas e Ingeniería Industrial, Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt (Armenia-Quindío, Colombia). Miembro de la Facultad de Ciencias Administrativas. <https://orcid.org/0000-0002-6687-3336>

Influencia del tamaño de fibra del raquis del banano (*Musa paradisiaca* L.) en materiales lignocelulósicos

M. S. López Jiménez, I. Gómez Rosales, I. López Grijalva, Y. Méndez Pérez

Resumen: El aprovechamiento de residuos agroindustriales representa una alternativa para el desarrollo de materiales de base biológica con potencial para sustituir parcialmente productos derivados de la madera. Por ello, el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia del tamaño y la morfología de la fibra del raquis del banano (*Musa paradisiaca* L.) sobre las características físicas de materiales lignocelulósicos elaborados con almidón de maíz como aglutinante. Se prepararon tres formulaciones mediante diferentes tratamientos físicos de la fibra: triturada (F1), separada longitudinalmente (F2) y en forma de hilos (F3). Los materiales obtenidos fueron sometidos a un proceso de prensado y secado, evaluándose la homogeneidad, compactación, presencia de grietas e integridad estructural. La formulación F1 presentó la superficie más uniforme, mayor cohesión y menor presencia de vacíos y grietas, mientras que las formulaciones F2 y F3 mostraron defectos asociados a una menor compactación de las fibras. Los resultados evidencian que el tratamiento físico de la fibra influye significativamente en la calidad del material lignocelulósico producido. Se identifica que el raquis del banano constituye una materia prima con potencial para el desarrollo de biocompuestos y que la preparación de la fibra es un factor determinante para mejorar sus características físicas.

Palabras Clave: almidón, biocompuestos, biomasa, cohesión, compactación.

Introducción

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos a nivel mundial. Los factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y el cambio climático son la modificación en el desnivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de dióxido de carbono, gas metano, hidratos de metano (Díaz Cordero, 2012).

Estos gases son producidos por diversas actividades del hombre, como el uso de energías eléctricas, la dependencia de los combustibles fósiles por parte del sector industrial o la contaminación de las zonas urbanas por los transportes, el mal uso de los residuos, los procesos industriales, etc. (Vásquez-Dávila y Bravo-Benavides, 2023).

Por ejemplo, los empaques de poliestireno expandido, conocido comercialmente en México como unicel, son ampliamente utilizados en la industria de alimentos, logística y comercio debido a su ligereza, bajo costo y capacidad aislante. Sin embargo, su baja biodegradabilidad genera acumulaciones en los ecosistemas, afectando la biodiversidad y ocasionando problemas de contaminación (Gutiérrez-Chávez y Hernández-Huerta, 2025).

En ese sentido, se han desarrollado distintos materiales a partir de residuos agrícolas con propiedades similares a los tableros de Fibra de Densidad Media (MDF), el cual es un material ampliamente utilizado en la industria de los tableros derivados de la madera por su versatilidad y propiedades únicas (De Prada et al., 2025)

Haro et al. (2017) investigó que en la actualidad los residuos orgánicos producidos en las plantaciones de banano pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración de materiales biodegradables, usando las partes de la planta que son considerados como desechos como el raquis, pseudotallo y las cascara verde del banano. De esta forma se quiere reducir los niveles de contaminación que se genera por la gran acumulación de los desechos plásticos, durante su ciclo de degradación dañan al ecosistema.

La fabricación de tableros MDF implica el consumo de materias primas, energía y adhesivos sintéticos que contribuyen a los impactos ambientales del proceso productivo. Mediante un análisis de ciclo de vida,

Piekarski et al. (2017) identificaron que los principales puntos críticos en la producción MDF corresponden al consumo de gas natural para la generación de energía térmica, el uso de resinas de urea-formaldehído, el consumo de energía eléctrica, así como el transporte de las astillas de madera hacia la planta de producción. Estos resultados evidencian la necesidad de desarrollar materiales alternativos a partir de recursos renovables y residuos agroindustriales que contribuyan a disminuir la demanda de materias primas convencionales y mejorar el desempeño ambiental de los materiales compuestos.

Mitantsoa et al. (2023) desarrollaron películas biodegradables a partir de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) reforzado con quitosano extraído de residuos de caparzones de cangrejo (*Scylla serrata*). Los resultados mostraron que la incorporación de quitosano incrementó la resistencia mecánica y mejoró la estabilidad frente a la humedad, demostrando que las matrices basadas en almidón pueden fortalecerse mediante aditivos naturales.

Por otro lado, a partir de una matriz de almidón termoplástico de yuca, Jumaidin et al. (2021) incorporaron fibras de hoja de banano en diferentes proporciones. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la resistencia a tensión, resistencia a flexión y módulo elástico, particularmente con contenidos de fibra cercanos al 40%. Este estudio confirma que las fibras derivadas del banano pueden actuar como refuerzos efectivos en bioplásticos basados en almidón. Sivakumar et al. (2022) evaluaron el comportamiento mecánico y térmico de compuestos elaborados con almidón termoplástico de yuca. Se encontraron incrementos en la rigidez y estabilidad térmica del material al aumentar el contenido de fibra, reforzando la viabilidad de emplear residuos agrícolas lignocelulósicos para mejorar el desempeño de matrices biodegradables.

Además, Ishara et al. (2024) desarrollaron láminas biocompuestas empleando simultáneamente tres residuos industriales: cáscara de banano, almidón de yuca y fibras del pseudotallo de banano. A diferencia de investigaciones previas que se enfocan únicamente en la matriz o en el refuerzo, este trabajo integró subproductos del cultivo del banano dentro de un único material biodegradable. Se mostró mejoras en la resistencia mecánica conforme aumentó el contenido de fibra, alcanzando aproximadamente 12 MPa de resistencia a

tensión, además de presentar una adecuada biodegradabilidad. El estudio demuestra el potencial de los residuos del banano para la fabricación de láminas ecológicas con aplicaciones de empaques, productos semirrígidos y materiales sostenibles de bajo impacto ambiental.

La evolución de las investigaciones muestra una transición desde el desarrollo de matrices biodegradables basadas en almidón de yuca hacia sistemas cada vez más complejos reforzados con fibras naturales y aditivos funcionales. Inicialmente, los estudios evidenciaron que el almidón de yuca puede mejorarse mediante agentes naturales como el quitosano, incrementando su resistencia mecánica y estabilidad frente a la humedad. Posteriormente, la incorporación de fibras lignocelulósicas proveniente del banano demostró mejoras significativas en la rigidez, resistencia y estabilidad térmicas de los materiales, consolidando a estos residuos agrícolas como alternativas para el refuerzo de bioplásticos.

A pesar de los avances en el desarrollo de biocompuestos reforzados con fibras provenientes de plátano, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en el pseudotallo, las hojas o la cáscara como material de refuerzo. En contraste, el potencial del raquis del banano como materia prima para la obtención de materiales lignocelulósicos ha sido escasamente estudiado, particularmente en relación con el efecto de la morfología y el tamaño de la fibra sobre la integridad estructural del material obtenido. En este contexto, la presente investigación evalúa la viabilidad de producir paneles lignocelulósicos empleando raquis del banano y analiza la influencia de diferentes configuraciones de fibra sobre la calidad física de los paneles obtenidos.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se desarrolló en el municipio de Teapa, Tabasco (17°54'49" de Latitud Norte y 92°55'52" de Longitud Oeste). La Región de la Sierra de Tabasco es una zona de ríos, montañas, arroyos, lagunas y bosques, que además posee una extensa y variada fauna, integrada por los municipios de Teapa, Tacotalpa y Jalapa. Se caracteriza por ser la región con mayor índice de precipitaciones en México y está compuesta por sierras bajas que no superan los 1,000 m.s.n.m. La actividad

agrícola en la región se destaca por su enfoque tropical y de autoconsumo, donde predominan cultivos perennes como la *Musa Paradisiaca* L., el cacao (*Theobroma cacao* L.) y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), así como de la tradicional siembra de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita* spp.) en los huertos familiares.

Materia prima

Para la obtención de la fibra del material compuesto se utilizó el raquis (conocido regionalmente como pinzote) del banano, el cual es el eje central de la inflorescencia y el racimo. Debido a la actividad de la región, es un subproducto de cosecha voluminoso y fibroso. El raquis es rico en diferentes compuestos orgánicos, siendo sus principales componentes estructurales la celulosa, lignina y hemicelulosa (Tabla 1).

Residuo	Celulosa %	Lignina %	Hemicelulosa %
Hojas	36.3	8.5	27.39
Raquis	30.6	9.85	15.7
Cáscara	56.55	12.68	29.39
Pseudotallo	36.98	12.68	32.84

Fuente. Sánchez-Zuñiga et al. (2020).

Tipo de estudio y enfoque

El trabajo de investigación se define como un estudio de carácter tecnológico, descriptivo y comparativo, desarrollado bajo un enfoque mixto con predominancia cualitativa en su fase evaluativa. Es de tipo tecnológico puesto que se orientó al diseño y fabricación de un nuevo material biocompuesto biodegradable a partir del raquis del banano. Además, posee un alcance descriptivo y comparativo, ya que se centró en observar, registrar y contrastar de manera detallada las variaciones en las propiedades físicas e integridad estructuras de tres formulaciones experimentales sometidas a idénticas condiciones de aglutinante.

Respecto al enfoque, la investigación integra componentes:

- Cuantitativos: se aplicó de forma rigurosa durante la fase operativa y de preparación del material mediante la medición y control estricto de variables físicas y operacionales.

- Cualitativo: predominó en la fase de resultados a través de una evaluación macroscópica visual y morfológica de los paneles terminados.

Desarrollo del experimento

Se consideró el desarrollo del experimento con una metodología similar a lo reportado por Ishara et al. (2024). En el proyecto se planteó estudiar la viabilidad de producir un material biocompuesto elaborado a partir del raquis del banano.

El pinzote del banano fue adquirido en una bananera de la región para proceder a reducir el tamaño, esto permite acelerar el proceso de secado y evita la descomposición de la materia orgánica. Para la aminorar la dimensión de la materia se diseñaron 3 formulaciones para la producción del material lignocelulósico, variando únicamente el tamaño o tipo de corte.

La materia seca se obtuvo después de disminuir su tamaño en una trituradora de forraje (Figura 1) y, posteriormente, se utilizó la tijera para alcanzar un tamaño cerca de 0.5cm (F1), mientras que los restos con mayor dureza de corte se separaron con la mano longitudinalmente (F2). Por otro lado, se optó por no triturar una parte del raquis húmedo con el fin de analizar el tiempo de secado y consistencia de material compuesto; este fue cortado a lo largo del mismo obteniendo tiras alrededor de 10cm de largo y grosor de 0.5cm. Una vez seco los pequeños pedazos, se cortó con tijera para reducir aún más el tamaño a hilos de 1 a 2 cm de largo (F3). Para el desarrollo del experimento se consideró la mezcla de 100gr de almidón de maíz, 30ml de glicerina, 5ml de ácido acético y 470ml de agua destilada por cada 50gr de fibra seca.



Figura 1. Triturado del raquis de banano utilizado en las formulaciones F1 y F2.

Consecuentemente, se procedió a pesar la materia seca total obtenida de cada muestra (F1, F2 y F3) para determinar las proporciones de las sustancias involucradas en el experimento.

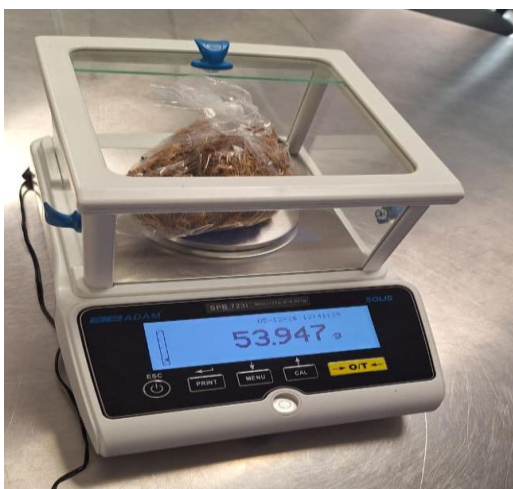


Figura 2. Medición de masa de la materia seca para el cálculo de las sustancias de cada formulación.

Con ayuda de una parrilla de calentamiento con agitación magnética se realizó la mezcla de las sustancias previamente calculadas y medidas, tal como se aprecia en la Figura 3.

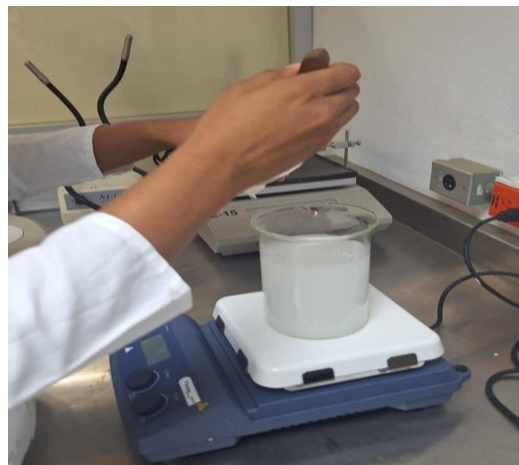


Figura 3. Preparación de aglutinante a base de almidón de maíz, glicerina, ácido acético y agua para la elaboración material compuesto.

Se utilizó una cámara termográfica para monitorear la temperatura de la mezcla dentro del recipiente (Figura 4) debido que, una vez alcanzado los 65°C, se debe agregar el almidón en la mezcla, acelerando ligeramente la velocidad de agitación magnética para evitar grumos.

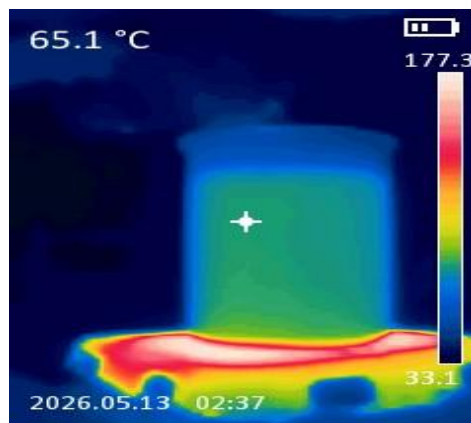


Figura 4. Monitoreo térmico de la mezcla dentro del recipiente durante la producción del aglutinante.

La mezcla viscosa obtenida previamente se combinó con cada una de las muestras de materia seca (F1, F2 y F3), las cuales fueron prensadas para la obtención de paneles circulares alrededor de 15 cm de diámetro y un grosor de 1 a 2 mm. Las pruebas se extendieron en una mesa para el secado por convección natural a temperatura ambiente (Figura 5).



Figura 5. Paneles circulares elaborados con raquis del banano después de la compresión.

Resultados y discusión

A través de la metodología descrita anteriormente, se logró la producción de tres tipos de paneles circulares del raquis de banano después de transcurrir el tiempo de secado de estos.

En la Figura 6 se observa el panel circular correspondiente a la materia seca F1, mientras que la F2 y F3 se muestran en las Figuras 7 y 8, respectivamente. Durante el proceso de secado se obtuvo una reducción de tamaño en las pruebas debido a la pérdida de humedad y cohesión de las partículas. La evaporación del agua promovió la consolidación de la matriz de almidón; sin embargo, también produjo una contracción del material. Este efecto fue mas evidente en las formulaciones con fibras de mayor longitud, donde la menos compactación inicial favoreció la formación de grietas y separaciones entre las fibras.

En el experimento F1 no se aprecian huecos, demostrando mayor consistencia y homogeneidad en los paneles en comparación con los demás. Las pruebas de F2 tienen grietas relevantes que pueden causar ruptura del panel, en tanto la F3 fueron más evidente los huecos y las grietas, siendo éste el tipo de panel más frágil.

La mayor homogeneidad observada en la formulación F1 puede atribuirse a que la reducción del tamaño de la fibra incrementó el área de contacto entre el refuerzo lignocelulósico y la matriz de almidón, favoreciendo una reducción de vacíos internos. Por el contrario, las fibras de mayor longitud presentes en las formulaciones F2 y F3 dificultaron la compactación del material, generando zonas con menor cohesión que propiciaron la aparición

de grietas durante el secado. Estos hallazgos evidencian que la preparación física de la fibra constituye un factor determinante en la integridad estructural del biocompuesto obtenido.



Figura 6. Paneles circulares producidos con raquis de banano al finalizar el proceso de secado de la formulación F1.



Figura 7. Paneles circulares producidos con raquis de banano al finalizar el proceso de secado de la formulación F2.



Figura 8. Paneles circulares producidos con raquis de banano al finalizar el proceso de secado de la formulación F3.

Los resultados indican que la reducción del tamaño de partícula favorece una distribución más uniforme del aglutinante entre las fibras, incrementando la superficie de contacto y la cohesión del material. En contraste, las fibras de mayor longitud generaron espacios vacíos que limitaron la compactación durante el prensado, favoreciendo la aparición de grietas durante el secado. Este comportamiento coincide con lo reportado por Jumaidin et al. (2021), quienes observaron que la geometría de las fibras influye significativamente en las propiedades estructurales de materiales compuestos elaborados con matrices de almidón.

Además, mientras que estudios previos, como la de Ishara et al. (2024), demostraron la factibilidad de elaborar biocompuestos a partir de residuos del banano, la presente investigación evidencia que, manteniendo constante la formulación del aglutinante, el tratamiento físico de la fibra obtenida del raquis constituye un factor determinante en la compactación, cohesión e integridad física del material. En particular, la formulación elaborada con fibras trituradas (F1) presentó el comportamiento más uniforme, lo que confirma que la morfología y el tamaño de la fibra son variables clave para la obtención de materiales lignocelulósicos con mejores características físicas.

Conclusiones

Se elaboraron materiales lignocelulósicos a partir del raquis del banano empleando almidón de maíz como agente aglutinante, demostrando la factibilidad técnica

de aprovechar este agroresiduo para la producción de materiales compuesto de base biológica.

La metodología empleada permitió obtener paneles con diferentes características físicas en función del tamaño y morfología de la fibra utilizada. La formulación F1 presentó el mejor desempeño visual y estructural, mostrando una superficie más uniforme, menor presencia de vacíos y ausencia de grietas significativas, mientras que las formulaciones F2 y F3 exhibieron defectos asociados a una menor compactación. Estos resultados demuestran que el tratamiento físico de la fibra del raquis constituye un factor determinante en la homogeneidad, cohesión e integridad estructural del material lignocelulósico obtenido.

La pérdida de humedad durante el proceso de secado provocó contracciones dimensionales en todas las muestras, lo que sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de prensado y secado para mejorar la estabilidad dimensional del material y favorecer la obtención de paneles con mayor uniformidad estructural.

Los resultados obtenidos indican que el raquis de banano posee potencial como materia prima para la elaboración de biocompuestos sostenibles. Sin embargo, es necesario complementar esta investigación mediante la evaluación de propiedades mecánicas, absorción de agua, densidad y biodegradabilidad para determinar su viabilidad en aplicaciones como empaques ecológicos, paneles ligeros y materiales para construcción sostenible, así como su posible sustitución parcial de tableros derivados de la madera.

Referencias

- de Prada, C., da Silva, E. O., Palacín, C., Vicente, A., García, Á., y Tadeo, F. (2025). Gemelo digital para operar planta de producción de tableros MDF. *Jornadas de Automática*, (46). <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12176>
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*. <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>
- Gutiérrez-Chávez, A., y Hernández-Huerta, J. (2025). Empaques hechos de hongos: Una alternativa ecológica al poliestireno. *Revista de divulgación científica iBIO*, 7(1), 203-203.

- <https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/203>
- Haro Velasteguí, A., Borja Arévalo, A., y Triviño Bloisse, S. (2017). Analysis on the use of banana waste, as raw material for the production of biodegradable plastic materials. *Dominio Las Cienc*, 3, 506-525.
- Ishara, G. K. K., Koliyabandara, P. A., y Samarakoon, G. (2024). Eco-friendly bio-composite sheets: a study on the utilization of banana peels, cassava starch, and banana stem fibers. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1410986. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1410986>
- Jumaidin, R., Diah, N. A., Ilyas, R. A., Alamjuri, R. H., y Yusof, F. A. M. (2021). Processing and characterisation of banana leaf fibre reinforced thermoplastic cassava starch composites. *Polymers*, 13(9), 1420. <https://doi.org/10.3390/polym13091420>
- Mitantsoa, J. T., Ravelonandro, P. H., Andrianony, F. A., y Andrianaivoravelona, R. R. (2023). Elaboration and characterization of bioplastic films based on bitter cassava starch (*Manihot esculenta*) reinforced by chitosan extracted from crab (*Scylla seratta*) shells. *arXiv preprint arXiv:2310.15172*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.15172>
- Piekarski, C. M., de Francisco, A. C., da Luz, L. M., Kovalski, J. L., y Silva, D. A. L. (2017). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>
- Sánchez-Zuñiga, J. V., Sánchez-Molina, J., y Florez-Vargas, A. O. (2020). Caracterización de los residuos de la cosecha del plátano harton para un potencial uso industrial. *Characterization of the residues from the harvest of the harton banana for potential industrial use*. *Revista AIBI*, 8(3), e821. <https://doi.org/10.15649/2346030X.821>
- Sivakumar, A. A., Canales, C., Roco-Videla, Á., y Chávez, M. (2022). Development of thermoplastic cassava starch composites with banana leaf fibre. *Sustainability*, 14(19), 12732. <https://doi.org/10.3390/su141912732>
- Vásquez-Dávila, S., y Bravo-Benavides, D. (2023). Impacto del cambio climático en la producción agrícola de la provincia de Loja, periodo 2007-2020. *Revista Económica*, 11(1), 93-103. <https://doi.org/10.54753/rve.v11i1.1623>
- Currículo corto de los autores**
M. S. López Jiménez, Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables del Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra (2026).
- I. Gómez Rosales, Ingeniero en Energía (2013) por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro (2015) y Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables (2022) por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, y perfil deseable PRODEP.
- I. López Grijalva, Ingeniero en Energía (2013) por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro (2015) y Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables (2021) por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, y perfil deseable PRODEP.
- Y. Méndez Pérez. Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables del Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra (2026).
- Currículo corto de los autores**
M. S. López Jiménez, Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables del Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra (2026).
- I. Gómez Rosales, Ingeniero en Energía (2013) por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro (2015) y Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables (2022) por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, y perfil deseable PRODEP. Contacto: ignacio.gr@regionsierra.tecnm.mx
- I. López Grijalva, Ingeniero en Energía (2013) por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro (2015) y Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables (2021) por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, y perfil deseable PRODEP.
- Y. Méndez Pérez. Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables del Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra (2026).

Valorización de plumas de pollo para la obtención de queratina y el desarrollo de biopolímeros sostenibles: una revisión de la literatura científica

A. N. Lule Chávez, E. Becerra Becerra, J. E. Peralta López, A. Tapia Muñoz

Resumen

La industria avícola genera grandes cantidades de residuos, entre los que destacan las plumas de pollo que contienen una alta concentración de queratina, tradicionalmente, estos residuos son eliminados mediante incineración o disposición en vertederos, generando impactos ambientales y desaprovechando una importante fuente de biomasa. En los últimos años, el aprovechamiento de la queratina ha despertado un creciente interés debido a su potencial para la producción de biomateriales y biopolímeros biodegradables. El presente trabajo presenta una revisión de las principales estrategias utilizadas para la extracción de queratina a partir de plumas de pollo, así como de sus propiedades, métodos de caracterización y aplicaciones en el desarrollo de materiales sostenibles. Los resultados reportados en la literatura muestran que la valorización de residuos avícolas constituye una alternativa viable para impulsar procesos de economía circular y reducir la dependencia de materiales derivados del petróleo.

Palabras clave: queratina, plumas de pollo, biopolímeros, valorización de residuos, economía circular.

Introducción

La industria avícola es una de las actividades pecuarias más importantes a nivel mundial; sin embargo, también genera grandes cantidades de residuos que representan un reto ambiental. Entre ellos destacan las plumas de pollo, las cuales constituyen aproximadamente entre el 5 y el 7 % del peso corporal del ave y en la mayoría de los casos, son eliminadas mediante incineración o disposición en vertederos, prácticas que generan costos adicionales y diversos problemas ambientales (Bidegain, 2019; Polesca *et al.*, 2023).

A pesar de ser consideradas un desecho, las plumas poseen un alto valor biotecnológico debido a que están formadas principalmente por queratina, una proteína fibrosa caracterizada por su resistencia y estabilidad

estructural (Dąbrowska *et al.*, 2021; Dicastillo *et al.*, 2023). Estas características convierten a las plumas en una materia prima renovable con potencial para la obtención de productos de valor agregado, entre ellos biopolímeros biodegradables y materiales sostenibles.

Uno de los principales desafíos para aprovechar este residuo es la compleja estructura de la queratina, la cual dificulta su degradación natural. En este contexto, los procesos biotecnológicos basados en microorganismos y enzimas queratinolíticas han surgido como una alternativa eficiente para transformar las plumas en compuestos más simples, como aminoácidos, péptidos y proteínas solubles (Vidmar & Vodovnik, 2018; Li, 2019). A diferencia de los métodos químicos convencionales, estos procesos operan bajo condiciones más suaves y permiten conservar mejor las propiedades funcionales de la proteína (Shavandi *et al.*, 2017).

Durante los últimos años, el interés por la valorización de residuos avícolas ha aumentado debido a la necesidad de reducir la dependencia de materiales derivados del petróleo y promover modelos de economía circular. La queratina recuperada de las plumas puede emplearse en la elaboración de películas, recubrimientos y biopolímeros con potencial aplicación en sectores como el agrícola, alimentario y de empaques sostenibles (Nuutinen *et al.*, 2021; Derhab *et al.*, 2023).

En este contexto, la valorización de plumas de pollo representa una oportunidad para transformar un residuo abundante en una fuente de biomateriales de interés industrial. Además de contribuir a la reducción de impactos ambientales, este enfoque promueve el aprovechamiento integral de los subproductos avícolas y el desarrollo de alternativas sostenibles basadas en recursos renovables. Sin embargo, para comprender la relevancia de esta estrategia es necesario analizar primero las implicaciones ambientales asociadas a la generación y disposición de este residuo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo integrar y analizar la información científica disponible sobre la valorización de plumas de pollo para la obtención de queratina y el desarrollo de biopolímeros sostenibles. Para ello, se abordan los principales métodos de extracción, las técnicas de caracterización de la queratina y los avances en el desarrollo de materiales biobasados, con el propósito de ofrecer una visión actualizada sobre el potencial de estos residuos avícolas dentro de un enfoque de economía circular y sostenibilidad.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló mediante una revisión de literatura científica, con el propósito de analizar la información disponible sobre la valorización de plumas de pollo para la obtención de queratina y el desarrollo de biopolímeros sostenibles. Para ello, se consultaron artículos científicos y revisiones especializadas publicados principalmente durante la última década en bases de datos como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library y Google Scholar.

La selección de las publicaciones se realizó considerando su pertinencia con los métodos de extracción de queratina, la caracterización de la proteína, el desarrollo de biopolímeros y sus aplicaciones. Posteriormente, la información se organizó y analizó de forma temática para identificar los principales avances y perspectivas reportados en la literatura científica.

Problemática ambiental y potencial de las plumas de pollo

La industria avícola genera millones de toneladas de plumas cada año. Aunque a menudo son consideradas un residuo sin utilidad, su acumulación representa un desafío ambiental importante. Debido a que las plumas se degradan lentamente de forma natural, gran parte de ellas termina en vertederos o es eliminada mediante incineración, prácticas que pueden generar contaminación y desaprovechar un recurso con gran potencial de uso (Dong *et al.*, 2017; Nnolim & Nwodo, 2020).

Durante muchos años, el manejo de este residuo se centró principalmente en su eliminación. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que las plumas poseen características que las convierten en una materia prima de interés para diferentes sectores productivos. Esto se debe a que están formadas principalmente por queratina, una proteína que representa más del 80 % de

su composición y que contiene aminoácidos importantes como la cisteína y la metionina (Loja & Jacqueline, 2015). Como se observa en la **Figura 1**, las plumas de pollo pueden integrarse a esquemas de economía circular mediante procesos de valorización que permiten transformarlas en productos de mayor valor agregado.



Figura 1. Aprovechamiento de plumas de pollo dentro de un esquema de economía circular para la obtención de productos de valor agregado

La complejidad estructural de esta proteína explica tanto su resistencia natural como las dificultades asociadas a su aprovechamiento industrial **Figura 2**.

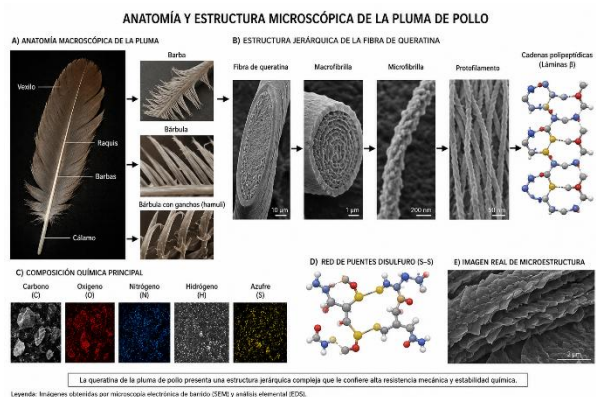


Figura 2. Anatomía macroscópica y organización jerárquica de la β-queratina presente en plumas de pollo, desde la estructura anatómica hasta la disposición molecular de las fibras y los puentes disulfuro.

Nota. Elaboración propia con información adaptada de Fraser y Parry (2011), Shavandi et al. (2017), Tesfaye et al. (2017), Wang et al. (2016) y Yin y Woo (2024).

La queratina se caracteriza por su gran resistencia y estabilidad, cualidades que permiten proteger a las aves,

pero que también dificultan su aprovechamiento. Por esta razón, los métodos convencionales de procesamiento suelen requerir altas temperaturas o el uso de sustancias químicas que pueden incrementar los costos y afectar la calidad de los productos obtenidos (Perça-Crişan *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2022).

Ante esta situación, la biotecnología ha abierto nuevas posibilidades para el aprovechamiento de las plumas. El uso de microorganismos y enzimas especializadas permite transformar la queratina en compuestos más simples, como aminoácidos y péptidos, que pueden utilizarse en distintas aplicaciones industriales (Łaba *et al.*, 2018; Maurya & Singh, 2023). De igual manera, los consorcios microbianos han mostrado resultados prometedores al acelerar la degradación de las plumas y mejorar la recuperación de compuestos de interés (Gaonkar & Furtado, 2022; Goda *et al.*, 2021).

Más allá de reducir un problema ambiental, el aprovechamiento de las plumas de pollo representa una oportunidad para generar productos de mayor valor agregado. Los compuestos obtenidos a partir de la queratina pueden emplearse en la elaboración de biomateriales y biopolímeros biodegradables, contribuyendo al desarrollo de alternativas más sostenibles frente a los materiales convencionales derivados del petróleo (Rahimnahal *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023).

Además, la capacidad de la queratina para formar películas y estructuras resistentes ha despertado un creciente interés en áreas como los empaques sostenibles, los recubrimientos biodegradables y otros materiales de origen renovable (Wu *et al.*, 2017; Yong *et al.*, 2020). De esta manera, las plumas de pollo dejan de verse únicamente como un residuo de la industria avícola para convertirse en un recurso con potencial para impulsar procesos de economía circular y generar nuevas oportunidades de innovación tecnológica.

Extracción de queratina a partir de plumas de pollo

El aprovechamiento de las plumas de pollo depende en gran medida de la posibilidad de recuperar la queratina que las compone. Debido a la resistencia natural de esta proteína, su extracción representa uno de los principales retos para la valorización de los residuos avícolas. A lo largo de los años se han desarrollado diferentes estrategias para romper su estructura y obtenerla en una forma aprovechable para aplicaciones industriales y biotecnológicas. De manera general, el proceso de

recuperación de queratina involucra etapas de acondicionamiento de la materia prima, ruptura de la estructura proteica y recuperación del material soluble, como se muestra en la Figura 3.

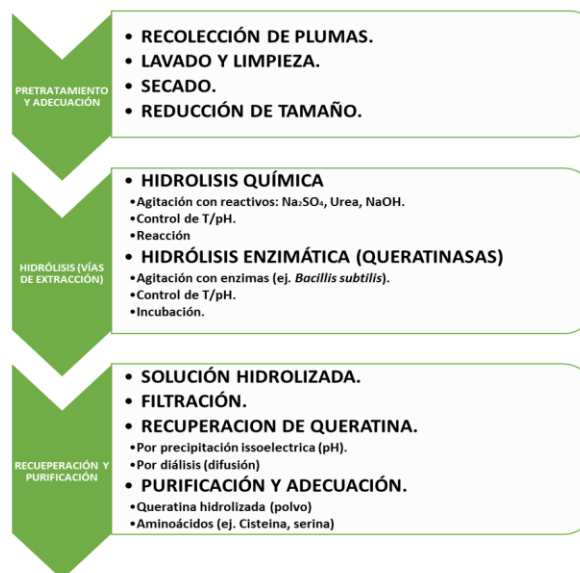


Figura 3. Principales etapas involucradas en la extracción de queratina a partir de plumas de pollo

Entre los métodos más utilizados se encuentran los tratamientos químicos y biológicos. Los primeros se basan en el uso de sustancias capaces de romper los enlaces responsables de la estabilidad de la queratina, permitiendo su solubilización y recuperación (David *et al.*, 2017). Dentro de este grupo, la hidrólisis química ha sido ampliamente estudiada debido a su capacidad para obtener rendimientos relativamente altos en tiempos cortos (Škerget *et al.*, 2023).

Para ello se emplean reactivos como la urea, el sulfito de sodio y otros agentes reductores que facilitan la ruptura de la estructura proteica de las plumas (Verdnik *et al.*, 2021). Sin embargo, aunque estos tratamientos suelen ser eficaces, también presentan algunas limitaciones. El uso de productos químicos agresivos puede generar residuos contaminantes y afectar ciertas propiedades funcionales de la proteína recuperada. Además, variables como el pH y la temperatura deben controlarse cuidadosamente para evitar la degradación de aminoácidos y la disminución de la calidad del producto final (Aadil *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2019).

Como alternativa, los métodos biológicos han despertado un creciente interés debido a su menor impacto ambiental. Estos procesos emplean

microorganismos o enzimas especializadas capaces de degradar la queratina bajo condiciones más suaves, favoreciendo la conservación de las propiedades de la proteína obtenida (Loja, Celi, *et al.*, 2016). Entre ellos, el tratamiento enzimático se considera una de las estrategias más prometedoras para la recuperación sostenible de queratina a partir de plumas de pollo (Shavandi *et al.*, 2017).

Una de las principales ventajas de este enfoque es que permite obtener aminoácidos, péptidos e hidrolizados proteicos con potencial aplicación en la elaboración de biomateriales y biopolímeros, utilizando menores cantidades de reactivos químicos y reduciendo el impacto ambiental del proceso (Maity *et al.*, 2022). Asimismo, la utilización de microorganismos y consorcios microbianos ha demostrado ser una herramienta eficaz para acelerar la degradación de las plumas y mejorar la recuperación de compuestos de interés.

En los últimos años también se han incorporado tecnologías complementarias destinadas a incrementar la eficiencia de extracción. Entre ellas destacan el ultrasonido, la extrusión, los tratamientos con vapor, la aplicación de calor y algunos procesos de irradiación, los cuales facilitan la ruptura de la estructura queratínica y favorecen una mayor recuperación de la proteína (Cevallos, 2021; Xu *et al.*, 2019; Raydan *et al.*, 2025; Sinche-Serra *et al.*, 2025).

En términos generales, no existe un método único que pueda considerarse ideal para todas las aplicaciones. La elección de la estrategia de extracción depende del rendimiento esperado, los costos del proceso, el impacto ambiental y, sobre todo, de las características que se desean conservar en la queratina recuperada. Por esta razón, las investigaciones actuales buscan combinar diferentes tecnologías con el objetivo de obtener procesos más eficientes, sostenibles y compatibles con la producción de biomateriales de origen renovable.

La creciente evolución de estas técnicas refleja el interés por transformar las plumas de pollo en una fuente de materias primas de alto valor agregado. Más allá de recuperar una proteína, la extracción de queratina constituye el primer paso para desarrollar materiales biodegradables y alternativas sostenibles que contribuyan al aprovechamiento integral de los residuos generados por la industria avícola.

Caracterización y propiedades fisicoquímicas de la queratina

Una vez obtenida la queratina a partir de las plumas de pollo, es necesario conocer sus características para determinar su potencial de uso en la fabricación de biomateriales y biopolímeros. Esta etapa resulta fundamental, ya que la calidad de la proteína recuperada influye directamente en el desempeño de los materiales que posteriormente se elaborarán con ella (Qin *et al.*, 2023; Shavandi *et al.*, 2021).

Para ello se emplean diferentes técnicas de análisis que permiten evaluar aspectos como la composición, la estructura, la estabilidad y el comportamiento de la queratina después del proceso de extracción. Estos estudios proporcionan información valiosa sobre los cambios físicos y químicos que experimenta la proteína y permiten establecer la relación entre el método de obtención y las propiedades finales del material recuperado (Perdana *et al.*, 2025; Orjuela-Palacio & Zaritzky, 2023).

Uno de los aspectos más relevantes es la estabilidad térmica, ya que permite conocer la resistencia de la queratina frente al calentamiento y prever su comportamiento durante los procesos de transformación utilizados para la elaboración de películas, recubrimientos y otros materiales biobasados (Polesca *et al.*, 2023; Tissiera *et al.*, 2024). De igual forma, el análisis de la superficie y la estructura de la proteína ayuda a identificar características que pueden influir en propiedades como la flexibilidad, la resistencia mecánica y la capacidad para formar matrices poliméricas.

La información obtenida durante la caracterización también permite comprender mejor las propiedades fisicoquímicas de la queratina, las cuales determinan en gran medida sus posibilidades de aplicación. Entre las más importantes destacan la solubilidad, la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la capacidad de formar películas continuas y homogéneas (Rajabinejad *et al.*, 2017; Barros *et al.*, 2014). Estas características son especialmente relevantes para el desarrollo de materiales biodegradables que puedan emplearse en diferentes sectores industriales.

Una de las ventajas más interesantes de la queratina es su capacidad para generar estructuras flexibles cuando se combina con compuestos como el glicerol. Estos aditivos, conocidos como plastificantes, facilitan el procesamiento de la proteína y mejoran la flexibilidad de las películas obtenidas, favoreciendo su utilización en la

fabricación de recubrimientos y empaques biodegradables (Tinoco *et al.*, 2020; Fernández-d'Arlas, 2019).

Asimismo, la incorporación de otros componentes naturales o materiales de refuerzo permite mejorar propiedades como la resistencia mecánica, la estabilidad frente a la humedad y la durabilidad de los biopolímeros derivados de queratina (Sánchez-Olivares *et al.*, 2017; Alshehhi *et al.*, 2024). Estas modificaciones amplían las posibilidades de aplicación de los materiales obtenidos y contribuyen a mejorar su desempeño en diferentes condiciones de uso.

Otro aspecto que ha despertado interés es el comportamiento de estos materiales frente al calor y la radiación. Diversas investigaciones han demostrado que las películas elaboradas a partir de queratina presentan una adecuada estabilidad térmica y pueden actuar como barrera frente a la radiación ultravioleta, características que resultan de gran utilidad para aplicaciones relacionadas con empaques sostenibles y materiales de protección (Polesca *et al.*, 2024; Vanderlei *et al.*, 2024).

La calidad de la queratina recuperada también influye en la estructura final del material. Procesos de extracción adecuados favorecen la formación de películas más uniformes y con menor presencia de defectos, lo que generalmente se traduce en mejores propiedades físicas y una mayor estabilidad durante su uso (Alashwal *et al.*, 2019).

En conjunto, los estudios de caracterización y la evaluación de las propiedades fisicoquímicas permiten comprender el potencial de la queratina como materia prima para la elaboración de biopolímeros biodegradables. Además de aportar información sobre su comportamiento y desempeño, estas herramientas contribuyen a optimizar los procesos de transformación y facilitan el desarrollo de materiales sostenibles capaces de sustituir parcialmente a productos convencionales derivados de fuentes no renovables.

Desarrollo de biopolímeros derivados de queratina

Una vez obtenida y caracterizada la queratina, el siguiente paso consiste en transformarla en materiales con propiedades que permitan su utilización en diferentes aplicaciones industriales. Gracias a su composición y capacidad de interacción con otros compuestos naturales, esta proteína puede emplearse como materia prima para la elaboración de biopolímeros,

una alternativa sostenible frente a materiales convencionales derivados de recursos no renovables.

El desarrollo de biopolímeros a partir de queratina ha despertado un creciente interés debido a la posibilidad de obtener materiales biodegradables con propiedades mecánicas y funcionales adecuadas para distintos usos. Diversos estudios han demostrado que la combinación de queratina con otras proteínas, polisacáridos o biopolímeros permite formar estructuras más homogéneas y resistentes, mejorando la estabilidad y el desempeño del producto final (Yin & Woo, 2024; Tavares *et al.*, 2020). Una vez recuperada la proteína, esta puede incorporarse a diferentes formulaciones para la obtención de materiales biodegradables con diversas aplicaciones industriales **Figura 4**.

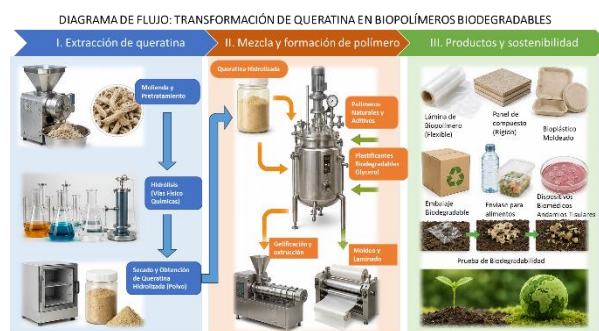


Figura 4. Proceso general de elaboración de biopolímeros a partir de queratina recuperada de plumas de pollo

La organización interna de estos materiales desempeña un papel importante en sus características finales. Una estructura compacta y uniforme puede favorecer la resistencia mecánica, disminuir la absorción de humedad y mejorar las propiedades de barrera frente al agua y otros agentes externos, aspectos especialmente relevantes en aplicaciones relacionadas con empaques sostenibles y materiales biodegradables (Dicastillo *et al.*, 2023; Tomadoni *et al.*, 2020).

La fabricación de estos biopolímeros suele realizarse mediante la incorporación de plastificantes y otros compuestos naturales que facilitan el procesamiento de la proteína y mejoran la flexibilidad de las películas obtenidas (Ciannamea *et al.*, 2013; Dinu, 2020). Asimismo, la mezcla de queratina con materiales de origen natural permite desarrollar formulaciones con propiedades específicas, ampliando sus posibilidades de aplicación en sectores como el envasado de alimentos, la agricultura y la producción de materiales sostenibles (Li *et al.*, 2021).

Otra característica que ha impulsado el interés por estos materiales es la posibilidad de incorporar sustancias con actividad antioxidante o antimicrobiana. Esta estrategia permite desarrollar empaques activos capaces de contribuir a la conservación de productos y reducir su deterioro durante el almacenamiento (Bhaskar *et al.*, 2023; González-López *et al.*, 2023).

Para mejorar el desempeño de los biopolímeros derivados de queratina también es frecuente la incorporación de fibras vegetales, derivados de celulosa y otros materiales de refuerzo. Estas combinaciones permiten incrementar la resistencia mecánica, mejorar la estabilidad frente a la humedad y optimizar las propiedades de barrera sin comprometer la biodegradabilidad del material (Pérez *et al.*, 2020; Abdullah *et al.*, 2022). Además, esta estrategia favorece el aprovechamiento de diferentes residuos agroindustriales, fortaleciendo los principios de la economía circular (Condés *et al.*, 2017; Jafarzadeh *et al.*, 2023).

La transformación de estas mezclas en materiales funcionales requiere la aplicación de diferentes técnicas de procesamiento. Entre las más utilizadas se encuentran el colado en solución, el moldeo por compresión y la extrusión, métodos que permiten producir películas, láminas y recubrimientos con características adaptadas a cada necesidad (Félix *et al.*, 2017; Lizundia *et al.*, 2021). Durante esta etapa resulta fundamental controlar variables como la temperatura, la humedad y la proporción de plastificantes, ya que estos factores influyen directamente en la calidad y estabilidad del producto final (Verbeek & Berg, 2009).

Los avances recientes en las tecnologías de procesamiento han contribuido a mejorar la eficiencia de producción y han facilitado el escalamiento de estos materiales hacia aplicaciones comerciales (Qamar *et al.*, 2020; Tardy *et al.*, 2021). Como resultado, los biopolímeros derivados de queratina son considerados una de las alternativas más prometedoras para reducir la dependencia de plásticos convencionales de origen fósil y promover el desarrollo de materiales más sostenibles.

En conjunto, los avances alcanzados durante los últimos años demuestran que la queratina obtenida de plumas de pollo puede convertirse en una materia prima de alto valor agregado. La combinación de diferentes formulaciones y tecnologías de procesamiento ha ampliado considerablemente las posibilidades de diseño de estos materiales, permitiendo adaptar sus propiedades

a diversas aplicaciones y fortaleciendo el potencial de los residuos avícolas como recurso para la innovación tecnológica y el desarrollo sostenible.

Evaluación de materiales obtenidos

Una vez desarrollados los biopolímeros a partir de queratina, es indispensable evaluar su desempeño para determinar si poseen las características necesarias para aplicaciones reales. Esta etapa permite conocer el comportamiento de los materiales frente a diferentes condiciones de uso y proporciona información valiosa para optimizar tanto las formulaciones como los procesos de fabricación (Latza *et al.*, 2015; Verbeek & Berg, 2009). Entre los aspectos más importantes se encuentran la estabilidad térmica, la resistencia a la humedad y la capacidad del material para conservar sus propiedades durante el almacenamiento y la utilización. La evaluación integral de estos parámetros permite identificar aquellas formulaciones con mejores perspectivas de aplicación y mayor potencial de escalamiento industrial (Mekonnen *et al.*, 2013). Asimismo, el análisis de la estructura y homogeneidad de los materiales aporta información sobre su comportamiento frente a factores ambientales y contribuye al diseño de biopolímeros más funcionales y resistentes (Elgarahy *et al.*, 2023).

Tabla 1. Principales propiedades de los biopolímeros elaborados a partir de queratina y su importancia potencial

Propiedad	Importancia	Aplicación
Resistencia mecánica	Soporta esfuerzos sin deformarse.	Empaques y recubrimientos.
Estabilidad térmica	Conserva sus propiedades ante el calor.	Extrusión y moldeo.
Flexibilidad	Permite deformación sin fractura.	Películas biodegradables.
Biodegradabilidad	Se degrada naturalmente.	Reduce residuos plásticos.
Propiedades de barrera	Disminuye el paso de humedad y gases.	Conservación de alimentos.
Solubilidad	Facilita el procesamiento	Hidrogeles y películas.

Propiedad	Importancia	Aplicación
Formación de películas	Genera estructuras continuas.	Recubrimientos protectores.
Compatibilidad	Se mezcla con otros biopolímeros.	Materiales compuestos.
Retención de humedad	Regula el contenido de agua.	Agricultura y alimentos.
Sostenibilidad	Proviene de recursos renovables.	Economía circular.

Nota. Adaptado de Shavandi et al. (2017), Rajabinejad et al. (2017), Alashwal et al. (2019) y Li et al. (2021).

Las principales propiedades evaluadas en estos materiales se resumen en la **Figura 5**, donde se muestran los atributos que determinan su potencial de aplicación.

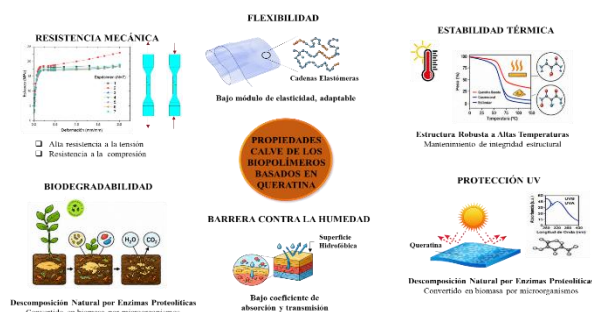


Figura 5. Propiedades más relevantes de los biopolímeros derivados de queratina y su importancia potencial

Dentro de las propiedades evaluadas, el comportamiento mecánico ocupa un lugar central, ya que determina en gran medida la utilidad práctica del material. Características como la resistencia, la flexibilidad y la capacidad para soportar esfuerzos mecánicos dependen tanto de la composición de la formulación como de las condiciones empleadas durante su procesamiento (Guilherme *et al.*, 2015). Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de materiales de refuerzo y la optimización de las mezclas permiten mejorar significativamente estas propiedades, favoreciendo la obtención de materiales ligeros, resistentes y compatibles con diferentes aplicaciones industriales (Liu *et al.*, 2023; Zhao, 2013).

Además, la organización interna de la matriz polimérica influye directamente en la distribución de las cargas

mecánicas y en la durabilidad del material. Una estructura más uniforme puede contribuir a prolongar la vida útil de los productos elaborados con estos biocompuestos y mejorar su desempeño durante el uso (Wu *et al.*, 2017). Estos avances han permitido ampliar las posibilidades de aplicación de los biopolímeros derivados de queratina en sectores donde se requieren materiales funcionales y ambientalmente responsables. Más allá de sus propiedades mecánicas, uno de los atributos que ha despertado mayor interés es su capacidad de degradarse de forma natural una vez concluida su vida útil. Esta característica representa una ventaja importante frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo, cuya permanencia en el ambiente puede extenderse durante décadas. En contraste, los materiales elaborados a partir de proteínas presentan una mayor susceptibilidad a la acción de microorganismos y enzimas presentes en el entorno, favoreciendo procesos de degradación más rápidos y controlados (Li *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2017).

La velocidad con la que ocurre esta biodegradación depende de factores como la composición del material, el grado de reticulación y las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto. No obstante, la posibilidad de que estos materiales se reincorporen de manera natural a los ciclos biológicos constituye uno de sus principales atractivos desde la perspectiva de la sostenibilidad. Esta característica se encuentra estrechamente relacionada con los principios de la economía circular, ya que contribuye a reducir la acumulación de residuos y favorece el aprovechamiento eficiente de recursos renovables.

Los resultados reportados hasta el momento muestran que la queratina obtenida de plumas de pollo puede utilizarse para desarrollar materiales con propiedades mecánicas y fisicoquímicas adecuadas para diversas aplicaciones (Shavandi *et al.*, 2017). Además, la posibilidad de combinarla con otros biopolímeros y materiales naturales ha ampliado considerablemente sus posibilidades de uso, permitiendo diseñar productos con características adaptadas a necesidades específicas.

Desde una perspectiva ambiental, la valorización de plumas de pollo representa una alternativa que no solo contribuye a reducir la cantidad de residuos generados por la industria avícola, sino que también promueve la sustitución parcial de materiales derivados de fuentes fósiles por opciones renovables y biodegradables. Aunque todavía existen desafíos relacionados con la

escalabilidad de los procesos productivos y la competitividad frente a materiales convencionales, los avances alcanzados durante los últimos años evidencian el potencial de esta tecnología para contribuir al desarrollo de materiales más sostenibles.

En conjunto, la evaluación de los materiales obtenidos confirma que el aprovechamiento de la queratina derivada de plumas de pollo constituye una estrategia prometedora para transformar un residuo agroindustrial en productos de valor agregado. Este enfoque no solo aporta beneficios ambientales, sino que también abre nuevas oportunidades para la innovación y el desarrollo de materiales compatibles con las demandas actuales de sostenibilidad.

Algunas de las aplicaciones más prometedoras de estos materiales se presentan en la **Figura 6**, donde se destacan usos potenciales en empaques sostenibles, agricultura y materiales biodegradables.



Figura 6. Aplicaciones potenciales de los biopolímeros elaborados a partir de queratina obtenida de plumas de pollo

Conclusiones

La valorización de plumas de pollo mediante la extracción de queratina representa una estrategia prometedora para transformar un residuo abundante en una materia prima de alto valor agregado. Los avances en los métodos de extracción y procesamiento han permitido obtener biopolímeros con propiedades adecuadas para aplicaciones en empaques, recubrimientos y otros materiales sostenibles.

Además de contribuir a la reducción del impacto ambiental asociado a la disposición inadecuada de residuos avícolas, estos materiales ofrecen una alternativa renovable frente a los polímeros convencionales derivados del petróleo. En este contexto,

la queratina se posiciona como un recurso con gran potencial para impulsar modelos de producción basados en la economía circular y el aprovechamiento integral de subproductos agroindustriales.

Aunque todavía existen desafíos relacionados con la optimización de los procesos de extracción, la escalabilidad industrial y la reducción de costos, las investigaciones recientes muestran que el aprovechamiento de la queratina puede desempeñar un papel importante en el desarrollo de materiales más sostenibles y ambientalmente responsables.

En un escenario donde la sostenibilidad y la economía circular adquieren cada vez mayor relevancia, el aprovechamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina y el desarrollo de biopolímeros representa una alternativa con potencial para contribuir tanto a la gestión responsable de residuos como a la generación de nuevos materiales de origen renovable. Su consolidación dependerá de la optimización de los procesos de producción y de la capacidad de transferir estos avances desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales reales.

Referencias

- Aadil, K. R., Bhange, K., Kumar, N. M., & Mishra, G. (2024). Keratin nanofibers in tissue engineering: bridging nature and innovation. Deleted Journal, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00019-6>
- Abdullah, Cai, J., Hafeez, M. A., Wang, Q., Farooq, S., Huang, Q., Tian, W., & Xiao, J. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review [Review of Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review]. Frontiers in Nutrition, 9. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>
- Alashwal, B. Y., Bala, M. S., Gupta, A., Sharma, S., & Mishra, P. (2019). Improved properties of keratin-based bioplastic film blended with microcrystalline cellulose: A comparative analysis. Journal of King Saud University - Science, 32(1), 853–857. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.03.006>
- Alshehhi, J. R. M. H., Wanasingha, N., Balu, R., Mata, J., Shah, K., Dutta, N. K., & Choudhury, N. R. (2024). 3D-Printable Sustainable Bioplastics from Gluten and Keratin. Gels, 10(2), 136–136. <https://doi.org/10.3390/gels10020136>

- Barros, A. A., Aroso, I. M., Silva, T. H., Mano, J. F., Duarte, A. R. C., & Reis, R. L. (2014). Water and Carbon Dioxide: Green Solvents for the Extraction of Collagen/Gelatin from Marine Sponges. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(2), 254–260. <https://doi.org/10.1021/sc500621z>
- Bhaskar, R., Zo, S. M., Narayanan, K. B., Purohit, S. D., Gupta, M. K., & Han, S. S. (2023). Recent development of protein-based biopolymers in food packaging applications: A review. *Polymer Testing*, 124, 108097–108097. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108097>
- Bidegain, B. F. (2019). Queratinas de plumaje de pollo y lana de oveja: Comparativa de sus masas moleculares mediante electroforesis en gel. *Archivos de Zootecnia*, 68(263), 422–426. <https://doi.org/10.21071/az.v68i263.4203>
- Cevallos, S. (2021). Effect of an alkaline-thermal pretreatment and irradiation with accelerated electrons on the enzymatic obtaining of hydrolyzed keratin. 12064–12064. <https://doi.org/10.3390/mol2net-07-12064>
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M., & Ruseckaite, R. A. (2013). Physical and mechanical properties of compression molded and solution casting soybean protein concentrate based films. *Food Hydrocolloids*, 38, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.013>
- Condés, M. C., Añón, M. C., Dufresne, A., & Mauri, A. N. (2017). Composite and nanocomposite films based on amaranth biopolymers. *Food Hydrocolloids*, 74, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.013>
- Dąbrowska, M., Sommer, A., Sinkiewicz, I., Taraszkiewicz, A., & Staroszczyk, H. (2021). An optimal designed experiment for the alkaline hydrolysis of feather keratin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24145–24154. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17649-2>
- David, E. H. O., Curvelo, G. A. Q., & Diaz, W. A. H. (2017). Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina. 23, 82–88. <https://doi.org/10.18634/ugcj.23v.0i.767>
- Derhab, N., Mabrouk, M. E. M., El-Metwally, M. M., & Mohammed, Y. M. M. (2023). Thermostable keratinase from *Bacillus cereus* L10: optimization and some potential biotechnological applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), 29757–29773. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04887-2>
- Dicastillo, C. L. de, Gómez-Estaca, J., López-Carballo, G., Gavara, R., & Hernández-Muñoz, P. (2023). Agro-Industrial Protein Waste and Co-Products Valorization for the Development of Bioplastics: Thermoprocessing and Characterization of Feather Keratin/Gliadin Blends. *Molecules*, 28(21), 7350–7350. <https://doi.org/10.3390/molecules28217350>
- Dicastillo, C. L. de, Gómez-Estaca, J., López-Carballo, G., Gavara, R., & Hernández-Muñoz, P. (2023). Agro-Industrial Protein Waste and Co-Products Valorization for the Development of Bioplastics: Thermoprocessing and Characterization of Feather Keratin/Gliadin Blends. *Molecules*, 28(21), 7350–7350. <https://doi.org/10.3390/molecules28217350>
- Dinu, R.-M. (2020). Macromolecular valorisation of humins, keratin and lignin through sustainable copolymers and composites. HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe). <https://theses.hal.science/tel-03505916>
- Dong, Y.-Z., Chang, W.-S., & Chen, P. (2017). Characterization and overexpression of a novel keratinase from *Bacillus polyfermenticus* B4 in recombinant *Bacillus subtilis*. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0177-1>
- Elgarahy, A. M., Eloffy, M. G., Guibal, E., Alghamdi, H. M., & Elwakeel, K. Z. (2023). Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects [Review of Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 64, 292–320. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.05.018>
- Félix, M., Martínez, I., Romero, A., Partal, P., & Guerrero, A. (2017). Effect of pH and nanoclay content on the morphology and physicochemical properties of soy protein/montmorillonite nanocomposite obtained by extrusion. *Composites Part B Engineering*, 140, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.040>
- Fernández-d'Arlas, B. (2019). Tough and Functional Cross-linked Bioplastics from Sheep Wool Keratin. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51393-5>

- Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2011). The structural basis of the filament–matrix texture in the avian/reptilian group of hard β -keratins. *Journal of Structural Biology*, 173(2), 391–405. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.10.005>
- Gaonkar, S. K., & Furtado, I. (2022). Valorization of Recalcitrant Feather-waste by Extreme Microbes (pp. 183–225). <https://doi.org/10.1201/9781003187684-8>
- Goda, D. A., Bassiouny, A., Monem, N. M. A., Soliman, N. A., & Abdel-Fattah, Y. R. (2021). Feather protein lysate optimization and feather meal formation using YNDH protease with keratinolytic activity afterward enzyme partial purification and characterization. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93279-5>
- González-López, M. E., Calva-Estrada, S. de J., Gradilla-Hernández, M. S., & Barajas-Álvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: a review [Review of Current trends in biopolymers for food packaging: a review]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371>
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review [Review of Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review]. *European Polymer Journal*, 72, 365–385. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>
- Jafarzadeh, S., Nooshkam, M., Zargar, M., Garavand, F., Ghosh, S., Hadidi, M., & Forough, M. (2023). Green synthesis of nanomaterials for smart biopolymer packaging: challenges and outlooks. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 14(2), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s40097-023-00527-3>
- Łaba, W., Żarowska, B., Chorążyk, D., Pudło, A., Piegza, M., Kancelista, A., & Kopeć, W. (2018). New keratinolytic bacteria in valorization of chicken feather waste. *AMB Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0538-y>
- Latza, V. M., Guerette, P. A., Ding, D. W., Amini, S., Kumar, A., Schmidt, I., Keating, S., Oxman, N., Weaver, J. C., Fratzl, P., Miserez, A., & Mašić, A. (2015). Multi-scale thermal stability of a hard thermoplastic protein-based material. *Nature Communications*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms9313>
- Li, Q. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste [Review of Progress in Microbial Degradation of Feather Waste]. *Frontiers in Microbiology*, 10. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>
- Li, Q. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste [Review of Progress in Microbial Degradation of Feather Waste]. *Frontiers in Microbiology*, 10. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>
- Li, Q. (2021). Structure, Application, and Biochemistry of Microbial Keratinases [Review of Structure, Application, and Biochemistry of Microbial Keratinases]. *Frontiers in Microbiology*, 12. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.674345>
- Liu, S., Yu, J., Gan, Y., Qiu, X., Gao, Z.-C., Wang, H., Chen, S., Xiong, Y., Liu, G., Lin, S., McCarthy, A., John, J. V., Wei, D., & Hou, H. (2023). Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis methods, recent advances, and emerging applications [Review of Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis methods, recent advances, and emerging applications]. *Military Medical Research*, 10(1). *BioMed Central*. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00448-w>
- Lizundia, E., Sipponen, M. H., Greca, L. G., Balakshin, M., Tardy, B. L., Rojas, O. J., & Puglia, D. (2021). Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids [Review of Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids]. *Green Chemistry*, 23(18), 6698–6760. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1gc01684a>
- Loja, G. M., Celi, B. A. M., Galvan, D. S., & Rodriguez, J. P. (2016). Queratina a partir de la hidrólisis enzimática de harina de plumas de pollo, utilizando queratinasas producidas por *Bacillus subtilis* / Getting keratin from feather meal using keratinases produced by *Bacillus subtilis*. *Ciencia Unemi*, 9(20), 50–58. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol9iss20.2016pp50-58p>
- Loja, M., & Jacqueline, G. (2015). Obtención de queratina a partir de plumas de pollo, utilizando

queratinasas producidas por bacillus spp. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/2829>

Maity, T. K., Singh, N., Vaghela, P., Ghosh, A., Singh, S., Shinde, P. B., Sequeira, R. A., & Prasad, K. (2022). Efficient isolation of keratin from protein-rich waste biomass: a practical approach to minimize environmental impact and valorize waste biomass. *Sustainable Environment Research*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00152-9>

Maurya, S. D., & Singh, A. (2023). Application and Future Perspectives of Keratin Protein Extracted from Waste Chicken Feather: A Review [Review of Application and Future Perspectives of Keratin Protein Extracted from Waste Chicken Feather: A Review]. *Sustainable Chemical Engineering*, 32–46. <https://doi.org/10.37256/sce.5120243521>

Mekonnen, T. H., Mussone, P., Khalil, H., & Bressler, D. C. (2013). Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(43), 13379–13379. <https://doi.org/10.1039/c3ta12555f>

Nnolim, N. E., & Nwodo, U. U. (2020). *Bacillus* sp. CSK2 produced thermostable alkaline keratinase using agro-wastes: keratinolytic enzyme characterization. *BMC Biotechnology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12896-020-00659-2>

Nuutinen, E.-M., Virtanen, T., Lantto, R., Vähä-Nissi, M., & Jääskeläinen, A.-S. (2021). Ductile keratin films from deep eutectic solvent-fractionated feathers. *RSC Advances*, 11(44), 27512–27522. <https://doi.org/10.1039/d1ra05123g>

Orjuela-Palacio, J. M., & Zaritzky, N. (2023). Esponjas de queratina con capacidad de sorción de hidrocarburos, obtenidas a partir de residuos de la industria avícola. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2830

Perdana, S. S. P., Kusumawati, N., Basukiwardojo, M. M. S., Setiarso, P., Djalilah, G. N., & Rahmawati, K. (2025). The Effect of Ultrasonication on the Quality of Keratin Extraction Based on Ionic Liquid from Duck Feather. *Communications in Science and Technology*, 10(2), 267–275. <https://doi.org/10.21924/cst.10.2.2025.1785>

Pérez, M. J., Moreno, M. A., Martínez-Abad, A., Cattaneo, F., Zampini, C., Isla, M. I., López-Rubio, A.,

& Fabra, M. J. (2020). Interest of black carob extract for the development of active biopolymer films for cheese preservation. *Food Hydrocolloids*, 113, 106436–106436. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106436>

Perța-Crișan, S., Ursachi, C., Ștefan, Gavrilăș, S., Oancea, F., & Munteanu, F. (2021). Closing the Loop with Keratin-Rich Fibrous Materials. *Polymers*, 13(11), 1896–1896. <https://doi.org/10.3390/polym13111896>

Polesca, C., Ghatta, A. A., Passos, H., Coutinho, J. A. P., Hallett, J. P., & Freire, M. G. (2023). Sustainable keratin recovery process using a bio-based ionic liquid aqueous solution and its techno-economic assessment. *Green Chemistry*, 25(10), 3995–4003. <https://doi.org/10.1039/d3gc00850a>

Polesca, C., Ghatta, A. A., Passos, H., Coutinho, J. A. P., Hallett, J. P., & Freire, M. G. (2023). Sustainable keratin recovery process using a bio-based ionic liquid aqueous solution and its techno-economic assessment. *Green Chemistry*, 25(10), 3995–4003. <https://doi.org/10.1039/d3gc00850a>

Polesca, C., Passos, H., Nakasu, P. Y. S., Coutinho, J. A. P., Freire, M. G., & Hallett, J. P. (2024). Ionic-liquid-processed keratin-based biocomposite films with cellulose and chitin for sustainable dye removal. *RSC Sustainability*, 2(8), 2239–2248. <https://doi.org/10.1039/d4su00179f>

Qamar, S. A., Asgher, M., & Khalid, N. (2020). Bioinspired Nanocomposites: Functional Materials for Sustainable Greener Technologies. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92876>

Qin, X., Yang, C., Guo, Y., Liu, J., Bitter, J. H., Scott, E. L., & Zhang, C. (2023). Effect of ultrasound on keratin valorization from chicken feather waste: Process optimization and keratin characterization. *Socio-Environmental Systems Modeling*, 93, 106297–106297. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106297>

Rahimnahal, S., Meimandipour, A., Fayazi, J., Karkhane, A. A., Shamsara, M., Nassiri, M. B., Mirzaei, H., Hamblin, M. R., Tarrahimofrad, H., Bakherad, H., Zamani, J., & Mohammadi, Y. (2023). Biochemical and molecular characterization of novel keratinolytic protease from *Bacillus licheniformis* (KRLr1). *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1132760>

- Rajabinejad, H., Zoccola, M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Rovero, G., & Tonin, C. (2017). Physicochemical properties of keratin extracted from wool by various methods. *Textile Research Journal*, 88(21), 2415–2424. <https://doi.org/10.1177/0040517517723028>
- Raydan, N. D. V., Loquet, A., Habenstein, B., Kauffmann, B., Châtel, G., & Robles, E. (2025). Ultrasound-Assisted alkaline hydrolysis of feather keratin using a cup horn sonoreactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 124, 107733–107733. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107733>
- Sánchez-Olivares, G., Medina-Torres, L., Calderas-García, F., Sánchez-Solís, A., Leonardo-Moreno, R., Ramírez, V. Q., & Manero-Brito, O. (2017). Efecto de la biofibra de queratina en las propiedades de un biopolímero termoplástico: Estudio preliminar. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(4), 369–378. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n4.032>
- Sharma, I., Pranaw, K., Soni, H., Rawat, H. K., & Kango, N. (2022). Parametrically optimized feather degradation by *Bacillus velezensis* NCIM 5802 and delineation of keratin hydrolysis by multi-scale analysis for poultry waste management. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21351-9>
- Shavandi, A., Jafari, H., Zago, E., Hobbi, P., Nie, L., & Laet, N. D. (2021). A sustainable solvent based on lactic acid and L-cysteine for the regeneration of keratin from waste wool. *Green Chemistry*, 23(3), 1171–1174. <https://doi.org/10.1039/d0gc04314a>
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Bekhit, A. E. A. (2017). Keratin: dissolution, extraction and biomedical application [Review of Keratin: dissolution, extraction and biomedical application]. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c7bm00411g>
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Bekhit, A. E. D. A. (2017). Keratin: Dissolution, extraction and biomedical application. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735. <https://doi.org/10.1039/C7BM00411G>
- Sinche-Serra, M. V., Orellana, G., Coronel, S. R. C., Vera-Calle, E. R., Jentzsch, P. V., & Castillo-Domínguez, J. P. (2025). Production of keratin hydrolysates from irradiated chicken feathers via chemical and enzymatic treatments. *CyTA - Journal of Food*, 23(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2547835>
- Škerget, M., Čolnik, M., Zemljič, L. F., Gradišnik, L., Semren, T. Ž., Lovaković, B. T., & Maver, U. (2023). Efficient and Green Isolation of Keratin from Poultry Feathers by Subcritical Water. *Polymers*, 15(12), 2658–2658. <https://doi.org/10.3390/polym15122658>
- Tardy, B. L., Mattos, B. D., Otoni, C. G., Beaumont, M., Majoinen, J., Kämäräinen, T., & Rojas, O. J. (2021). Deconstruction and Reassembly of Renewable Polymers and Biocolloids into Next Generation Structured Materials. *Aaltodoc (Aalto University)*, 121(22), 14088–14188. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01333>
- Tavares, L., Souza, H. K. S., Gonçalves, M. P., & Rocha, C. M. R. (2020). Physicochemical and microstructural properties of composite edible film obtained by complex coacervation between chitosan and whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 113, 106471–106471. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106471>
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of chemical properties. *Waste Management*, 68, 626–635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.050>
- Tinoco, A., Rodrigues, R. M., Machado, R., Pereira, R. N., Cavaco-Paulo, A., & Ribeiro, A. (2020). Ohmic heating as an innovative approach for the production of keratin films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 671–680. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.122>
- Tissera, N. D., Wijesena, R. N., Ludowyke, N., Priyadarshana, G., Dahanayake, D., Silva, R. M. de, & Silva, K. M. N. de. (2024). Keratin protein nanofibers from merino wool yarn: a top-down approach for the disintegration of hierarchical wool architecture to extract α -keratin protein nanofibers. *RSC Advances*, 14(10), 6793–6804. <https://doi.org/10.1039/d3ra07063h>
- Tomadoni, B., Capello, C., Valencia, G. A., & Gutiérrez, T. J. (2020). Self-assembled proteins for food applications: A review [Review of Self-assembled proteins for food applications: A review]. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 1–16. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.015>
- Vanderlei, R. M., Novo-Mansur, M. T. M., Mattoso, L. H. C., & Moreira, F. K. V. (2024). Effect of precipitation methods on physicochemical properties of keratin films produced from chicken feather waste. *Journal of Applied*

- Polymer Science, 141(34). <https://doi.org/10.1002/app.55863>
- Verbeek, C. J. R., & Berg, L. E. van den. (2009b). Extrusion Processing and Properties of Protein-Based Thermoplastics. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295(1), 10–21. <https://doi.org/10.1002/mame.200900167>
- Verdnik, A., Čolnik, M., Knez, Ž., & Škerget, M. (2021). Isolation of Keratin from Waste Wool Using Hydrothermal Processes. *Acta Chimica Slovenica*, 68(2), 433–440. <https://doi.org/10.17344/acsi.2020.6538>
- Vidmar, B., & Vodovnik, M. (2018). Microbial keratinases: enzymes with promising biotechnological 4 applications [Review of Microbial keratinases: enzymes with promising biotechnological 4 applications]. *Food Technology and Biotechnology*, 56(3). University of Zagreb. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5658>
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229–318. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
- Wu, J., Cai, L., & Weitz, D. A. (2017). Tough Self-Healing Elastomers by Molecular Enforced Integration of Covalent and Reversible Networks. *Advanced Materials*, 29(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201702616>
- Wu, W., Chen, M.-Y., Tu, I., Lin, Y., Nadendla, E. K., Chen, M., Ho, M., & Wu, S. (2017). The discovery of novel heat-stable keratinases from *Meiothermus taiwanensis* WR-220 and other extremophiles. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04723-4>
- Xu, C., Nasrollahzadeh, M., Selva, M., Issaabadi, Z., & Luque, R. (2019). Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials [Review of Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials]. *Chemical Society Reviews*, 48(18), 4791–4822. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8cs00543e>
- Yin, X., & Woo, M. W. (2024). Recent advances in keratin-based biocomposites and sustainable materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 9(2), 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.12.003>
- Yin, Y., & Woo, M. W. (2024). Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives. *Sustainable Food Technology*, 2(3), 548–566. <https://doi.org/10.1039/d4fb00028e>
- Yong, B., Fei, X., Shao, H., Xu, P., Hu, Y., Ni, W., Xiao, Q., Tao, X., He, X., & Feng, H. (2020). Recombinant expression and biochemical characterization of a novel keratinase BsKER71 from feather degrading bacterium *Bacillus subtilis* S1-4. *AMB Express*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0939-6>
- Zhao, X. (2013). Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: building dissipation into stretchy networks [Review of Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: building dissipation into stretchy networks]. *Soft Matter*, 10(5), 672–687. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c3sm52272e>
- Zhou, B., Guo, Y., Xue, Y., Ji, X., & Huang, Y. (2023). Comprehensive insights into the mechanism of keratin degradation and exploitation of keratinase to enhance the bioaccessibility of soybean protein. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02426-9>
- Zhou, X., Guo, B., Zhang, L., & Hu, G. (2017). Progress in bio-inspired sacrificial bonds in artificial polymeric materials. *Chemical Society Reviews*, 46(20), 6301–6329. <https://doi.org/10.1039/c7cs00276a>

Currículo corto de los autores

Dra. Amalia Nadin Lule Chávez

ORCID: 0000-0002-2538-7753

La Dra. Amalia Nadin Lule Chávez obtuvo el grado de Maestra en Ciencias con Especialidad en Biotecnología de Plantas en 2015 y el de Doctora en Ciencias con Especialidad en Biotecnología de Plantas en 2021, ambos por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Irapuato. Actualmente es profesora-investigadora del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra. Sus líneas de investigación incluyen microbiología aplicada, biotecnología agrícola, control biológico, diagnóstico fitosanitario y aprovechamiento biotecnológico de residuos agroindustriales para el desarrollo de bioinsumos y

biomateriales sostenibles.
anlule@itess.edu.mx

Dra. Ernestina Becerra Becerra

ORCID: 0000-0002-7422-8687

La Dra. Ernestina Becerra Becerra obtuvo el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica en 2012 por el Tecnológico Nacional de México Campus Celaya y el grado de Doctora en Ciencias en 2025 por la Universidad de Guanajuato. Actualmente es profesora-investigadora del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra. Sus áreas de interés incluyen la ingeniería aplicada, el desarrollo tecnológico, la innovación y la sustentabilidad, participando en proyectos multidisciplinarios orientados a la solución de problemáticas del sector productivo y agroindustrial.

Dr. José Eleazar Peralta López

ORCID: 0009-0002-0402-0028

El Dr. José Eleazar Peralta López obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en 2018 y el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica/Computación en 2023, ambos por el Tecnológico Nacional de México Campus Celaya. Actualmente es profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra. Sus líneas de interés incluyen la ingeniería electrónica, los sistemas computacionales, la automatización, el desarrollo tecnológico y la aplicación de herramientas digitales para la solución de problemas en los sectores productivo, industrial y agropecuario. Ha participado en proyectos de investigación e innovación orientados al fortalecimiento de capacidades tecnológicas y científicas.

M. en C. Alejandro Tapia Muñoz

ORCID: 0009-0000-7206-6496

Alejandro Tapia Muñoz obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en 2014 por el Tecnológico Nacional de México Campus Celaya. Actualmente es profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra. Su labor académica se enfoca en las áreas de ingeniería electrónica, automatización, desarrollo tecnológico y aplicación de herramientas digitales para la solución de problemáticas en los sectores productivo

y educativo. Ha participado en proyectos de investigación, innovación tecnológica y formación de recursos humanos, contribuyendo al fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas en su región.

Diseño del modelo matemático y control PID de velocidad longitudinal para un go kart eléctrico

A. Flores Torres, R. Pérez Saldaña, A. Hernández Aguiña

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un modelo matemático integral de dinámica longitudinal para un go-kart eléctrico, fundamentado en la dinámica vehicular y el comportamiento electromecánico. La modelación dinámica emplea la segunda ley de Newton para analizar la aceleración, integrando la fuerza automotriz, la resistencia a la rodadura, el arrastre aerodinámico y el efecto de las pendientes. El sistema motriz se describe mediante ecuaciones que vinculan el torque del motor con la inercia, la fricción y la fuerza electromotriz. Se utilizaron parámetros físicos específicos, como una masa del vehículo de 90 kg y una relación de transmisión de 4:1, para realizar simulaciones incorporando restricciones de saturación de corriente, lo que permite validar una respuesta de velocidad realista y coherente con las limitaciones físicas de una fuente de voltaje de 24V. Además, el modelo contempla el análisis de la potencia suministrada y las pérdidas por efecto Joule para asegurar la eficiencia energética. Los resultados de la simulación permiten predecir el comportamiento dinámico del prototipo bajo diversas condiciones de superficie, proporcionando una base teórica robusta para la implementación de lazos de control de velocidad y la optimización del diseño estructural en entornos controlados.

Palabras Clave: Go-kart eléctrico, modelo matemático, dinámica vehicular, tracción eléctrica.

Introducción

El desarrollo de tecnologías aplicadas a la movilidad eléctrica y los sistemas autónomos representa uno de los campos de mayor crecimiento dentro de la ingeniería automotriz contemporánea. La integración de componentes electrónicos, sistemas de control inteligentes y elementos mecánicos avanzados ha permitido la creación de vehículos capaces de operar sin intervención humana, abriendo nuevas posibilidades en eficiencia y automatización. En este contexto, el diseño

de un modelo matemático preciso es fundamental, ya que constituye una representación simbólica y numérica que permite describir las variables dinámicas y el comportamiento físico de un sistema mediante ecuaciones diferenciales y algebraicas.

Este estudio se centra en la implementación de un sistema de control capaz de gestionar la velocidad longitudinal de un go-kart eléctrico, fundamentado en un modelo que describe su comportamiento dinámico. A diferencia de los vehículos de combustión, los vehículos eléctricos ofrecen ventajas significativas en respuesta dinámica y mantenimiento, pero requieren un análisis exhaustivo de sus sistemas de propulsión. Para ello, se emplea una metodología descriptiva y experimental basada en el ciclo de mejora continua PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar), lo que asegura un enfoque iterativo y sistemático en la validación del prototipo.

El objetivo central de esta investigación es diseñar e implementar un sistema de control integrando componentes clave como microcontroladores Arduino, motores de corriente continua (DC) y sensores de velocidad. Mediante la aplicación de la segunda ley de Newton y el análisis de fuerza de tracción, resistencia a la rodadura y arrastre aerodinámicos. Este trabajo no solo busca la creación de un prototipo funcional, sino también fortalecer las competencias profesionales en el ámbito de la innovación vehicular y la movilidad sostenible.

Análisis del estado del arte

La movilidad eléctrica y los sistemas autónomos se han consolidado como pilares de la innovación en la ingeniería automotriz contemporánea. Históricamente el desarrollo de vehículos ligeros como los go-karts comenzó a mediados del siglo XX, aproximadamente en 1956, como alternativas recreativas económicas. Sin embargo, en las últimas décadas, estas plataformas han

evolucionado de motores de combustión interna hacia sistemas de propulsión eléctrica, los cuales ofrecen ventajas críticas en eficiencia energética, menor mantenimiento y una respuesta dinámica superior.

En el ámbito académico y de investigación, autores como **López y García (2020)** destacan que los prototipos vehiculares a pequeña escala son herramientas esenciales para integrar conocimientos de diseño, mecánica y sistemas de control. El estado actual de la tecnología en go-karts se centra en el uso de estructuras rígidas y sistemas de dirección optimizados, como el principio de Ackerman, para mejorar la maniobrabilidad.

Finalmente, la integración de sistemas de control automático y microcontroladores (como Arduino o Raspberry Pi) representa la frontera actual en el desarrollo de estos vehículos. Estudios recientes de Muñoz y Herrera (2021) sobre sistemas de control aplicados a vehículos eléctricos resaltan la necesidad de modelos matemáticos precisos que describan variables como el torque del motor y las fuerzas de resistencia para lograr un perfil de aceleración eficiente y controlado. Este proyecto se alinea con estas tendencias globales, utilizando un enfoque descriptivo-experimental para validar la viabilidad de sistemas de transporte automatizados a escala.

Metodología

El presente estudio se basa en una investigación del tipo descriptiva y experimental, con un diseño orientado al desarrollo tecnológico. La metodología central se fundamenta en el ciclo de mejora continua PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar) de Deming, el cual permite un enfoque sistemático e iterativo para el diseño y construcción de prototipos mecánicos y electrónicos.

Fase de planeación (P)

En esta etapa se establecieron los requerimientos técnicos y los fundamentos teóricos del vehículo. Se realizó una investigación exhaustiva sobre la autonomía en vehículos eléctricos, sistemas embebidos y control de navegación. (Deming (1986))

Fase de ejecución - Hacer (Hacer)

Esta fase comprendió el desarrollo de núcleo del proyecto: el modelo matemático y las baterías.

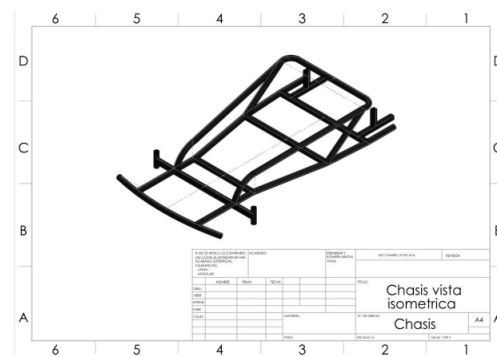


Figura 1. Modelo Isométrico en CAD.

Fuente. Elaboración propia

- **Diseño CAD:** se utilizó un software CAD para realizar el modelado 3D del chasis (figura 1), asegurando la ubicación óptima de componentes como el motor y las baterías. Shigley & Budynas (2020)

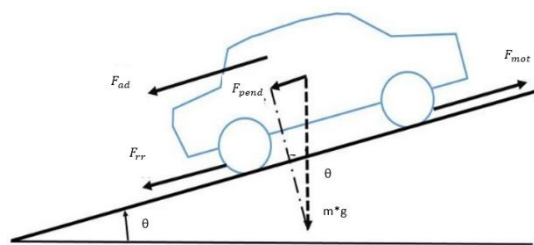


Figura 2. Diagrama de modelo libre.

Fuente. Elaboración propia con base en Wong (2022)

Ecuación General de Fuerzas

$$F_{mot} = F_a + F_{rr} + F_{ad} + F_{pend} \quad (1)$$

Donde:

- F_{mot} : Fuerza motriz proporcionada por el motor
- F_a : Fuerza de aceleración (masa por aceleración)
- F_{rr} : Fuerza de resistencia de rodadura
- F_{ad} : Fuerza de resistencia aerodinámica (arrastre)
- F_{pend} : Componente de peso en una pendiente

Fuerza de aceleración:

$$F_a = m * a$$

Variables y simbología utilizada

Variabes	Símbolo	Unidad
Fuerza motriz	F_{mot}	N
Fuerza de aceleración	F_a	N
F. resistencia rodadura	F_{rr}	N
F. resistencia aerodinámica	F_{ad}	N
Comp. peso en pendiente	F_{pend}	N

Fuente. Elaboración propia con base en Wong (2022)

Construcción y ensamblaje: Se integro un motor de corriente continua RS775 de 24 v, un puente H BTS7960, y un microcontrolador Arduino Uno (figura 3). La selección del motor RS775 se justifica técnica y económicamente por su alta relación potencia-peso, su disponibilidad para plataformas a escala y su capacidad para tolerar las corrientes transitorias calculadas en el modelo. Sus parámetros nominales (constante de par $k_t = 0.2$ y constante de fuerza electromotriz $k_e = 0.2$) proporcionan el torque suficiente para vencer la inercia estática de un vehículo ligero. Además, se destaca el diseño e impresión 3D de un disco de prueba para el sensor de velocidad (encoder).

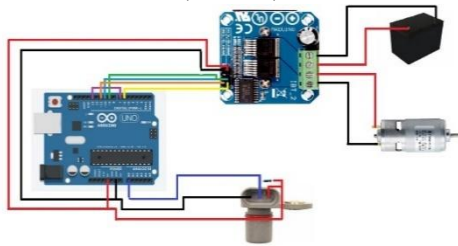


Figura 3. Diagrama eléctrico
Fuente. Elaboración propia con imágenes representativas de hardware

Fase de verificación (V)

Se evaluó el desempeño del prototipo contrastando los resultados experimentales con las simulaciones matemáticas.

- Pruebas estáticas y dinámicas: Para garantizar la replicabilidad del estudio, se estableció un protocolo de pruebas estructurado. Las

condiciones de ensayo en campo se ejecutaron sobre una superficie de asfalto en buen estado, asumiendo un coeficiente de rodadura constante ($C_r \approx 0.015$). a una temperatura ambiente controlada y asegurando una carga nominal del 100% en el banco de baterías (24 V). El protocolo de actuación consistió en arranques desde el reposo, enviando referencias de velocidad de 1000 RPM al controlador PID. Los tiempos de respuesta y la velocidad angular fueron capturados en tiempo real a una frecuencia de muestreo de 10 ms (100Hz) mediante el encoder acoplado al eje motriz. Paralelamente a las mediciones electrónicas, se validó la integridad estructural del prototipo bajo una carga física de 50-60 kg (peso del piloto) y se comprobó la correcta respuesta del mecanismo de dirección. (Álvarez Martínez et al., 2024).

- Velocidad de simulación: Se realizó una simulación del motor sin un controlador (figura 4), implementando la restricción física del voltaje nominal de la batería (24 V). Se observa que el motor logra llegar a su velocidad límite física en estado estacionario (aproximadamente 990 RPM) en función de su constante de fuerza electromotriz ($k_e = 0.2$), estabilizándose correctamente sin violar los límites de tensión del sistema.

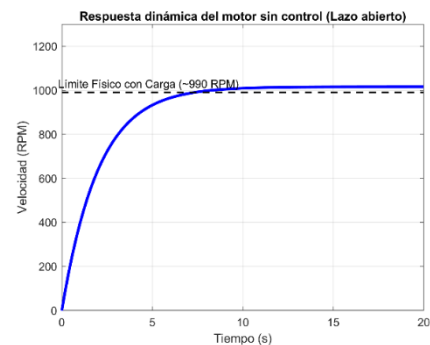


Figura 4. Diagrama del motor sin control.
Fuente. Elaboración propia

Fase de ajuste - Actuar (A)

Basándose en la verificación, se procedió a la optimización del sistema.

- Optimización: se realizaron ajustes en la configuración del motor y el sistema de dirección para facilitar la automatización plena.

Se documentaron las lecciones aprendidas para futuros desarrollos que incluían sensores más robustos como LiDAR. Singh y Kumar (2021)

Condición y tipo de Superficie	$\mu_0 (C_r)$
Hormigón muy bueno	0.008-0.01
Asfalto muy bueno	0.01-0.0125
Hormigón promedio	0.01-0.015
Pavimento muy bueno	0.015
Macadán muy bueno	0.013-0.016
Asfalto promedio	0.018
Hormigón en malas condiciones	0.02
Pavimento de bloque en buen estado	0.02
Macadán promedio	0.018-0.023
Asfalto en mala condición	0.023
Macadán sucio	0.023 -0.028
Camino de piedra en buen estado	0.033 -0.055
Camino de tierra en buen estado	0.045
Camino de piedra en mal estado	0.085
Camino de tierra sin mantenimiento	0.08-0.16
Arena	0.15-0.3

Fuente: elaboración propia con base en Wong (2022)

Resultados

El desarrollo del modelo matemático y su implementación tecnológica permitieron validar el comportamiento dinámico del go-kart eléctrico autónomo. Se logró la integración exitosa de las fases de diseño CAD, modelado matemático y simulación de control.

Validación del modelo matemático y simulación

Se obtuvo un modelo matemático funcional que describe la tracción y el consumo energético, Los resultados de la simulación muestran que el vehículo de 90 Kg responde coherentemente a las fuerzas de resistencias calculadas.

Dinámica del vehículo

$$a(k) = \frac{F_{mot} - F_{res} - F_{pend}}{m} \quad (3)$$

Fuerza de resistencia total

$$F_{res} = C_r * m * g + 0.5 * p * A_f * C_d * v(k)^2 \quad (4)$$

Para garantizar la validez física del modelo, la corriente del motor $I_{mot}(k)$ se limitó dinámicamente mediante la restricción de saturación de la batería:

$$I_{max_fisica} = \frac{V_{oc} - k_e * \omega(k)}{R + R_{int}} \quad (5)$$

Donde la tensión en los terminales del motor se define como:

$$V_{batt}(k) = V_{oc} - R_{int} * I_{mot}(k) \quad (6)$$

Para evaluar el desempeño energético del sistema, se incorporó el cálculo del balance de potencias. La potencia eléctrica suministrada por la batería se define como:

$$P_{in} = V_{batt} * I_{mot} \quad (7)$$

Durante la operación, una porción de esta energía se disipa en forma de calor debido a la resistencia de los devanados, lo cual se cuantifica mediante las pérdidas por efecto Joule:

$$P_{Joule} = I_{mot}^2 * R \quad (8)$$

Finalmente, la potencia mecánica útil se calcula como:

$$P_{out} = T_{mot} * \omega \quad (9)$$

Permitiendo establecer el rendimiento electromecánico del sistema como:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) * 100 \quad (10)$$

El código completo empleado para las simulaciones se presenta en el Anexo A

Análisis de la respuesta de control (PID)

Para el diseño del controlador PID, el comportamiento dinámico del motor de corriente continua acoplado a la inercia del vehículo se aproximó mediante una función de transferencia de primer orden, asumiendo una inductancia eléctrica despreciable para la dinámica

mecánica. La relación entre el voltaje aplicado $V(s)$ y la velocidad angular $\Omega(s)$ está dada por la ecuación:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{R * J_{eq} * s + (R * B_{eq} + K_t * K_e)} \quad (11)$$

Donde J_{eq} es la inercia equivalente del sistema y B_{eq} representa la fricción viscosa total. A partir de esta planta, se implementó un control en lazo cerrado definido por la acción Proporcional, Integral y Derivativa (PID):

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d * s \quad (12)$$

Uno de los resultados más significativos es la comparación de la sintonización del controlador. Para validar la estrategia de control se definió una velocidad de referencia de 1000 RPM, valor seleccionado por estar cerca del límite operativo de la batería de 24V. Se comparó una sintonización heurística (aleatoria) con parámetros $K_p = 0.5, K_i = 0.1, K_d = 0.05$; frente a una sintonización por el método de Ziegler-Nichols, resultando en $K_p = 1.2, K_i = 2.5, K_d = 0.15$.

Al extender la simulación a 10 segundos (Figura 5), se observa que el método de Ziegler-Nichols ofrece un tiempo de levantamiento inicial más rápido. Por su parte, la sintonización heurística es más lenta pero suave. Es de suma importancia notar que ambos controladores estabilizan la velocidad en aproximadamente 990 RPM, quedando ligeramente por debajo de la referencia. Esto demuestra validez física del modelo: el sistema entra en saturación de voltaje (24 V) y alcanza su velocidad terminal, punto exacto donde la fuerza motriz máxima disponible se equilibra por completo con la resistencia a la rodadura y el arrastre aerodinámico del vehículo con el piloto a bordo. El detalle de las diferencias en la fase transitoria, donde se aprecia la separación de las curvas y el sobreimpulso característico de Ziegler-Nichols antes de entrar a la zona de saturación permanente, puede observarse con mayor claridad en el acercamiento de la Figura 6.

El código completo del controlador PID se presenta en el Anexo B

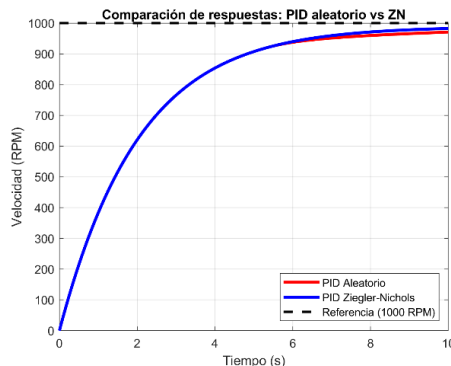


Figura 5. Comparativa del control con PID aleatorio vs Z-N.

Fuente. Elaboración propia

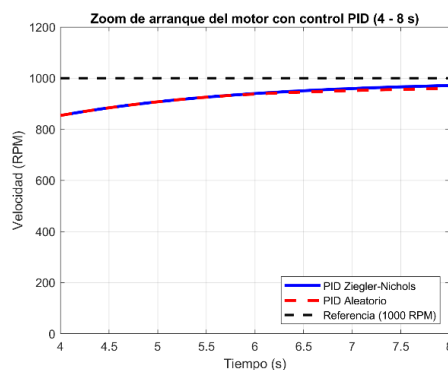


Figura 5. Zoom de arranque del motor bajo control PID en lazo cerrado (4 - 8 s).

Fuente. Elaboración propia.

Implementación de hardware y sensores

En el aspecto físico, se completó satisfactoriamente el diseño y la impresión 3D del disco para el sensor de velocidad (encoder), permitiendo la lectura de datos reales de rotación del motor.

Resultados del diseño estructural.

El diseño asistido por computadora (CAD) permitió establecer una propuesta geométrica viable para la distribución espacial del piloto (asumiendo un peso promedio de 50-60 Kg) y la ubicación estratégica de los componentes electrónicos (Figura 7). Cabe señalar que este modelado es de carácter preliminar y topológico; la validación exhaustiva de los esfuerzos y la rigidez estructural del chasis mediante análisis de elementos

finitos (FEA) constituye la siguiente fase de desarrollo del prototipo.

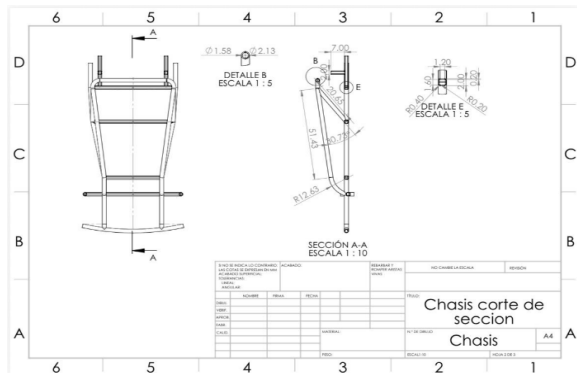


Figura 6. Diagrama en CAD.
Fuente. Elaboración propia.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de un modelo dinámico vehicular con el comportamiento electromagnético del motor permite predecir con alta fidelidad las limitaciones físicas del go-kart eléctrico a pequeña escala. A diferencia de las simulaciones ideales en lazo abierto que suelen omitir las restricciones energéticas, la incorporación de la saturación de voltaje de la batería (24 V) reveló el verdadero régimen terminal de prototipo. Como se observó en la respuesta del controlador PID, el vehículo alcanza una velocidad máxima de estabilización cercana a las 990 RPM, punto exacto en el cual la fuerza electromotriz limita la corriente extraída y el par motor logra equilibrarse dinámicamente con las fuerzas de arrastre aerodinámico y la resistencia de rodadura.

Al contrastar estos hallazgos con la literatura, el comportamiento de saturación y equilibrio de las fuerzas coincide plenamente con los fundamentos de dinámica longitudinal descritos por Wong (2022). Asimismo, Muñoz y Herrera (2021) señalan la necesidad crítica de modelos matemáticos precisos para la navegación autónoma; en este sentido, nuestro estudio aporta un valor empírico adicional al acoplar el seguimiento de pérdidas por efecto Joule durante el régimen transitorio de arranque.

Mientras que autores como López y García (2020) destacan el uso de prototipos para integrar conocimientos mecánicos, el presente trabajo presenta como aportación original la demostración de que una sintonización PID heurística puede ofrecer una respuesta

transitoria más segura (menos pico de disipación térmica y sin sobreimpulso mecánico) que métodos analíticos clásicos como Ziegler-Nichols, cuando el sistema opera cerca de sus límites de saturación física. Esto proporciona una base teórica más realista para el diseño de algoritmos de control de velocidad en entornos controlados, evitando el desgaste prematuro de los actuadores eléctricos.

Conclusiones

El desarrollo del modelo dinámico para el go-kart eléctrico permitió validar la factibilidad técnica de integrar sistemas mecánicos, electrónicos y de control en un vehículo compacto para entornos controlados. El modelo matemático proporcionó una base teórica sólida para predecir el comportamiento de tracción del vehículo. Asimismo, el diseño conceptual en CAD facilitó la planificación espacial y el ensamblaje de los componentes físicos; sin embargo, la selección definitiva de materiales y la certificación de su resistencia ante cargas dinámicas requerirán estudios estructurales complementarios. Adicionalmente, el cálculo de las pérdidas térmicas por efecto Joule integradas en el modelo de simulación permitió estimar el rendimiento electromecánico del motor, demostrando que la mayor disipación de energía ocurre durante la fase transitoria de arranque, estabilizando la eficiencia una vez alcanzada la velocidad cruceo.

Se concluye que el sistema de control basado en microcontroladores fue capaz de procesar señales de sensores y ejecutar la ley de control para regular la velocidad de tracción, logrando el seguimiento de referencias de RPM con estabilidad y precisión aceptable. Asimismo, la aplicación de la metodología PHVA fue fundamental para detectar desviaciones de manera temprana, permitiendo ajustes en la calibración de sensores y en la sintonización de los algoritmos de control. Finalmente, el proyecto fortaleció las competencias profesionales en áreas de innovación automotriz y sistemas embebidos.

Trabajos futuros y recomendaciones.

Para evolucionar el prototipo hacia niveles de autonomía más complejos, se proponen las siguientes líneas de investigación y desarrollo:

- **Sensores avanzados:** Implementar tecnologías de percepción más robustas, como LiDAR, cámaras o sensores infrarrojos, para mejorar la

detección del entorno y la evasión de obstáculos.

- Capacidad de procesamiento: Migrar a controladores de mayor potencia, como Raspberry Pi, que permitan ejecutar algoritmos de navegación predictiva e inteligencia artificial.
- Optimización estructural: Realizar un Análisis de Elementos Finitos (FEA) para evaluar los esfuerzos, simulaciones avanzadas de vibraciones, impactos y análisis modal en el chasis, permitiendo así definir las propiedades exactas de los materiales, reducir el peso y garantizar la seguridad del piloto.
- Sistemas de seguridad: Desarrollar un frenado asistido electrónicamente y un sistema de telemetría para el monitoreo remoto de variables críticas como voltaje, temperatura del motor y velocidad.
- Pruebas de campo extensas: ampliar los ensayos dinámicos en superficies con distintos coeficientes de rodadura (como asfalto en mal estado o arena) para validar la robustez del modelo matemático en condiciones no controladas.

Anexo A Código MATLAB del modelo matemático

Código

% Modelo Acoplado de Tracción Vehículo Eléctrico con Pendiente

% --- Parámetros físicos del vehículo ---

```
m = 90;      % Masa total del vehículo [kg]
g = 9.81;    % Aceleración gravitacional [m/s^2]
Cr = 0.02;   % Coeficiente de rodadura
Cd = 0.7;    % Coeficiente aerodinámico
Af = 1.2;    % Área frontal [m^2]
rho = 1.17;  % Densidad del aire [kg/m^3]
r = 0.14;    % Radio de la rueda [m]
```

```
i = 4;      % Relación de transmisión
eta = 0.9;  % Eficiencia de transmisión
```

% --- Parámetros del motor ---

```
kt = 0.2;    % Constante de par [Nm/A]
ke = 0.2;    % Constante de FEM [V/(rad/s)]
R = 0.4;     % Resistencia del motor [ohm]
```

% --- Parámetros de la batería ---

```
Voc = 24;    % Voltaje en circuito abierto [V]
Rint = 0.3;   % Resistencia interna de la batería [ohm]
```

% --- Parámetros de simulación ---

```
theta_deg = 0;      % Pendiente en grados
theta = deg2rad(theta_deg); % Conversión a radianes
t_final = 100;      % Duración de simulación [s]
dt = 0.1;           % Paso de tiempo [s]
time = 0:dt:t_final; % Vector de tiempo
% --- Inicialización de variables ---
v = zeros(size(time)); % Velocidad [m/s]
a = zeros(size(time)); % Aceleración [m/s^2]
omega = zeros(size(time)); % Velocidad angular [rad/s]
Imot = zeros(size(time)); % Corriente del motor [A]
Vbatt = zeros(size(time)); % Voltaje de batería [V]
P_in = zeros(size(time)); % Potencia eléctrica de entrada [W]
P_joule = zeros(size(time)); % Pérdidas por efecto Joule [W]
P_out = zeros(size(time)); % Potencia mecánica de salida [W]
eficiencia = zeros(size(time)); % Rendimiento del motor [%]
```

% Corriente de entrada máxima deseada (límite del controlador, ej. 50A) I_control_max = 50;

%% Simulación

for k = 1:length(time)-1

 % Velocidad angular del motor

 omega(k) = (i * v(k)) / r;

 % La corriente física máxima que la batería puede entregar a esta velocidad:

 I_max_fisica = (Voc - ke * omega(k)) / (R + Rint);

 % Evitar corrientes negativas (si no hay frenado regenerativo)

 I_max_fisica = max(0, I_max_fisica);

 % La corriente real del motor está limitada por la batería y la física

 Imot(k) = min(I_control_max, I_max_fisica);

 % Par del motor real

Tmot = kt * Imot(k);

 % Fuerza entregada por el motor en ruedas

 Fmot = (eta * Tmot * i) / r;

 % Fuerzas de resistencia

 Fres = Cr * m * g + 0.5 * rho * Af * Cd * v(k)^2;

 % Fuerza de pendiente

 Fpend = m * g * sin(theta);

 % Dinámica del vehículo (segunda ley de Newton)

```

a(k) = (Fmot - Fres - Fpend) / m
% Integración de velocidad
v(k+1) = v(k) + a(k) * dt;
% Voltaje en las terminales del motor (descontando
caída interna de la batería)
Vbatt(k) = Voc - Rint * Imot(k);
% Cálculo de Potencias, Pérdidas Joule y Rendimiento
P_in(k) = Vbatt(k) * Imot(k);
P_joule(k) = R * (Imot(k)^2);
P_out(k) = Tmot * omega(k);
% Evitar divisiones por cero en el arranque
if P_in(k) > 0
    eficiencia(k) = (P_out(k) / P_in(k)) * 100;
else
    eficiencia(k) = 0;
end
end
%% Graficar resultados
figure;
subplot(3,1,1);
plot(time, v, 'b', 'LineWidth', 2);
ylabel('Velocidad [m/s]');
title('Modelo Dinámico de Vehículo Eléctrico con
Pendiente');
grid on;

subplot(3,1,2);
plot(time, Vbatt, 'r', 'LineWidth', 2);
ylabel('Voltaje Batería [V]');
grid on;

subplot(3,1,3);
plot(time, omega, 'g', 'LineWidth', 2);
ylabel('\omega Motor [rad/s]');
xlabel('Tiempo [s]');
grid on;

```

Anexo B Código MATLAB del controlador PID

```

%% Simulación Comparativa de Controladores PID
(Lazo Cerrado)
clear; close all; clc; % Limpiamos memoria para evitar
errores

% --- 1. Parámetros físicos del vehículo y motor ---
m = 90; g = 9.81; Cr = 0.02; Cd = 0.7; Af = 1.2; rho =
1.17;

r = 0.14; i = 4; eta = 0.9;

kt = 0.2; ke = 0.2; R = 0.4; Voc = 24; Rint = 0.3;

```

```

% --- 2. Inicialización de tiempo (3 segundos) ---
t_final_pid = 10;
dt_pid = 0.001;

time = 0:dt_pid:t_final_pid; rpm_deseada = 1000;

omega_ref = rpm_deseada * (2 * pi / 60);
% --- 3. Variables PID 1: Aleatorio (Heurístico) ---
Kp_a = 0.5; Ki_a = 0.1; Kd_a = 0.05;
omega_a = zeros(size(time)); v_a = zeros(size(time));
error_int_a = 0; error_prev_a = 0;
% --- 4. Variables PID 2: Ziegler-Nichols ---
Kp_zn = 1.2; Ki_zn = 2.5; Kd_zn = 0.15;
omega_zn = zeros(size(time)); v_zn = zeros(size(time));
error_int_zn = 0; error_prev_zn = 0;
%% 5. Ciclo de simulación para ambos controladores
for k = 1:length(time)-1
    % --- Dinámica PID Aleatorio ---
    e_a = omega_ref - omega_a(k);
    error_int_a = error_int_a + e_a * dt_pid;
    e_dev_a = (e_a - error_prev_a) / dt_pid;
    V_pid_a = Kp_a * e_a + Ki_a * error_int_a + Kd_a *
e_dev_a;
    V_ctrl_a = max(0, min(Voc, V_pid_a)); % Saturación
24V
    I_a = max(0, (V_ctrl_a - ke * omega_a(k)) / (R +
Rint)); F_a = (eta * (kt * I_a) * i) / r;
    Fres_a = Cr * m * g + 0.5 * rho * Af * Cd * v_a(k)^2;
    v_a(k+1) = v_a(k) + ((F_a - Fres_a)/m) * dt_pid;
    omega_a(k+1) = (i * v_a(k+1)) / r;
    error_prev_a = e_a; % --- Dinámica PID Ziegler-
Nichols ---
    e_zn = omega_ref - omega_zn(k);
    error_int_zn = error_int_zn + e_zn * dt_pid;
    e_dev_zn = (e_zn - error_prev_zn) / dt_pid;
    V_pid_zn = Kp_zn * e_zn + Ki_zn * error_int_zn +
Kd_zn * e_dev_zn; V_ctrl_zn = max(0, min(Voc,
V_pid_zn)); % Saturación 24V
    I_zn = max(0, (V_ctrl_zn - ke * omega_zn(k)) / (R + Rint)); F_zn =
(eta * (kt * I_zn) * i) / r;

    Fres_zn = Cr * m * g + 0.5 * rho * Af * Cd *
v_zn(k)^2;
    v_zn(k+1) = v_zn(k) + ((F_zn - Fres_zn)/m) * dt_pid;
    omega_zn(k+1) = (i * v_zn(k+1)) / r;
    error_prev_zn = e_zn; end figure;
% Dibujamos ZN en azul continuo primero
plot(time, omega_zn * (60/(2*pi)), 'b', 'LineWidth', 2.5);
hold on;
% Dibujamos el aleatorio en rojo PUNTEADO para que
se note sobre el azul

```

```
plot(time, omega_a * (60/(2*pi)), 'r--', 'LineWidth', 2.5);
plot([time(1), time(end)], [rpm_deseada, rpm_deseada],
'k--', 'LineWidth', 2);
title('Comparación de respuestas: PID aleatorio vs ZN');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (RPM)');
legend('PID Ziegler-Nichols', 'PID Aleatorio',
'Referencia (1000 RPM)', 'Location', 'southeast');
grid on;
```

Referencias

- Aadil, K. R., Bhange, K., Kumar, N. M., & Mishra, G. (2024). Keratin nanofibers in tissue engineering: bridging nature and innovation. *Deleted Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00019-6>
- Abdullah, Cai, J., Hafeez, M. A., Wang, Q., Farooq, S., Huang, Q., Tian, W., & Xiao, J. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review [Review of Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review]. *Frontiers in Nutrition*, 9. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>
- Afonso, A., Romero, A., & Monsalve, E. (2013). Public sector efficiency: Evidence for Latin America (Discussion Paper No. IDB-DP-279). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0006949>
- Alashwal, B. Y., Bala, M. S., Gupta, A., Sharma, S., & Mishra, P. (2019). Improved properties of keratin-based bioplastic film blended with microcrystalline cellulose: A comparative analysis. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 853–857. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.03.006>
- Alshehhi, J. R. M. H., Wanasingha, N., Balu, R., Mata, J., Shah, K., Dutta, N. K., & Choudhury, N. R. (2024). 3D-Printable Sustainable Bioplastics from Gluten and Keratin. *Gels*, 10(2), 136–136. <https://doi.org/10.3390/gels10020136>
- Álvarez Martínez, D. S., Jara Cobos, N. G., Reinoso Avecillas, F. Z., & Naidiuk, O. L. (2024). Mejora de la Estructura del Chasis de un Go Kart Eléctrico Mediante Análisis Numérico Computacional. XVI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2024), Concepción, Chile.
- Auditoría Superior de la Federación [ASF]. (2023). Informe general ejecutivo de la Cuenta Pública 2022. Cámara de Diputados del Congreso de la Unión. <https://www.asf.gob.mx>
- Barros, A. A., Aroso, I. M., Silva, T. H., Mano, J. F., Duarte, A. R. C., & Reis, R. L. (2014). Water and Carbon Dioxide: Green Solvents for the Extraction of Collagen/Gelatin from Marine Sponges. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(2), 254–260. <https://doi.org/10.1021/sc500621z>
- Bhaskar, R., Zo, S. M., Narayanan, K. B., Purohit, S. D., Gupta, M. K., & Han, S. S. (2023). Recent development of protein-based biopolymers in food packaging applications: A review. *Polymer Testing*, 124, 108097–108097. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108097>
- Bidegain, B. F. (2019). Queratinas de plumaje de pollo y lana de oveja: Comparativa de sus masas moleculares mediante electroforesis en gel. *Archivos de Zootecnia*, 68(263), 422–426. <https://doi.org/10.21071/az.v68i263.4203>
- Bramwell, B., & Lane, B. (2011). Critical research on the governance of tourism and sustainability. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(4–5), 411–421. <https://doi.org/10.1080/09669582.2011.580586>
- Cevallos, S. (2021). Effect of an alkaline-thermal pre-treatment and irradiation with accelerated electrons on the enzymatic obtaining of hydrolyzed keratin. 12064–12064. <https://doi.org/10.3390/mol2net-07-12064>
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M., & Ruseckaite, R. A. (2013). Physical and mechanical properties of compression molded and solution casting soybean protein concentrate based films. *Food Hydrocolloids*, 38, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.013>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2022). Perspectivas del turismo en América Latina y el Caribe: hacia una

- recuperación sostenible. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org>
- Condés, M. C., Añón, M. C., Dufresne, A., & Mauri, A. N. (2017). Composite and nanocomposite films based on amaranth biopolymers. *Food Hydrocolloids*, 74, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.013>
- Coop Abreu, R. E., Huicab García, Y., & Landero Valenzuela, K. (2018). Diagnóstico de la estructura, infraestructura y superestructura del municipio de Balancán, Tabasco como destino turístico, con enfoque en la teoría de sistemas. En E. Pérez Campuzano y V. E. Mota Flores (Coords.), *Desarrollo regional sustentable y turismo*. Universidad Nacional Autónoma de México / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5.^a ed.). SAGE Publications.
- Dąbrowska, M., Sommer, A., Sinkiewicz, I., Taraszkiewicz, A., & Staroszczyk, H. (2021). An optimal designed experiment for the alkaline hydrolysis of feather keratin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24145–24154. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17649-2>
- David, E. H. O., Curvelo, G. A. Q., & Diaz, W. A. H. (2017). Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina. 23, 82–88. <https://doi.org/10.18634/ugcj.23v.0i.767>
- de Prada, C., da Silva, E. O., Palacín, C., Vicente, A., García, Á., y Tadeo, F. (2025). Gemelo digital para operar planta de producción de tableros MDF. *Jornadas de Automática*, (46). <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12176>
- Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. MIT Press.
- Derhab, N., Mabrouk, M. E. M., El-Metwally, M. M., & Mohammed, Y. M. M. (2023). Thermostable keratinase from *Bacillus cereus* L10: optimization and some potential biotechnological applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), 29757–29773. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04887-2>
- Díaz Cordero, G. (2012). *El cambio climático. Ciencia y sociedad*.
- Dicastillo, C. L. de, Gómez-Estaca, J., López-Carballo, G., Gavara, R., & Hernández-Muñoz, P. (2023). Agro-Industrial Protein Waste and Co-Products Valorization for the Development of Bioplastics: Thermoprocessing and Characterization of Feather Keratin/Gliadin Blends. *Molecules*, 28(21), 7350–7350. <https://doi.org/10.3390/molecules28217350>
- Dicastillo, C. L. de, Gómez-Estaca, J., López-Carballo, G., Gavara, R., & Hernández-Muñoz, P. (2023). Agro-Industrial Protein Waste and Co-Products Valorization for the Development of Bioplastics: Thermoprocessing and Characterization of Feather Keratin/Gliadin Blends. *Molecules*, 28(21), 7350–7350. <https://doi.org/10.3390/molecules28217350>
- Dinu, R.-M. (2020). Macromolecular valorisation of humins, keratin and lignin through sustainable copolymers and composites. HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe). <https://theses.hal.science/tel-03505916>
- Domínguez, J., Edwards, C., & Webster, M. (2000). Vermicomposting: A process for the stabilization of organic wastes.
- Dong, Y.-Z., Chang, W.-S., & Chen, P. (2017). Characterization and overexpression of a novel keratinase from *Bacillus polyfermenticus* B4 in recombinant *Bacillus subtilis*. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0177-1>
- Dornbusch, R., Fischer, S., & Startz, R. (2009). *Macroeconomía* (10.^a ed.). McGraw-Hill.
- Elgarahy, A. M., Eloffy, M. G., Guibal, E., Alghamdi, H. M., & Elwakeel, K. Z. (2023). Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects [Review of Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 64, 292–320. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.05.018>
- Espinosa Ovando, G., Martínez de Escobar Fernández, A., Rodríguez Ocaña, M. A., Martínez Prats, G., & Gaitán Espinosa, M. (2023). *El Tren*

- Maya, repercusiones socioeconómicas, sustentables y competitivas - turística del Sureste Mexicano. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 1809–1830. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.718>
- Félix, M., Martínez, I., Romero, A., Partal, P., & Guerrero, A. (2017). Effect of pH and nanoclay content on the morphology and physicochemical properties of soy protein/montmorillonite nanocomposite obtained by extrusion. *Composites Part B Engineering*, 140, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.040>
- Fernández-d'Arlas, B. (2019). Tough and Functional Cross-linked Bioplastics from Sheep Wool Keratin. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51393-5>
- Fonatur. (2023). Tren Maya: informe de avance físico y financiero. Fondo Nacional de Fomento al Turismo. <https://www.gob.mx/fonatur>
- Fondo Monetario Internacional [FMI]. (2020). Well spent: How strong infrastructure governance can end waste in public investment. <https://doi.org/10.5089/9781513511818.071>
- Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2011). The structural basis of the filament–matrix texture in the avian/reptilian group of hard β -keratins. *Journal of Structural Biology*, 173(2), 391–405. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.10.005>
- Gaonkar, S. K., & Furtado, I. (2022). Valorization of Recalcitrant Feather-waste by Extreme Microbes (pp. 183–225). <https://doi.org/10.1201/9781003187684-8>
- García-López, D. (2025). Evaluación de dos fuentes orgánicas (humus de lombriz y excretas de *Zophobas morio*) en la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Tecnología en Marcha*, 38(3), 45–53.
- García-López, D. (2025). Pequeños habitantes del suelo: las lombrices, ingenieras del suelo. *Voces del Suelo*.
- Gobierno de México. (2023). Tren Maya: presentación general del proyecto. Presidencia de la República. <https://www.gob.mx/trenmaya>
- Goda, D. A., Bassiouny, A., Monem, N. M. A., Soliman, N. A., & Abdel-Fattah, Y. R. (2021). Feather protein lysate optimization and feather meal formation using YNDH protease with keratinolytic activity afterward enzyme partial purification and characterization. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93279-5>
- González-López, M. E., Calva-Estrada, S. de J., Gradilla-Hernández, M. S., & Barajas-Álvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: a review [Review of Current trends in biopolymers for food packaging: a review]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371>
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review [Review of Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review]. *European Polymer Journal*, 72, 365–385. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>
- Gutiérrez-Chávez, A., y Hernández-Huerta, J. (2025). Empaques hechos de hongos: Una alternativa ecológica al poliestireno. *Revista de divulgación científica iBIO*, 7(1), 203–203. <https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/203>
- Haro Velasteguí, A., Borja Arévalo, A., y Triviño Bloisse, S. (2017). Analysis on the use of banana waste, as raw material for the production of biodegradable plastic materials. *Dominio Las Cienc*, 3, 506–525.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill.
- Hood, C. (1991). A public management for all seasons? *Public Administration*, 69(1), 3–19. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9299.1991.tb00779.x>

<https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). En México, 69.8 % de los hogares tienen al menos una mascota (Comunicado de prensa núm. 702/21). <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/7021>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2023). Cuenta Satélite del Turismo de México 2022. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

Ishara, G. K. K., Koliyabandara, P. A., y Samarakoon, G. (2024). Eco-friendly bio-composite sheets: a study on the utilization of banana peels, cassava starch, and banana stem fibers. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1410986. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1410986>

Izquierdo, A., Pessino, C., & Vuletin, G. (Eds.). (2018). Mejor gasto para mejores vidas: Cómo América Latina y el Caribe puede hacer más con menos. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0001217-es>

Jafarzadeh, S., Nooshkam, M., Zargar, M., Garavand, F., Ghosh, S., Hadidi, M., & Forough, M. (2023). Green synthesis of nanomaterials for smart biopolymer packaging: challenges and outlooks. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 14(2), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s40097-023-00527-3>

Jumaidin, R., Diah, N. A., Ilyas, R. A., Alamjuri, R. H., y Yusof, F. A. M. (2021). Processing and characterisation of banana leaf fibre reinforced thermoplastic cassava starch composites. *Polymers*, 13(9), 1420. <https://doi.org/10.3390/polym13091420>

Keynes, J. M. (2003). Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero (J. de Azcárate Flórez, Trad.). Fondo de Cultura Económica. (Obra original publicada en 1936)

Łaba, W., Żarowska, B., Chorążyk, D., Pudło, A., Piegza, M., Kancelista, A., & Kopeć, W. (2018). New keratinolytic bacteria in valorization of chicken feather waste. *AMB*

Express, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0538-y>

Landero Valenzuela, K., Huicab García, Y., & Coop Abreu, R. E. (2024). Percepción del visitante en el desarrollo de prácticas sustentables y sostenibles en las comunidades rurales de Balancán, Tabasco que cuentan con recursos turísticos. En P. Wong González y V. E. Mota Flores (Coords.), *Nuevas dinámicas internacionales y reconfiguración regional del turismo* (pp. 317–330). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional.

Latza, V. M., Guerette, P. A., Ding, D. W., Amini, S., Kumar, A., Schmidt, I., Keating, S., Oxman, N., Weaver, J. C., Fratzl, P., Miserez, A., & Mašić, A. (2015). Multi-scale thermal stability of a hard thermoplastic protein-based material. *Nature Communications*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms9313>

Li, Q. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste [Review of Progress in Microbial Degradation of Feather Waste]. *Frontiers in Microbiology*, 10. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>

Li, Q. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste [Review of Progress in Microbial Degradation of Feather Waste]. *Frontiers in Microbiology*, 10. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>

Li, Q. (2021). Structure, Application, and Biochemistry of Microbial Keratinases [Review of Structure, Application, and Biochemistry of Microbial Keratinases]. *Frontiers in Microbiology*, 12. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.674345>

Liu, S., Yu, J., Gan, Y., Qiu, X., Gao, Z.-C., Wang, H., Chen, S., Xiong, Y., Liu, G., Lin, S., McCarthy, A., John, J. V., Wei, D., & Hou, H. (2023). Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis methods, recent advances, and emerging applications [Review of Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis

- methods, recent advances, and emerging applications]. *Military Medical Research*, 10(1). BioMed Central. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00448-w>
- Lizundia, E., Sipponen, M. H., Greca, L. G., Balakshin, M., Tardy, B. L., Rojas, O. J., & Puglia, D. (2021). Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids [Review of Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids]. *Green Chemistry*, 23(18), 6698–6760. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1gc01684a>
- Loja, G. M., Celi, B. A. M., Galvan, D. S., & Rodriguez, J. P. (2016). Queratina a partir de la hidrólisis enzimática de harina de plumas de pollo, utilizando queratinasas producidas por *Bacillus subtilis* / Getting keratin from feather meal using keratinases produced by *Bacillus subtilis*. *Ciencia Unemi*, 9(20), 50–58. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol9iss20.2016pp50-58p>
- Loja, M., & Jacqueline, G. (2015). Obtención de queratina a partir de plumas de pollo, utilizando queratinasas producidas por *Bacillus* spp. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/2829>
- López, J., & García, M. (2020). Prototipos vehiculares como estrategia de aprendizaje en ingeniería mecánica. *Revista Iberoamericana de Tecnología*, 15(2), 45–58.
- Maisarah, S., et al. (2022). Vermicomposting as a sustainable approach for organic waste recycling.
- Maity, T. K., Singh, N., Vaghela, P., Ghosh, A., Singh, S., Shinde, P. B., Sequeira, R. A., & Prasad, K. (2022). Efficient isolation of keratin from protein-rich waste biomass: a practical approach to minimize environmental impact and valorize waste biomass. *Sustainable Environment Research*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00152-9>
- Maurya, S. D., & Singh, A. (2023). Application and Future Perspectives of Keratin Protein Extracted from Waste Chicken Feather: A Review [Review of Application and Future Perspectives of Keratin Protein Extracted from Waste Chicken Feather: A Review]. *Sustainable Chemical Engineering*, 32–46. <https://doi.org/10.37256/sce.5120243521>
- Mekonnen, T. H., Mussone, P., Khalil, H., & Bressler, D. C. (2013). Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(43), 13379–13379. <https://doi.org/10.1039/c3ta12555f>
- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú [MEF]. (2019). Directiva general del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones. MEF. <https://www.mef.gob.pe>
- Mitantsoa, J. T., Ravelonandro, P. H., Andrianony, F. A., y Andrianaivoravelona, R. R. (2023). Elaboration and characterization of bioplastic films based on bitter cassava starch (*Manihot esculenta*) reinforced by chitosan extracted from crab (*Scylla seratta*) shells. *arXiv preprint arXiv:2310.15172*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.15172>
- Muñoz, J. C., & Herrera, D. (2021). Sistemas de control aplicados a vehículos eléctricos. *Revista de Ingeniería y Automatización*, 45–60.
- Murray, I. (2020). Capitalismo y turismo en España: del “milagro económico” a la “gran crisis” (2.^a ed.). Alba Sud Editorial.
- Nnolim, N. E., & Nwodo, U. U. (2020). *Bacillus* sp. CSK2 produced thermostable alkaline keratinase using agro-wastes: keratinolytic enzyme characterization. *BMC Biotechnology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12896-020-00659-2>
- Nuutinen, E.-M., Virtanen, T., Lantto, R., Vähä-Nissi, M., & Jääskeläinen, A.-S. (2021). Ductile keratin films from deep eutectic solvent-fractionated feathers. *RSC Advances*, 11(44), 27512–27522. <https://doi.org/10.1039/d1ra05123g>
- Organización Mundial del Turismo [OMT]. (2023). World Tourism Barometer, 21(1). OMT. <https://doi.org/10.18111/wtobarometereng>
- Orjuela-Palacio, J. M., & Zaritzky, N. (2023). Esponjas de queratina con capacidad de sorción de hidrocarburos, obtenidas a partir de residuos de la industria avícola. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1).

- https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2830
- Osborne, D., & Gaebler, T. (1992). *Reinventing government: How the entrepreneurial spirit is transforming the public sector*. Addison-Wesley.
- Perdana, S. S. P., Kusumawati, N., Basukiwardojo, M. M. S., Setiarso, P., Djalilah, G. N., & Rahmawati, K. (2025). The Effect of Ultrasonication on the Quality of Keratin Extraction Based on Ionic Liquid from Duck Feather. *Communications in Science and Technology*, 10(2), 267–275. <https://doi.org/10.21924/cst.10.2.2025.1785>
- Pérez, M. J., Moreno, M. A., Martínez-Abad, A., Cattaneo, F., Zampini, C., Isla, M. I., López-Rubio, A., & Fabra, M. J. (2020). Interest of black carob extract for the development of active biopolymer films for cheese preservation. *Food Hydrocolloids*, 113, 106436–106436. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106436>
- Perroux, F. (1955). Note sur la notion de pôle de croissance. *Économie Appliquée*, 8(1–2), 307–320.
- Perța-Crișan, S., Ursachi, C., Ștefan, Gavrilăș, S., Oancea, F., & Munteanu, F. (2021). Closing the Loop with Keratin-Rich Fibrous Materials. *Polymers*, 13(11), 1896–1896. <https://doi.org/10.3390/polym13111896>
- Piekarski, C. M., de Francisco, A. C., da Luz, L. M., Kovalski, J. L., y Silva, D. A. L. (2017). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>
- Polesca, C., Ghatta, A. A., Passos, H., Coutinho, J. A. P., Hallett, J. P., & Freire, M. G. (2023). Sustainable keratin recovery process using a bio-based ionic liquid aqueous solution and its techno-economic assessment. *Green Chemistry*, 25(10), 3995–4003. <https://doi.org/10.1039/d3gc00850a>
- Polesca, C., Ghatta, A. A., Passos, H., Coutinho, J. A. P., Hallett, J. P., & Freire, M. G. (2023). Sustainable keratin recovery process using a bio-based ionic liquid aqueous solution and its techno-economic assessment. *Green Chemistry*, 25(10), 3995–4003. <https://doi.org/10.1039/d3gc00850a>
- Polesca, C., Passos, H., Nakasu, P. Y. S., Coutinho, J. A. P., Freire, M. G., & Hallett, J. P. (2024). Ionic-liquid-processed keratin-based biocomposite films with cellulose and chitin for sustainable dye removal. *RSC Sustainability*, 2(8), 2239–2248. <https://doi.org/10.1039/d4su00179f>
- Qamar, S. A., Asgher, M., & Khalid, N. (2020). *Bioinspired Nanocomposites: Functional Materials for Sustainable Greener Technologies*. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92876>
- Qin, X., Yang, C., Guo, Y., Liu, J., Bitter, J. H., Scott, E. L., & Zhang, C. (2023). Effect of ultrasound on keratin valorization from chicken feather waste: Process optimization and keratin characterization. *Socio-Environmental Systems Modeling*, 93, 106297–106297. <https://doi.org/10.1016/j.jultsonch.2023.106297>
- Rahimnahal, S., Meimandipour, A., Fayazi, J., Karkhane, A. A., Shamsara, M., Nassiri, M. B., Mirzaei, H., Hamblin, M. R., Tarrahimofrad, H., Bakherad, H., Zamani, J., & Mohammadi, Y. (2023). Biochemical and molecular characterization of novel keratinolytic protease from *Bacillus licheniformis* (KRLr1). *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1132760>
- Rajabinejad, H., Zoccola, M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Rovero, G., & Tonin, C. (2017). Physicochemical properties of keratin extracted from wool by various methods. *Textile Research Journal*, 88(21), 2415–2424. <https://doi.org/10.1177/0040517517723028>
- Rajaram, A., Le, T. M., Biletska, N., & Brumby, J. (2014). A unified framework for public investment management. In A. Rajaram, T. M. Le, K. Kaiser, J.-H. Kim y J. Frank (Eds.), *The power of public investment management: Transforming resources into assets for growth* (pp. 19–39). World Bank.

- https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0316-1_ch2
- Raydan, N. D. V., Loquet, A., Habenstein, B., Kauffmann, B., Châtel, G., & Robles, E. (2025). Ultrasound-Assisted alkaline hydrolysis of feather keratin using a cup horn sonoreactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 124, 107733–107733. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107733>
- Sánchez-Olivares, G., Medina-Torres, L., Calderas-García, F., Sánchez-Solís, A., Leonardo-Moreno, R., Ramírez, V. Q., & Manero-Brito, O. (2017). Efecto de la biofibra de queratina en las propiedades de un biopolímero termoplástico: Estudio preliminar. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(4), 369–378. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n4.032>
- Sánchez-Zuñiga, J. V., Sánchez-Molina, J., y Florez-Vargas, A. O. (2020). Caracterización de los residuos de la cosecha del plátano harton para un potencial uso industrial. Characterization of the residues from the harvest of the harton banana for potential industrial use. *Revista AIBI*, 8(3), e821. <https://doi.org/10.15649/2346030X.821>
- Sassen, S. (2020). *La ciudad global: Nueva York, Londres, Tokio* (2.^a ed.). Katz Editores.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público [SHCP]. (2022). Lineamientos para la evaluación de programas y proyectos de inversión. SHCP. <https://www.hacienda.gob.mx>
- Secretaría de Turismo del Estado de Tabasco [SECTUR Tabasco]. (2022). Plan Estatal de Desarrollo Turístico 2019–2024. Gobierno del Estado de Tabasco.
- Sharma, I., Pranaw, K., Soni, H., Rawat, H. K., & Kango, N. (2022). Parametrically optimized feather degradation by *Bacillus velezensis* NCIM 5802 and delineation of keratin hydrolysis by multi-scale analysis for poultry waste management. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21351-9>
- Sharma, S., et al. (2005). Earthworms in waste management and sustainable agriculture.
- Shavandi, A., Jafari, H., Zago, E., Hobbi, P., Nie, L., & Laet, N. D. (2021). A sustainable solvent based on lactic acid and l-cysteine for the regeneration of keratin from waste wool. *Green Chemistry*, 23(3), 1171–1174. <https://doi.org/10.1039/d0gc04314a>
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Bekhit, A. E. A. (2017). Keratin: dissolution, extraction and biomedical application [Review of Keratin: dissolution, extraction and biomedical application]. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c7bm00411g>
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Bekhit, A. E. D. A. (2017). Keratin: Dissolution, extraction and biomedical application. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735. <https://doi.org/10.1039/C7BM00411G>
- Shigley, J., & Budynas, R. G. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Sinche-Serra, M. V., Orellana, G., Coronel, S. R. C., Vera-Calle, E. R., Jentzsch, P. V., & Castillo-Domínguez, J. P. (2025). Production of keratin hydrolysates from irradiated chicken feathers via chemical and enzymatic treatments. *CyTA - Journal of Food*, 23(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2547835>
- Singh, R. K., & Kumar, V. (2021). Steady-state propagation of a Mode III crack in couple stress elastic materials. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 61, 112–128. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2012.06.015
- Sivakumar, A. A., Canales, C., Roco-Videla, Á., y Chávez, M. (2022). Development of thermoplastic cassava starch composites with banana leaf fibre. *Sustainability*, 14(19), 12732. <https://doi.org/10.3390/su141912732>
- Škerget, M., Čolnik, M., Zemljič, L. F., Gradišnik, L., Semren, T. Ž., Lovaković, B. T., & Maver, U. (2023). Efficient and Green Isolation of Keratin from Poultry Feathers by Subcritical Water. *Polymers*, 15(12), 2658–2658. <https://doi.org/10.3390/polym15122658>
- Tardy, B. L., Mattos, B. D., Otoni, C. G., Beaumont, M., Majoinen, J., Kämäräinen, T., & Rojas, O. J.

- (2021). Deconstruction and Reassembly of Renewable Polymers and Biocolloids into Next Generation Structured Materials. *Aaltodoc* (Aalto University), 121(22), 14088–14188. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01333>
- Tavares, L., Souza, H. K. S., Gonçalves, M. P., & Rocha, C. M. R. (2020). Physicochemical and microstructural properties of composite edible film obtained by complex coacervation between chitosan and whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 113, 106471–106471. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106471>
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of chemical properties. *Waste Management*, 68, 626–635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.050>
- Tinoco, A., Rodrigues, R. M., Machado, R., Pereira, R. N., Cavaco-Paulo, A., & Ribeiro, A. (2020). Ohmic heating as an innovative approach for the production of keratin films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 671–680. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.122>
- Tissera, N. D., Wijesena, R. N., Ludowyke, N., Priyadarshana, G., Dahanayake, D., Silva, R. M. de, & Silva, K. M. N. de. (2024). Keratin protein nanofibers from merino wool yarn: a top-down approach for the disintegration of hierarchical wool architecture to extract α -keratin protein nanofibers. *RSC Advances*, 14(10), 6793–6804. <https://doi.org/10.1039/d3ra07063h>
- Tomadoni, B., Capello, C., Valencia, G. A., & Gutiérrez, T. J. (2020). Self-assembled proteins for food applications: A review [Review of Self-assembled proteins for food applications: A review]. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 1–16. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.015>
- Vanderlei, R. M., Novo-Mansur, M. T. M., Mattoso, L. H. C., & Moreira, F. K. V. (2024). Effect of precipitation methods on physicochemical properties of keratin films produced from chicken feather waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(34). <https://doi.org/10.1002/app.55863>
- Vásquez-Dávila, S., y Bravo-Benavides, D. (2023). Impacto del cambio climático en la producción agrícola de la provincia de Loja, periodo 2007-2020. *Revista Económica*, 11(1), 93-103. <https://doi.org/10.54753/rve.v11i1.1623>
- Verbeek, C. J. R., & Berg, L. E. van den. (2009b). Extrusion Processing and Properties of Protein-Based Thermoplastics. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295(1), 10–21. <https://doi.org/10.1002/mame.200900167>
- Verdnik, A., Čolnik, M., Knez, Ž., & Škerget, M. (2021). Isolation of Keratin from Waste Wool Using Hydrothermal Processes. *Acta Chimica Slovenica*, 68(2), 433–440. <https://doi.org/10.17344/acsi.2020.6538>
- Vidmar, B., & Vodovnik, M. (2018). Microbial keratinases: enzymes with promising biotechnological 4 applications [Review of Microbial keratinases: enzymes with promising biotechnological 4 applications]. *Food Technology and Biotechnology*, 56(3). University of Zagreb. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5658>
- Villegas-Cornelio, V., & Laines-Canepa, J. (2017). Vermicompostaje. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229–318. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
- Wong, J. Y. (2022). *Theory of Ground Vehicles* (5th ed.). Wiley.
- Wu, J., Cai, L., & Weitz, D. A. (2017). Tough Self-Healing Elastomers by Molecular Enforced Integration of Covalent and Reversible Networks. *Advanced Materials*, 29(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201702616>
- Wu, W., Chen, M.-Y., Tu, I., Lin, Y., Nadendla, E. K., Chen, M., Ho, M., & Wu, S. (2017). The discovery of novel heat-stable keratinases from *Meiothermus taiwanensis* WR-220 and other extremophiles. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04723-4>

- Xu, C., Nasrollahzadeh, M., Selva, M., Issaabadi, Z., & Luque, R. (2019). Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials [Review of Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials]. *Chemical Society Reviews*, 48(18), 4791–4822. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8cs00543e>
- Yin, X., & Woo, M. W. (2024). Recent advances in keratin-based biocomposites and sustainable materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 9(2), 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.12.003>
- Yin, Y., & Woo, M. W. (2024). Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives. *Sustainable Food Technology*, 2(3), 548–566. <https://doi.org/10.1039/d4fb00028e>
- Yong, B., Fei, X., Shao, H., Xu, P., Hu, Y., Ni, W., Xiao, Q., Tao, X., He, X., & Feng, H. (2020). Recombinant expression and biochemical characterization of a novel keratinase BsKER71 from feather degrading bacterium *Bacillus subtilis* S1-4. *AMB Express*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0939-6>
- Zhao, X. (2013). Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: building dissipation into stretchy networks [Review of Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: building dissipation into stretchy networks]. *Soft Matter*, 10(5), 672–687. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c3sm52272e>
- Zhou, B., Guo, Y., Xue, Y., Ji, X., & Huang, Y. (2023). Comprehensive insights into the mechanism of keratin degradation and exploitation of keratinase to enhance the bioaccessibility of soybean protein. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02426-9>
- Zhou, X., Guo, B., Zhang, L., & Hu, G. (2017). Progress in bio-inspired sacrificial bonds in artificial polymeric materials. *Chemical Society Reviews*, 46(20), 6301–6329. <https://doi.org/10.1039/c7cs00276a>
- Zorn, E., & Farthing, L. (2007). Communitarian tourism: Hosts and mediators in Peru. *Annals of*

Tourism Research, 34(3), 673–689. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2007.02.002>

Currículo corto de los autores

Angel David Flores Torres - Ingeniero Electrónico- Instituto Tecnológico de Puebla 2015. Maestro en Ingeniería en Electrónica-Instituto Tecnológico de Puebla 2019. Contacto: angeld.ft@libres.tecnm.mx

Román Pérez Saldaña - Ingeniero Electrónico- Instituto Tecnológico de Apizaco 2009. Maestro en Ciencias de la Ingeniería Electrónica-Centro Nacional de Investigación Tecnológica -2013

Alan Tadeo Hernandez Aguiña- Estudiante- Instituto Tecnológico Superior de Libres