

TRANSVERSALIDAD CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Volumen 10, Número 1 | Enero - Junio 2026

ISSN:2448-895X

Revista de la Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica





Transversalidad Científica y Tecnológica
Volumen 10, Número 1
2026

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Fabio Felipe Chalé Lara
Dr. Ricardo García Alamilla
Mtra. Carla Patricia Sandoval Galiana
Dr. Rogelio Ortega Izaguirre
Dr. Ulises Páramo García
Dr. Josué Francisco Pérez Sánchez

COORDINACIÓN EDITORIAL

Mtra. Carla Patricia Sandoval Galiana

DISEÑO EDITORIAL

Dr. Josué Francisco Pérez Sánchez

PORTADA

Ignacio Sebastián Chalé Puch

Transversalidad Científica y Tecnológica, año 10, No. 1, enero - junio 2026, es una publicación semestral editada por la Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Convento de Acolman #136 Fracc. Campanario Residencial Altamira, Tamaulipas, México, C.P. 89607, atictac.official@gmail.com. Editor Responsable: Dr. Josué Francisco Pérez Sánchez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2025-100214473900-102, ISSN: 2448-895X, otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Número de certificado de Licitud de Título y Contenido: 17705. Imprenta: GROPE, Calle Río Álamo 2571, El Rosario, Guadalajara, Jalisco, C.P. 44890. Distribuidor: Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.



Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Esta revista es publicada por la Academia Tamaulipeca de
Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (ATICTAC)

Los artículos publicados son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la opinión de la ATICTAC. El material publicado en esta revista puede reproducirse total o parcialmente siempre y cuando cuente con la autorización extendida por escrito de los autores de este y se mencione la fuente original.

CONTENIDO

	Página
Detección de incendios forestales mediante Inteligencia Artificial	1
Evaluación del índice triglicéridos/glucosa en adolescentes del sur de Tamaulipas	8
Factores de riesgo psicosocial en docentes de ingeniería industrial	18
Sistema inteligente para la detección de incendios domésticos	23
Sistema IoT en tiempo real para monitoreo de contaminación en cuerpos de agua	30
Evaluación de métodos de extracción de celulosa: convencional y asistido por ultrasonido para la síntesis de hidrogeles	37
Sistema inteligente para el conteo y clasificación de madurez del agave mediante visión por computadora y drones	44
Transformación de mezclas de sargazo (<i>Sargassum spp.</i>) y lirio acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>) en azúcares fermentables mediante hidrólisis alcalina y enzimática	52
Obtención de líquidos iónicos derivados del imidazol y su posible aplicación en sistemas electroquímicos	61

Detección de incendios forestales mediante Inteligencia Artificial

Ordoñez González, Brayan¹; Pineda Arizmendi, María Guadalupe^{1,2}; Brito González, Omar¹

¹Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-La Marquesa km 22, Santiago Tilapa, Tianguistenco, Estado de México

²Universidad Autónoma del Estado de México, Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapán, 52640, Santiago Tianguistenco, Estado de México

*Autor de correspondencia: mariaguadalupe.pineda.arizmendi@gmail.com

RESUMEN

Los incendios forestales representan una amenaza creciente para la biodiversidad, la economía y la salud pública. En México, en 2024 se quemaron 1 672 216 hectáreas. Los métodos tradicionales de detección (patrullajes, satélites, torres) tienen limitaciones de tiempo de respuesta. Este trabajo describe la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real que integra inteligencia artificial y tecnologías IoT. Se construyó una estación meteorológica autónoma con ESP32, sensores DHT11, anemómetro y sensor de flama IR, alimentada con panel solar. Los datos se transmiten vía Wi-Fi a Google Sheets; mediante Google Apps Script se activan alertas SMS (Twilio) cuando la temperatura supera 35 °C. Paralelamente, se entrenó una red neuronal convolucional YOLOv5 con 2 280 imágenes etiquetadas (fuego/no fuego, y tipo de incendio: superficial, subterráneo, copa). Una plataforma web desarrollada en Streamlit permite el monitoreo remoto y la clasificación. El modelo alcanzó una mAP@0.5 del 98 % y las alertas SMS se emitieron en menos de 10 segundos. El sistema valida la hipótesis de que la combinación de IoT y CNN mejora la detección temprana frente a métodos tradicionales.

Palabras clave: incendios forestales, IoT, YOLOv5, detección temprana, redes neuronales convolucionales

ABSTRACT

Forest fires represent a growing threat to biodiversity, economy, and public health. In Mexico, 1 672 216 hectares were burned in 2024. Traditional detection methods (ground patrols, satellites, watchtowers) have response time limitations. This paper describes the implementation of a real-time monitoring system integrating artificial intelligence and IoT technologies. An autonomous weather station was built with an ESP32, DHT11 sensors, anemometer, and IR flame sensor, powered by a solar panel. Data are transmitted via Wi-Fi to Google Sheets; Google Apps Script triggers SMS alerts (Twilio) when the temperature exceeds 35 °C. In parallel, a YOLOv5 convolutional neural network was trained with 2 280 labelled images (fire / no fire, and fire type: surface, underground, canopy). A web platform developed in Streamlit allows remote monitoring and classification. The model achieved an mAP@0.5 of 98 % and SMS alerts were issued in less than 10 seconds. The system validates the hypothesis that combining IoT and CNNs improves early detection over traditional methods.

Keywords: forest fires, IoT, YOLOv5, early detection, convolutional neural networks

1. Introducción

Los incendios forestales se han convertido en uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, afectando gravemente la biodiversidad, los recursos naturales y las comunidades cercanas a zonas boscosas. En México, La Comisión Nacional Forestal [1], reportó que en 2023 hubo una superficie afectada superior a 560 000 hectáreas, y en 2024 la cifra ascendió a 1 672 216 hectáreas afectadas por 8 002 incendios. En el municipio de Tianguistenco, Estado de México, los incendios superficiales son recurrentes entre marzo y junio, cuando las temperaturas son altas y los pastores realizan quemas no controladas.

Los métodos tradicionales de detección incluyen patrullajes terrestres, torres de vigilancia y análisis de imágenes satelitales. Sin embargo, todos presentan limitaciones: los satélites tienen baja resolución temporal (pueden tardar horas en pasar sobre un área), los patrullajes cubren superficies reducidas y las torres de vigilancia dependen de la observación humana, propensa a la fatiga y a los errores. En consecuencia, los incendios suelen detectarse cuando ya han alcanzado una extensión considerable, lo que dificulta su control y aumenta los daños ecológicos y económicos.

En este contexto, la inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta relevante para el análisis automático de información. A través del aprendizaje automático y, en particular, del aprendizaje profundo, es posible desarrollar sistemas capaces de identificar patrones a partir de grandes volúmenes de datos, como imágenes digitales. Dentro del aprendizaje profundo, las redes neuronales convolucionales (CNN) se han consolidado como una de las arquitecturas más utilizadas en visión por computadora. Por otro lado, el Internet de las cosas (IoT) permite la integración de sensores de bajo costo que miden

variables ambientales y transmiten datos a la nube. La combinación de ambas tecnologías ofrece una oportunidad única para desarrollar sistemas autónomos, rápidos y confiables de detección temprana.

Trabajos previos han explorado esta dirección. En el caso de Aliaga [2], se propuso un sistema con visión artificial y hardware de bajo consumo, que generaba alertas en tiempo real, pero sin integrar sensores ambientales. En el trabajo de Fernández [3], se diseñó un sistema de predicción con YOLOv8, obteniendo puntuaciones F1 de hasta 0.90, pero basado exclusivamente en imágenes públicas. El autor León Castillo [4], desarrolló una aplicación con MobileNetV2 alcanzando precisiones del 87-92 %, sin componentes IoT. Ninguno de estos estudios combinó una estación meteorológica autónoma con un modelo CNN para confirmación visual y clasificación del tipo de incendio. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar e implementar un sistema de detección temprana que integre (1) una estación meteorológica inteligente con ESP32 y sensores, (2) una red neuronal convolucional utilizando el modelo YOLOv5 entrenada para clasificar imágenes de incendios y (3) una plataforma web con monitoreo remoto y alertas automáticas por SMS.

2. Metodología

Se adoptó la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), que consta de seis etapas: comprensión del negocio, comprensión de los datos, preparación de los datos, modelado, evaluación e implementación [5]. A continuación, se describen las fases adaptadas al contexto de detección de incendios forestales, como se muestra en la Figura 1.

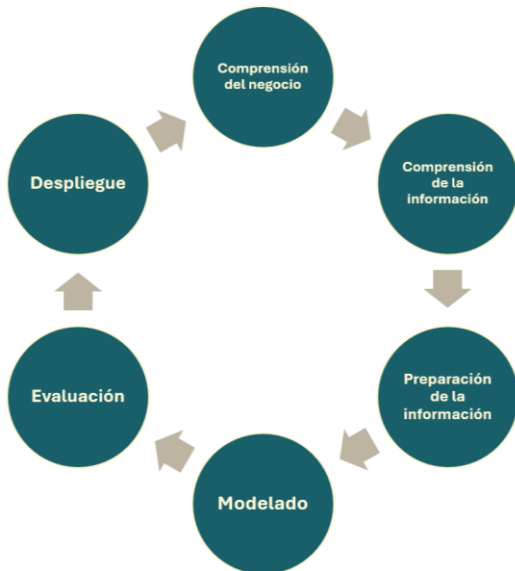


Figura 1. Diagrama de las fases del método CRISP-DM

Etapa 1. Comprensión del negocio

Se implementó un prototipo con sensores IoT que capturan datos históricos de temperatura para pronósticos de temperaturas altas.

Etapa 2. Comprensión de los datos

Se recolectaron imágenes de incendios forestales en escenarios con fuego y sin fuego dirigidos por la Brigada de Incendios Forestales y Probosque del Ayuntamiento de Tianguistenco durante una prueba de fuego controlada. Asimismo, se monitorearon mediante el módulo IoT, se analizaron los rangos de operación de los sensores.

Etapa 3. Preparación de los datos

Las imágenes se etiquetaron con la plataforma RoboFlow en formato YOLOv5 y se dividieron en conjuntos de entrenamiento (70 %), validación (20 %) y prueba (10 %). La Tabla 1 muestra las métricas obtenidas en función del tamaño del conjunto de datos. Con 2 280 imágenes se alcanzó una precisión de 0.968, sensibilidad de 0.939, mAP@0.5 de 0.980 y F1-score de 0.950. La Prueba 3 corresponde al modelo final implementado.

Tabla 1. Métricas de rendimiento de YOLOv5s en función del tamaño del conjunto de datos.

Prueba	No. de imágenes	Precisión	Sensibilidad	mAP @ 0.5*	F1-score
1	10	0.948	0.995	0.973	0.950
2	210	0.979	0.925	0.970	0.968
3	2,280	0.968	0.939	0.980	0.950

*mAP@0.5: mean Average Precision con IoU=0.5

Etapa 4. Modelado (red neuronal YOLOv5)

Se seleccionó YOLOv5s (You Only Look Once version 5 small), con 7.2 millones de parámetros distribuidos en 157 capas [10]. El entrenamiento se realizó en Google Colab con GPU T4, tamaño de imagen 640×640 píxeles, batch 16, 50 épocas, optimizador SGD con momentum 0.937 y tasa de aprendizaje inicial 0.01. Se aplicó aumento de datos (rotación, escalado, volteo horizontal, ajuste de brillo y contraste).

Etapa 5. Evaluación (almacenamiento en la nube y alertas SMS)

Se creó una hoja de cálculo en Google Sheets que actúa como transmisor de datos. Mediante Google Apps Script se

desarrolló un servicio web doGet(e) que recibe parámetros del ESP32, registra la fecha y la hora y evalúa dos condiciones: si la temperatura > 35 °C o si la presencia de fuego == 1, entonces se envía una petición a la API de Twilio para enviar un SMS a un número autorizado, como la Brigada de Incendios Forestales y Provosque del Ayuntamiento; asimismo, se emiten coordenadas.

En la Prueba 1 con solo 10 imágenes, la precisión fue alta, pero el modelo estaba claramente sobreajustado con una sensibilidad casi perfecta, pero solo funcionaba para esas imágenes concretas. En la Prueba 2, con 210 imágenes, la precisión aumentó a 0.979, pero la sensibilidad descendió a 0.925,

indicando que el modelo se volvió más conservador, por lo que hubo menos falsos positivos, pero más falsos negativos. Finalmente, con 2,280 imágenes. Y en la prueba 3, se alcanzó un equilibrio óptimo: precisión 0.968, sensibilidad 0.939 y mAP del 98%. La puntuación F1 de 0.95 confirma la buena capacidad de generalización del modelo.

Etapas 6. Implementación (desarrollo de la plataforma web)

La aplicación web se desarrolló con Streamlit (Python). Funcionalidades:

conexión a Google Sheets, visualización en tiempo real de temperatura y humedad, gráfico histórico, carga de imágenes, inferencia con YOLOv5 mostrando cajas delimitadoras y confianza, clasificación del tipo de incendio según área relativa de las cajas (<1 % subterráneo, 1-10 % superficial, >10 % copa), activación de cámara web y descarga de datos en CSV, como se muestra en ejecución en la figura 2.

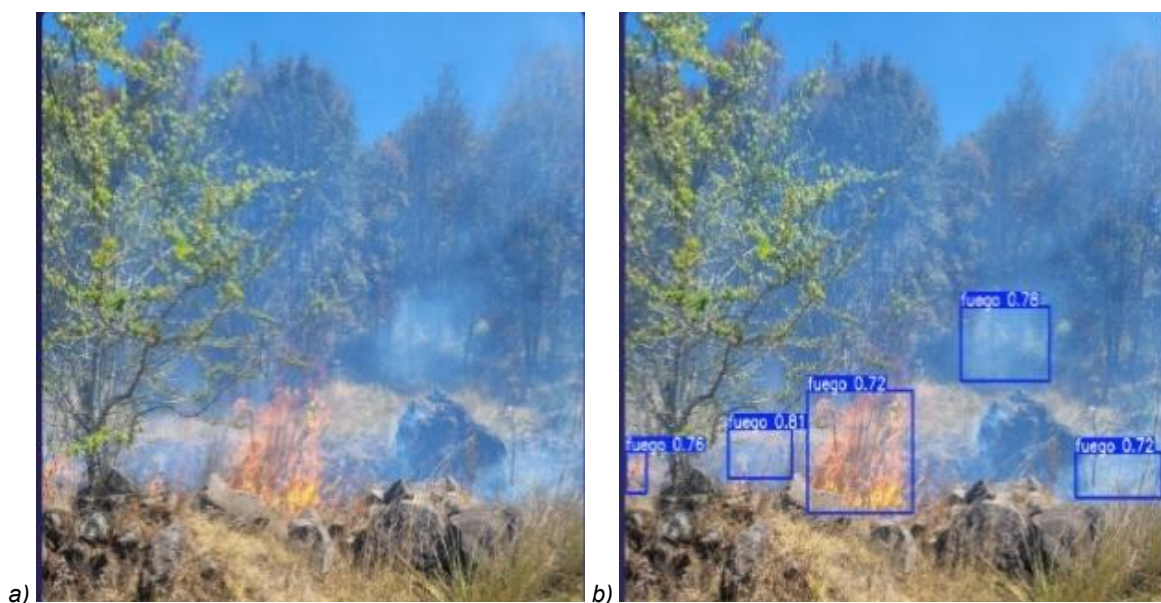


Figura 2. Ejecución de la IA encontrando incendios: a) imagen original y b) detección de fuego.

Se realizaron pruebas de laboratorio (estímulos térmicos controlados con encendedor a 10, 20 y 30 cm; fuente de calor a 50 °C) y pruebas en campo (quema controlada en pastizal de Tinguistenco durante 4 horas, con registro de variables y captura de imágenes con dron DJI Mini 3).

2.1. Clasificación del tipo de incendio

El algoritmo de clasificación basado en el área relativa de las cajas delimitadoras mostró una concordancia del 92% con la clasificación realizada por un ecólogo experto sobre un conjunto de 50 imágenes de prueba. Los errores se

produjeron principalmente en imágenes con fuego muy difuso o con llamas que abarcaban múltiples estratos. En esos casos, el sistema tendió a subestimar el tipo y clasificó como superficial cuando debía ser de copa incipiente. No obstante, la clasificación resultó útil para fines de alerta temprana, ya que incluso un incendio superficial mal clasificado sigue siendo una alerta válida.

3. Resultados y discusión

3.1. Integración y respuesta del sistema completo

Durante la prueba de campo en la quema prescrita, el sistema funcionó de la

siguiente manera: la temperatura ambiente subió de 24°C a 38°C en los primeros 10 minutos de la quema; el sensor de flama IR se activó casi inmediatamente al iniciar la quema; los datos se enviaron a Google Sheets cada 5 segundos; al superar los 35°C.

El script de Apps Script envió un SMS al número registrado; la primera alerta llegó 9 segundos después de la primera lectura que superó el umbral; paralelamente, un operador cargó una imagen tomada con el dron en la plataforma web; el modelo YOLOv5 detectó fuego con un 96% de confianza y clasificó el incendio como superficial en un área relativa 4.2%; la interfaz web mostró la imagen con las cajas delimitadoras y el diagnóstico.

No se registraron falsos positivos durante la prueba y no se activó el sensor de flama en ausencia de fuego. Sin embargo, en pruebas de laboratorio con una fuente de calor infrarroja similar a una plancha eléctrica a 150 °C, el sensor de flama IR se activó erróneamente porque el fototransistor es sensible a cualquier radiación infrarroja intensa, no solo a la llama. Esto constituye una limitación importante que se discute más adelante.

3.2. Comparación con trabajos previos

Como se muestra en la Tabla 2. Comparación del sistema propuesto con trabajos previos: la presente propuesta muestra un sistema que supera los

trabajos previos en tres aspectos clave: (1) integra una estación meteorológica IoT autónoma que permite monitoreo preventivo; (2) alcanza una precisión media del 98%, significativamente superior a los modelos reportados; (3) proporciona clasificación del tipo de incendio, información crucial para la planificación de la respuesta de emergencia.

3.3. Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados positivos, se identificaron las siguientes limitaciones:

(1) Alcance limitado del sensor de flama IR: responde a cualquier radiación infrarroja intensa, no solo a llamas, lo que puede generar falsas alarmas.

(2) Dependencia de conectividad Wi-Fi: el sistema requiere una red Wi-Fi activa; en zonas forestales remotas sin cobertura de internet, esto es inviable.

(3) Autonomía energética: días nublados prolongados pueden agotar la batería en menos de 48 horas.

(4) Conjunto de datos aún limitado con 2,280 imágenes para cubrir todas las variaciones posibles de incendios nocturnos, diferentes tipos de vegetación.

(5) Pruebas solo en un ecosistema de pastizal/matorral, no en bosques de coníferas o selvas.

Tabla 2. Comparación del sistema propuesto con trabajos previos.

Estudio	Modelo de IA	Sensores IoT	Alertas automáticas	Clasificación de tipo de incendio	Mejor métrica
Aliaga Casaletti (2020)	CNN personalizada	No	Sí	No	No específica
Fernández (2024)	YOLOv8	No	No	No	F1=0.90
León Castillo (2024)	MobileNetV2	No	No	No	Precisión 92%
Este trabajo	YOLOv5s	Sí	Sí (SMS)	Sí (3 tipos)	mAP 98%

Conclusiones

Se desarrolló e implementó un sistema de detección temprana de incendios forestales que integra una estación meteorológica autónoma IoT y un modelo de inteligencia artificial basado en YOLOv5. Las conclusiones principales son:

- Viabilidad técnica: la combinación de hardware de bajo costo (ESP32, sensores, panel solar) con servicios en la nube gratuitos (Google Sheets, Apps Script) y YOLOv5 de código abierto es viable con una inversión inferior a 150 USD.
- Rendimiento del modelo de IA: YOLOv5s entrenado con 2,280 imágenes alcanzó una mAP del 98% y tiempo de inferencia de 1.8 s en CPU, superando a trabajos previos. La clasificación del tipo de incendio (superficial, subterráneo, copa) mostró una concordancia del 92% con expertos.
- Eficacia del sistema de alertas: la estación meteorológica transmitió datos confiables y las alertas SMS se activaron en menos de 10 segundos al superar umbrales críticos (30 °C o flama). La doble confirmación (ambiental + visual) reduce falsos positivos.
- El DHT11 proporcionó lecturas estables con error máximo de ± 1 °C y ± 5 % HR. La alimentación con batería Li-Po y panel solar permitió una autonomía de 48 horas sin recarga; con 4 horas diarias de sol, el sistema operó indefinidamente. La transmisión a Google Sheets fue exitosa en el 98 % de los intentos, con latencia media de 2.3 segundos. Las alertas SMS se recibieron en promedio a los 8 segundos (rango 5-12 s).

Con todo lo anterior, se puede considerar que se cumplieron todos los objetivos específicos: análisis del estado del arte, diseño y entrenamiento de la CNN, construcción de la estación, generación de alertas SMS, almacenamiento en la

nube y validación con datos reales. Se confirma la hipótesis de que las CNN permiten clasificar incendios en tiempo real con mayor precisión que los métodos tradicionales. En cuanto al potencial de escalabilidad, el sistema es modular, permitiendo añadir sensores (gases, velocidad del viento), mejorar el modelo de IA (YOLOv8, Transformers) o desplegar una red de múltiples estaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco por el apoyo institucional, con el proyecto DIDT/CI2025/04 y a la Brigada de Incendios Forestales del Ayuntamiento de Tianguistenco por su colaboración en las quemas controladas y la captura de imágenes.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses económicos, personales o académicos. El uso de productos comerciales (Twilio, Google Sheets, RoboFlow) fue exclusivamente con fines de investigación y desarrollo, sin recibir patrocinio ni contraprestación alguna.

Referencias

1. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), C. N. (20 de marzo de 2025). Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) – Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Obtenido de <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
2. Aliaga Casaletti, A. (2020). Sistema para la detección temprana de incendios forestales utilizando visión artificial. Universidad Siglo 21
3. Fernández, I. G. (2024). Detección temprana de incendios forestales con el uso de cámaras utilizando redes neuronales profundas. Centro Nacional de Inteligencia Artificial (CENIA), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y

Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

4. León Castillo, Y. (2024). Aplicación de visión por computadora e inteligencia artificial para la prevención de incendios forestales en áreas protegidas del litoral ecuatoriano. *Revista Internacional de Investigación y Desarrollo Global*.
5. Vicente Vírseda, J., González Arias, J., Parra Rodríguez, F., & Beltrán Pascual, M. (2019). *Métodos de Data Science aplicados a la Economía y a la Dirección y Administración de Empresas*. España: UN

Evaluación del índice triglicéridos/glucosa en adolescentes del sur de Tamaulipas

Martínez Lara, Verónica; Morales Ramírez, Dionicio; Guerrero Orendain, Luis Alejandro; Morales Garza, Sergio Alejandro; Velázquez Conti, Juan Carlos
Instituto Mexicano del Seguro Social, Boulevard Adolfo López Mateos sin número, Colonia Esfuerzo Nacional, Ciudad Madero, Tamaulipas, México
*Autor de correspondencia: veronica.mtzlara19@gmail.com

RESUMEN

El índice triglicéridos/glucosa se ha consolidado como un marcador clínico, accesible y bajo costo para la identificación temprana del riesgo cardiometabólico. El objetivo de este estudio fue determinar los valores del índice triglicéridos/glucosa en adolescentes y analizar su relación con el estado nutricional. Se realizó un estudio observacional, descriptivo y retrospectivo en adolescentes de 10 a 16 años, adscritos a una unidad de primer nivel de atención, durante el periodo 2024-2025. Se revisaron 480 expedientes clínicos electrónicos y se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias según el estado nutricional. La muestra estuvo integrada por 51% de hombres y 49% de mujeres; el 32,5% presentó sobrepeso, el 19,9% obesidad y el 4,2% bajo peso. El análisis con la prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas en los niveles de triglicéridos ($p<0,000$), colesterol ($p<0,000$) e índice triglicéridos/glucosa ($p<0,000$). El estudio evidenció una asociación entre el estado nutricional y las alteraciones del perfil de lípidos, lo que confirma la importancia del estado nutricional como marcador metabólico temprano para prevenir enfermedades crónicas mediante intervenciones tempranas que fomenten estilos de vida saludables.

Palabras clave: **adolescencia, índice triglicéridos-glucosa, riesgo cardiometabólico**

ABSTRACT

The triglyceride/glucose index has established itself as a clinical, accessible, and low-cost marker for the early identification of cardiometabolic risk. The objective of this study was to determine the values of the triglyceride/glucose index in adolescents and to analyze their relationship with nutritional status. An observational, descriptive, and retrospective study was carried out in adolescents aged 10 to 16 years, assigned to a first-level care unit, during the period 2024-2025. A total of 480 electronic health records were reviewed, and the Kruskal-Wallis test was used to assess differences according to nutritional status. The sample was made up of 51% men and 49% women; 32,5% were overweight, 19,9% obese, and 4,2% underweight. Analysis with the Kruskal-Wallis test showed statistically significant differences in triglyceride ($p<0,000$), cholesterol ($p<0,000$), and triglyceride/glucose ratio ($p<0,000$) levels. The study evidenced an association between nutritional status and alterations in the lipid profile, confirming the importance of nutritional status as an early metabolic marker to prevent chronic diseases through early interventions that promote healthy lifestyles.

Key words: **adolescence, triglyceride-glucose ratio, cardiometabolic risk**



1. Introducción

El síndrome metabólico (SM) constituye uno de los mayores problemas de salud pública a nivel mundial por su estrecha asociación con la diabetes mellitus tipo 2 (DM2) [1]. En México, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT 2022-2023) estimó que más del 40% de los adultos presenta algún componente del SM, y aunque no existen datos oficiales específicos para adolescentes, diversos estudios señalan una prevalencia superior al 20% en este grupo etario. Esta tendencia refleja una transición epidemiológica preocupante, en la que los factores de riesgo metabólicos emergen desde etapas tempranas de la vida y predisponen a enfermedades crónicas no transmisibles (ENT) en la edad adulta [2].

El SM se define como la concurrencia de obesidad central, dislipidemia (elevación de triglicéridos y disminución del colesterol HDL), hipertensión arterial y alteraciones del metabolismo de la glucosa. Su fisiopatología gira en torno a la resistencia a la insulina (RI), condición que altera la homeostasis energética y promueve la inflamación crónica de bajo grado, el estrés oxidativo y el depósito ectópico de lípidos en hígado, músculo y tejido adiposo [3]. Estas alteraciones inician con frecuencia durante la infancia y la adolescencia, etapas críticas para el desarrollo metabólico, lo que ha llevado a organismos internacionales como la Federación Internacional de Diabetes (IDF) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) a enfatizar la necesidad de un diagnóstico y monitoreo tempranos [4].

En los últimos años, la prevalencia de obesidad infantil y juvenil se ha incrementado de forma alarmante. La OMS (2024) estimó que más de 390 millones de niños y adolescentes de 5 a 19 años viven con sobrepeso u obesidad, lo que aumenta sustancialmente su riesgo

de desarrollar síndrome metabólico, dislipidemia e hipertensión [5]. Estudios en Latinoamérica indican que la obesidad abdominal y la hipertrigliceridemia son los componentes más frecuentes del SM pediátrico [6]. Asimismo, investigadores recientes han demostrado que la coexistencia de hipercolesterolemia e hipertrigliceridemia en edades tempranas predice alteraciones endoteliales y aterosclerosis en la adultez joven [7].

La identificación de indicadores clínicos y bioquímicos que permitan detectar la resistencia a la insulina de forma temprana se ha convertido en una prioridad epidemiológica. Entre los métodos empleados, el Homeostasis Model Assessment of Insulin Resistance (HOMA-IR) es considerado el estándar de referencia, aunque su uso requiere determinaciones de insulina plasmática, lo que limita su aplicación en entornos con recursos restringidos [8]. En este contexto, el índice triglicéridos/glucosa (IT/G) se ha posicionado como una alternativa práctica, económica y confiable para estimar la sensibilidad a la insulina [9].

El IT/G ha mostrado una alta correlación con la resistencia a la insulina medida mediante el método del *clamp* *euglucémico*, considerado el estándar de oro [10]. Diversos estudios confirman su utilidad para predecir el riesgo de síndrome metabólico, diabetes tipo 2 y enfermedad cardiovascular tanto en adultos como en adolescentes. Los niveles elevados del índice triglicéridos-glucosa permiten identificar alteraciones metabólicas tempranas en la población pediátrica, antes de que aparezcan signos clínicos evidentes [11].

Desde una perspectiva de salud pública, identificar el IT/G en etapas tempranas ofrece ventajas significativas. Permite estratificar el riesgo cardiometabólico en

escolares y adolescentes, optimizar las intervenciones de estilo de vida y reducir la carga futura de enfermedades crónicas [12]. Además, su aplicación en programas de tamizaje escolar puede integrarse fácilmente con determinantes básicos de glucosa y triglicéridos en ayunas, sin requerir insulina sérica ni procedimientos invasivos. Esto es especialmente relevante en regiones con recursos limitados, como la zona sur de Tamaulipas, donde la carga de obesidad y síndrome metabólico en adolescentes ha aumentado en la última década [2].

Estudios nacionales e internacionales coinciden en que la detección temprana de anomalías metabólicas mediante marcadores como el índice triglicéridos/glucosa puede modificar la trayectoria de riesgo y prevenir complicaciones a largo plazo [13]. Dado que las alteraciones metabólicas en la adolescencia tienden a persistir en la adultez, su identificación temprana representa una ventana crítica para prevenir diabetes tipo 2, enfermedad coronaria y aterosclerosis precoz [14]. En consecuencia, la evaluación del IT/G como predictor del síndrome metabólico en adolescentes del sur de Tamaulipas no sólo es clínicamente relevante, sino también estratégica desde la perspectiva preventiva y poblacional. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es determinar el valor del índice glucosa/triglicéridos en adolescentes de 10 a 16 años y establecer su relación con el estado nutricional.

2. Metodología

Este trabajo fue realizado como un estudio observacional, descriptivo y retrospectivo en donde se realizó una revisión de 480 expedientes de adolescentes entre 10 y 16 años que acudieron a consulta en la Unidad de Medicina Familiar No. 77 de Ciudad Madero, de la zona sur de Tamaulipas,

México, en el periodo de enero de 2024 a junio de 2025. Se seleccionaron solo aquellos expedientes que cumplieron los criterios de inclusión: 1) hombre o mujer de 10 a 19 años, 2) pacientes que contaron con laboratorios (glucosa, triglicéridos, colesterol), 3) pacientes con datos de peso y talla para calcular el índice de masa corporal (IMC) y los percentiles necesarios para identificar el estado nutricional del adolescente; excluyendo a aquellos pacientes con diagnóstico de diabetes mellitus.

El presente protocolo se realizó bajo los aspectos éticos de la Declaración de Helsinki y señalados en el Informe de Belmont; además, fue aprobado por los comités de investigación y ética institucionales, asignándole el folio R-2025-2802-017. En el análisis estadístico se calcularon medidas de tendencia central, media, frecuencia, porcentajes y rangos, así como la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para identificar diferencias en medias entre las variables de glucosa, triglicéridos, colesterol y el IT/G, con el estado nutricional como variable de agrupación, utilizando SPSS 27.

3. Resultados y discusión

De los 480 expedientes revisados, el 51 % correspondieron a hombres y el 49 % a mujeres, con una edad promedio de 12,76 años. El peso promedio fue de 55,9 kg y la talla promedio de 1,55 m, lo que sugiere heterogeneidad en la composición corporal y en el estado nutricional de los participantes. El percentil promedio de crecimiento fue 71,8, lo que indica que la mayoría de los adolescentes se encuentran dentro de parámetros normales de desarrollo, aunque una proporción relevante se ubica en los extremos de la distribución, lo que justifica el análisis detallado del estado nutricional.

Por otro lado, en el análisis de los indicadores metabólicos, se obtuvo una glucosa promedio de 88,67 mg/dL dentro del rango fisiológico normal, aunque con dispersión amplia que indica la presencia de casos con hiperglucemia aislados por arriba de 110 mg/dL. Los triglicéridos mostraron un promedio de 105,48 mg/dL, mientras que el colesterol total mostró un promedio de 140,38 mg/dL. El índice triglicéridos/glucosa, un marcador emergente de resistencia a la insulina, presentó una media de 8,31, valor que se asocia con un riesgo metabólico leve a moderado en esta población (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los adolescentes

Variable	Valor
Femenino	49 (n=235)
Masculino	51 (n=245)
Edad	12,76 ± 1,6
Peso	55,93 ± 17,5
Talla	1,55 ± 0,10
Percentil	71,81 ± 30,37
Glucosa	88,6 ± 18,26
Triglicéridos	105 ± 68,07
Colesterol	140,38 ± 27,78
IT/G*	8,3 ± 0,5

Respecto al estado nutricional, se observó que 44% (n=20) de los adolescentes presentaron peso normal, seguido de 32,5% (n=211) con sobrepeso, 19,4% (n=93) con obesidad y 4,2% (n=156) con bajo peso, lo que nos indica que el exceso de peso (51,9%) predomina en el estado nutricional en esta etapa de la vida. En el análisis por sexo, las diferencias en la media de glucosa, triglicéridos y colesterol no fueron tan marcadas, lo que sugiere que la influencia de género no es determinante en esta muestra (Tabla 2). El análisis de la información permitió identificar que el 18,75% (n=90) de los adolescentes presenta riesgo cardiometabólico, los cuales son caracterizados por presentar

niveles promedio de glucosa de 97,287 mg/dL, triglicéridos de 202,5 mg/dL, colesterol de 160,03 mg/dL y un IT/G de 9,08, todos los valores superiores a los observados en el grupo sin riesgo.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas por sexo

Variable	Sexo	
	Hombre	Mujer
Edad	12,71±1,6	12,8±1,6
Peso	57,64±19,04	54,16±15,55
Talla	1,57±0,12	1,53±0,08
Percentil	70,51±32,32	73,22±28,21
Glucosa	90,21±22,20	87,05±18,26
Triglicéridos	105,44±66,54	105,53±68,07
Colesterol	138,11±27,61	142,75±27,78
IT/G	8,3±0,52	8,3±0,5

Este hallazgo confirma la utilidad del IT/G como herramienta para la detección temprana de la resistencia a la insulina en contextos escolares o de atención primaria. Además, la proporción observada (casi 1 de cada 5 adolescentes) indica una población susceptible que requiere seguimiento clínico y orientación sobre hábitos saludables (Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticas descriptivas por estado nutricional y riesgo metabólico

EN	G	TGC	Col	IT/G
Bajo peso	87,10	85,45	141,95	8,07
Peso Normal	88,06	83,11	135,29	8,12
SP	91,38	101,94	135,9	8,3
O	88,07	140,42	149,72	8,58
Riesgo metabólico				
Sin riesgo	86,68	83,09	135,84	8,13
Con riesgo	97,28	202,5	160,03	9,08

EN: estado nutricional; G: glucosa; TGC: triglicéridos; Col: colesterol; SO: Sobrepeso; O: Obesidad

La prueba de Kruskal-Wallis, aplicada para contrastar las diferencias entre los grupos según el estado nutricional, mostró diferencias estadísticamente significativas en los niveles de triglicéridos ($p<0,000$), colesterol ($p<0,000$) e IT/G ($p<0,000$), mientras que la glucosa no mostró diferencias significativas ($p=0,838$). Esto sugiere que el incremento del peso corporal se asocia principalmente con alteraciones en el perfil lipídico, más que con la glucosa en ayuno, lo cual es coherente con la fisiopatología de la dislipidemia temprana y el síndrome metabólico en adolescentes proinflamatorios y aterogénicos, condición que, mantenida en el tiempo, puede anticipar el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticos de la prueba H de Kruskal-Wallis

Variable de agrupación: Estado Nutricional	Parámetros bioquímicos			
	G	TGC	Col	IT/G*
Sig.**	0,838	0,000	0,000	0,000

*G: glucosa; TGC: triglicéridos; Col: colesterol

**Significancia estadística

En el ámbito clínico, los diagnósticos más frecuentes en la consulta de medicina familiar correspondieron a condiciones de vigilancia o de control de crecimiento, encabezadas por el examen del estado de desarrollo del adolescente (6,67%), seguidas de rinitis alérgica no especificada (2,92%), consulta para atención y supervisión de la salud (2,50 %), examen médico general (2,29 %) y asma bronquial (1,88%). Estas cifras reflejan que la mayor proporción de consultas corresponde a acciones preventivas, en consonancia con los lineamientos del modelo de atención integral del adolescente (IMSS, 2023). Sin embargo, la presencia significativa de patologías respiratorias, como la rinitis y el asma, sugiere que los factores ambientales y alérgicos continúan siendo

una causa importante de morbilidad en esta población.

Los motivos de consulta se concentraron principalmente en el control del niño sano (14,3%), el control de medicamentos (8,1%) y la reevaluación de padecimiento (6,8%). Este patrón reafirma la función preventiva y de seguimiento del primer nivel de atención, aunque también evidencia la necesidad de reforzar la educación sanitaria sobre la automedicación y el uso racional de fármacos en adolescentes con padecimientos crónicos.

Respecto a las comorbilidades, la mayoría de los pacientes (66,6%) no presentó condiciones crónicas asociadas, mientras que las más frecuentes fueron asma bronquial (4,79%), rinitis crónica (2,92%) y rinitis alérgica (1,46%). La baja frecuencia de enfermedades metabólicas establecidas (como hipotiroidismo o TDAH, cada una con 0,63%) indica que la población analizada es predominantemente sana, pero con un porcentaje relevante que ya presenta alteraciones respiratorias recurrentes, lo que podría tener relación con factores de exposición ambiental, sedentarismo o hábitos dietéticos.

El presente estudio ofrece una visión integral del perfil metabólico y clínico de adolescentes de la zona sur de Tamaulipas, México, evidenciando una prevalencia combinada de sobrepeso y obesidad del 51,9%, cifras superiores a la media nacional en México descrita por la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT, 2023), donde el 41,1% de los adolescentes mexicanos presentaron exceso de peso [15]. Esta diferencia regional sugiere un patrón preocupante vinculado a factores culturales y ambientales, tales como el consumo de alimentos ultraprocesados, el

sedentarismo y los hábitos familiares de alimentación [15].

A nivel global, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que uno de cada cinco adolescentes presenta sobrepeso u obesidad, cifra que coincide con los resultados del presente estudio [5]. Este fenómeno se ha consolidado como una pandemia silenciosa que afecta a millones de jóvenes en todas las regiones del mundo. En Latinoamérica, la Sociedad Latinoamericana de Gastroenterología, Hepatología y Nutrición Pediátrica (LASPGHAN-SOB) reporta prevalencias de sobrepeso y obesidad cercanas al 40% en la población escolar⁶, lo que refleja una tendencia regional en ascenso, influenciada por la urbanización acelerada, los cambios en la estructura familiar y la adopción de dietas hipercalóricas de bajo valor nutricional.

El incremento sostenido en la prevalencia de obesidad se asocia directamente con cambios en los patrones alimentarios y con la reducción del gasto energético. Este comportamiento coincide con la conceptualización contemporánea del síndrome metabólico, que integra factores dietéticos, hormonales y de resistencia a la insulina [2]. Actualmente, este síndrome se considera un problema de salud pública global, con un crecimiento notable en países en vías de desarrollo debido a la transición epidemiológica y nutricional [3].

Diversas investigaciones en población pediátrica confirman que la coexistencia de exceso de peso, hipertrigliceridemia y resistencia a la insulina predice un alto riesgo de síndrome metabólico en etapas posteriores de la vida [15,16]. Esto sugiere que los determinantes de la enfermedad cardiovascular en adultos pueden tener su origen en la adolescencia, etapa crítica para la adquisición de hábitos que condicionan la

salud futura. En la población analizada, los niveles promedio de glucosa se mantuvieron dentro del rango normal; sin embargo, los adolescentes con mayor riesgo presentaron valores más altos, con un índice triglicéridos/glucosa (IT/G) promedio de 8,31, el cual aumentó proporcionalmente con el peso corporal. Este hallazgo coincide con lo descrito por Pavenello et al., quienes evidenciaron una correlación significativa entre el IT/G y el grosor de la íntima-media carotídea, considerando un marcador subclínico de riesgo cardiovascular [11].

En una revisión sistemática, Kurniawan concluyó que el IT/G es un biomarcador concluyente de resistencia a la insulina, síndrome metabólico y enfermedad cardiovascular [16], y propuso puntos de corte entre 8,45 y 8,75 para adolescentes americanos y coreanos [17]. Estos valores son comparables con los obtenidos en la muestra del presente trabajo, lo que refuerza su validez transcultural como herramienta de tamizaje.

Brito et al. [18], corroboraron en una revisión sistemática que el IT/G es un marcador diagnóstico y predictivo fiable para la identificación del riesgo cardiometabólico en población pediátrica. En tanto, Henning [19] destacó que la inflamación crónica derivada de la obesidad acelera los procesos aterogénicos, generando daño endotelial y rigidez arterial desde edades tempranas. De acuerdo con Hao et al. [20], los adolescentes con obesidad metabólicamente activa presentan un riesgo tres veces mayor de desarrollar diabetes tipo 2. En México, Vega-Cárdenas et al. confirman la correlación entre el IT/G y el modelo HOMA-IR en adolescentes, lo que fortalece su aplicabilidad en entornos clínicos de primer nivel [21].

En el ámbito clínico, Ferreira et al. [22] describieron que las infecciones respiratorias agudas continúan siendo el principal motivo de consulta pediátrica, seguidas de patologías crónicas como el asma y la rinitis alérgica. En la población analizada, las comorbilidades más frecuentes fueron el asma bronquial (4,7%) y la rinitis alérgica (2,9%), resultados congruentes con la literatura internacional.

Peters et al. [23] demostraron que la obesidad altera la función pulmonar mediante mecanismos inflamatorios sistémicos, lo que reduce la respuesta inmunológica y aumenta la probabilidad de asma. Este vínculo entre el exceso de adiposidad y las alteraciones respiratorias refuerza la hipótesis de que el tejido adiposo actúa como un órgano endocrino que contribuye a la inflamación sistémica y al deterioro de la función pulmonar.

El impacto del exceso de peso en la salud futura es incuestionable. Dunford et al. [24] demostraron que la obesidad infantil incrementa significativamente la probabilidad de desarrollar enfermedad cardiovascular en la edad adulta. De manera complementaria, Lemieux y Després [25] destacaron que el síndrome metabólico en adolescentes constituye una etapa previa a la aterosclerosis y a múltiples complicaciones metabólicas, como la hipertensión y la dislipidemia persistente.

Los hallazgos han sido reafirmados en estudios poblacionales amplios, como el de Longo et al. [26], quienes reportaron una asociación sólida entre el síndrome metabólico y la enfermedad aterosclerótica establecida, subrayando la importancia de la prevención desde etapas tempranas. Otro estudio que identifica la relevancia de identificar el riesgo cardiometabólico desde etapas tempranas es el realizado por el

Consorcio Internacional de Cohorte Cardiovascular Infantil incluyendo cohortes de Austria, Finlandia y los Estados Unidos de América realizando un diseño prospectivo longitudinal, identificando factores de riesgo infantiles (IMC, presión arterial, colesterol total, triglicéridos, tabaquismo) de los 3 a 19 años (infancia y adolescencia) con un seguimiento promedio de 35 años, presentando desenlaces con eventos cardiovasculares fatales y no fatales (incluyendo en estos últimos infarto agudo al miocardio, accidente cerebrovascular, ataque isquémico transitorio, insuficiencia isquémica, angina de pecho, enfermedad arterial periférica, entre otros) [27].

Así, las etapas tempranas de la vida emergen como un punto crítico para la intervención preventiva, donde la modificación de los estilos de vida puede prevenir o al menos mitigar el riesgo, así como mejorar la calidad de vida de la población.

Conclusiones

En lo que concierne al conjunto de hallazgos de este estudio, se evidencia que los adolescentes presentan un perfil mixto: por un lado, un alto número de consultas preventivas y la ausencia de comorbilidades graves; por otro, una tendencia preocupante hacia el sobrepeso, la obesidad y la dislipidemia mixta, lo cual representa una señal temprana del riesgo cardiometabólico futuro. Las diferencias estadísticamente significativas en triglicéridos, colesterol e IT/G, asociadas al estado nutricional, sugieren la necesidad de implementar programas integrales de educación alimentaria, promoción de la actividad física y monitoreo metabólico desde edades tempranas.

Finalmente, la importancia de estos resultados radica en su potencial para orientar las políticas públicas de salud

escolar y familiar. El monitoreo de parámetros como el IT/G puede convertirse en una herramienta costo-efectiva para la detección oportuna de alteraciones metabólicas, antes de que se manifiesten clínicamente. Además, la información derivada del presente estudio constituye una base para futuras investigaciones longitudinales que evalúen la progresión del riesgo cardiometabólico en adolescentes del sur de Tamaulipas y su asociación con factores sociodemográficos, ambientales y conductuales.

Referencias

1. V.M.G. Regufe, C.M.C.B. Pinto, P.M.V.H.C. Pérez. Síndrome metabólico en pacientes diabéticos tipo 2: una revisión de la evidencia actual. *Porto Biomed*, Vol. 5, (2020), e101. <https://doi.org/10.1097/j.pbj.0000000000000101>.
2. M.C. Escamilla Nuñez, L. Castro Porras, M. Romero Martínez, E. Zárate Rojas y R. Rojas Martínez. Detección, diagnóstico previo y tratamiento de enfermedades crónicas no transmisibles en adultos mexicanos. Ensanut 2022. *Salud Publica Mex*, Vol. 65, (2023), s153–s162. <https://doi.org/10.21149/14726>.
3. J. Alburquerque Melgarejo, J.C. Roque-Quezada, M. Virú, I. Armando y J.G. Valencia. Exactitud diagnóstica del índice triglicérido-glucosa para el diagnóstico de síndrome metabólico en un establecimiento de atención primaria de la región de San Martín, Perú. *Rev Esp Nutr Hum Diet*, Vol. 28(No.4), (2024), 257-265. doi: <https://doi.org/10.14306/renhyd.28.4.2185>.
4. P. Zimmet, K.G.M.M. Alberti y M. Serrano Ríos. Una nueva definición mundial del síndrome metabólico propuesta por la Federación Internacional de Diabetes: fundamento y resultados. *Rev Esp Cardiol*, Vol. 58(No.12), (2024), 1371–1376. doi: [https://doi.org/10.1016/s0300-8932\(05\)74065-3](https://doi.org/10.1016/s0300-8932(05)74065-3).
5. World Health Organization. Obesity and overweight. (2025). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
6. Y. Rivera Suazo, J.A. Meléndez, J.E. Alfaro Bolaños, F.J. Álvarez Chávez. Consenso sobre el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de niñas, niños y adolescentes con sobrepeso y obesidad de la sociedad Latinoamericana de Gastroenterología, Hepatología y Nutrición Pediátrica: LASPGHAN-SOB. *Rev Gastroenterol Mex*. Vol. 90(No.3), (2025), 428-450. <https://doi.org/10.1016/j.rgm.2025.03.002>
7. I. Pigeot y W. Ahrens. Epidemiology of metabolic syndrome. *Pflügers Archiv*. Vol. 477(No.5), (2025), 669–680. <https://doi.org/10.1007/s00424-024-03051-7>
8. D.R. Matthews, J.P. Hosker y A.S. Rudenski, B.A. Naylor, D.F. Treacher y R.C. Turner. Homeostasis model assessment: insulin resistance and beta-cell function from fasting plasma glucose and insulin concentrations in man. *Diabetologia*. Vol. 28 (No.7), (1985), 412–419. <https://doi.org/10.1007/BF00280883>
9. A. Piñar Gutiérrez, I. De Lara Rodríguez, A.J. Martínez Ortega, P. Remón Ruiz, C. Muñoz Gómez y A. Soto Moreno. Relación entre el índice triglicéridos/glucosa y la albumina con las complicaciones en diabetes tipo 1. Un estudio retrospectivo. *Endocrinol Diabetes Nutr*. Vol. 66(espec Cong 1), (2019), 83.
10. G. Unger, S.F. Benozzi, F. Perruzza, G.L. Pennacchiotti. Triglycerides and glucose index: a useful indicator of insulin resistance. *Endocrinologia y nutrición*. Vol. 61(No.10), (2014), 533–

540.
<https://doi.org/10.1016/j.endonu.2014.06.009>
11. C. Pavanello, M. Ruscica, S. Castiglione, G.G. Mombelli, A. Alberti, L. Calabresi y C.R. Sirtori. Triglyceride-glucose index: carotid intima-media thickness and cardiovascular risk in a European population. *Cardiovasc Diabetol.* Vol.24(No.1) (2025), 17. <https://doi.org/10.1186/s12933-025-02574-2>
12. G. Fahed, L. Aoun, M. Bou Zerdan, S. Allam, M. Bou Zerdan, Y. Bouferraa y H.I. Assi. Metabolic Syndrome: Updates on Pathophysiology and Management in 2021. *Int J Mol Sci*, Vol. 23(No.2), (2022), 786. <https://doi.org/10.3390/ijms23020786>
13. P. Zimmet, K.G. Alberti y M. Serrano Ríos. Una nueva definición mundial del síndrome metabólico propuesta por la federación Internacional de Diabetes: fundamento y resultados. *Rev Esp Cardio*, Vol. 58(No.12), (2005), 1371–1376.
14. B. Zhang, H. Shi, W. Cai, B. Yang y W. Xiu. Metabolic syndrome in children and adolescents: definitions, epidemiology, pathophysiology, interventions, and challenges. *Front Endocrinol*, Vol. 16, (2025), 1512642. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1512642>
15. T. Shamah-Levy, E.C. Lazcano-Ponce, L. Cuevas-Nasu, M. Romero-Martínez, E.B. Gaona-Pineda, L.M. Gómez-Acosta, L.R. Mendoza-Alvarado, I. Méndez-Gómez-Humarán. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición Continua 2023. Resultados Nacionales. Cuernavaca, México: Instituto Nacional de Salud Pública, (2024).
16. L.B. Kurniawan. Triglyceride-Glucose Index As A Biomarker Of Insulin Resistance, Diabetes Mellitus, Metabolic Syndrome, And Cardiovascular Disease: A Review. *EJIFCC*, Vol. 35(No. 1), (2024), 44–51.
17. S. Moon, J.S. Park y Y Ahn. The Cut-off Values of Triglycerides and Glucose Index for Metabolic Syndrome in American and Korean Adolescents. *J Korean Med Sci.* Vol. 32(No.3), (2017), 427–433. <https://doi.org/10.3346/jkms.2017.32.3.427>
18. A.D.M. Brito, H.H.M. Hermsdorff, M.S. Filgueiras, L.G. Suhett, S.A. Vieira-Ribeiro, S.D.C.C. Franceschini y J.F. Novaes. Predictive capacity of triglyceride-glucose (TyG) index for insulin resistance and cardiometabolic risk in children and adolescents: a systematic review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* Vol. 61(No.16), (2021), 2783–2792. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1788501>
19. R.J. Henning. Obesity and obesity-induced inflammatory disease contribute to atherosclerosis: a review of the pathophysiology and treatment of obesity. *Am J Cardiovasc Dis.* Vol. 11(NO.4), (2021), 504–529.
20. H. Hao, Y. Su y M. Feng. Association Between Metabolic and Obesity Phenotypes and Diabetes Risk in Children and Adolescents. *Diabetes Metab Syndr Obes.* Vol. 17, (2024), 4479–4487. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S484639>
21. M. Vega-Cárdenas, J. Flores-Sánchez, M.L. Torres-Rodríguez, O. Sánchez-Armáss, J.M. Vargas-Morales, P.E. Cossío-Torres, M. Terán-García, C. Aradillas-García Y UP-AMIGOS Team. Distribución del índice triglicéridos y glucosa (TyG) y el modelo homeostático para la evaluación de la resistencia a la insulina en la adolescencia tardía en mexicanos. *Nutr Hosp* Vol. 39(No.6), (2022), 1349–1356
22. E.E. Ferreira-Guerrero, G. Delgado-Sánchez, N. Mongua-Rodríguez, M. Martínez-Hernández, S. Canizales-

- Quintero, N.A. Téllez-Vázquez, A. Cruz-Salgado, L.D. Ferreyra-Reyes y L. García-García. Porcentaje de infección respiratoria aguda en menores de cinco años en México. *Ensanut Continua, Salud Publica Mex*, Vol. 65 (supl 1), (2023), S34-S38. <https://doi.org/10.21149/14791>
23. U. Peters, A.E. Dixon y E. Forno. Obesity and asthma. *J Allergy Clin Immunol*. Vol: 141(4), (2018), 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2018.02.004>
24. L.J. Dunford, S.C. Langle-Evans y S. McMullen. Childhood obesity and adult cardiovascular disease risk: a systematic review. *Int J Obes*. Vol. 34(No.1), (2010), 18–28. <https://doi.org/10.1038/ijo.2009.61>
25. I. Lemieux y J.P. Després. Metabolic Syndrome: Past, Present and Future. *Nutrients*. Vol. 12(No.11), (2020), 3501. <https://doi.org/10.3390/nu12113501>
26. A. Longo, B.L.P. Ribas, S.P. Orlandi, B. Weber, E.G. Bertoldi, L.R., Borges y R.T. Abib. Prevalence of metabolic syndrome and its association with risk factors in patients with established atherosclerosis disease. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, Vol. 92(No.1), (2020), e20180563. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180563>
27. D.R. Jacobs, J.G. Woo, A.R. Sinaiko, S.R. Daniels, J. Ikonen, M. Juonala, N. Kartiosuo, T. Lehtimäki, C.G. Magnussen, J.S.A. Viikari, N. Zhang, L.A. Bazzano, T.L. Burns, R.J. Prineas, J. Steinberger, E.M. Urbina, A.J. Venn, O.T. Raitakari y T. Dwyer. Childhood Cardiovascular Risk Factors and Adult Cardiovascular Events. *N Engl J Med*. Vol. 386(No.20), (2022), 1877–1888. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2109191>

Factores de riesgo psicosocial en docentes de ingeniería industrial

Bernal García, Carmina Saray*; Juárez Román, Gerardo; Izaguirre Herrera, Paul Orlando; Ortega López, Diana Alicia; Espinosa López, Mónica Yolanda
Instituto Tecnológico de Altamira, Carretera Tampico-Mante km 24.5, Altamira, Tamaulipas.

*Autor de correspondencia: carmina.bg@altamira.tecnm.mx

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar los factores de riesgo psicosocial en docentes de la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Altamira, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y transversal. Se aplicó un cuestionario estructurado con escala tipo Likert, alineado a los dominios establecidos por la normativa, a una muestra de ocho docentes. Los resultados muestran niveles moderados de riesgo psicosocial en la carga de trabajo y el control laboral, así como niveles altos en liderazgo y comunicación institucional. Se concluye que resulta indispensable implementar estrategias organizacionales orientadas a fortalecer el liderazgo, mejorar la comunicación interna y equilibrar la carga laboral, con el fin de promover el bienestar docente y cumplir con las disposiciones de la NOM-035-STPS-2018.

Palabras clave: **factores de riesgo psicosocial, docentes, NOM-035, Ingeniería Industrial, bienestar laboral**

ABSTRACT

This study aimed to analyze psychosocial risk factors in Industrial Engineering teachers at the Instituto Tecnológico de Altamira, based on NOM-035-STPS-2018. A quantitative, descriptive, and cross-sectional design was used. A structured Likert-scale questionnaire aligned with the standard was applied to eight teachers. Results show moderate risk in workload and job control, and high risk in leadership and institutional communication. The findings highlight the need to implement organizational strategies to improve working conditions and promote teacher well-being.

Keywords: **psychosocial risk factors, teachers, NOM-035, Industrial Engineering, workplace well-being**

1. Introducción

Los factores de riesgo psicosocial se han consolidado como una de las principales problemáticas asociadas a la salud laboral en los entornos organizacionales contemporáneos. Estos factores influyen directamente en la salud mental, el desempeño laboral y la calidad de vida de los trabajadores. En el sector educativo, especialmente en la

educación superior, los docentes se enfrentan a múltiples exigencias académicas, administrativas y organizacionales que incrementan su exposición a este tipo de riesgos.

La Organización Mundial de la Salud reconoce que el estrés laboral constituye uno de los principales problemas emergentes de salud pública, al estar



asociado con trastornos de ansiedad, depresión y agotamiento emocional. En respuesta a esta problemática, diversos organismos internacionales han impulsado estrategias preventivas orientadas a la identificación y control de los factores de riesgo psicosocial en el trabajo.

Diversas investigaciones recientes han documentado que los docentes universitarios constituyen un grupo especialmente expuesto a factores de riesgo psicosocial debido a la sobrecarga de trabajo, las demandas administrativas, la presión por resultados académicos y las exigencias derivadas de los procesos de evaluación institucional [1-4]. En México, la implementación de la NOM-035-STPS-2018 ha permitido identificar áreas críticas relacionadas con liderazgo, comunicación organizacional, reconocimiento laboral y equilibrio trabajo-familia [5,6].

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018 establece los lineamientos obligatorios para identificar, analizar y prevenir los factores de riesgo psicosocial, así como para promover un entorno organizacional favorable. Su aplicación abarca todos los centros de trabajo, incluidas las instituciones educativas públicas. En este contexto, resulta fundamental analizar las condiciones laborales del personal docente, particularmente en áreas de alta exigencia académica como la Ingeniería Industrial.

El Instituto Tecnológico de Altamira, perteneciente al Tecnológico Nacional de México, enfrenta los retos derivados de la creciente demanda académica y administrativa del sistema educativo superior. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar los factores de riesgo psicosocial en docentes de Ingeniería Industrial, con la finalidad de generar evidencia que contribuya a la

toma de decisiones institucionales y al diseño de estrategias preventivas orientadas al bienestar laboral.

De acuerdo con la Secretaría del Trabajo y Previsión Social [7], los factores de riesgo psicosocial corresponden a aquellos aspectos del entorno laboral capaces de generar alteraciones emocionales, estrés grave y afectaciones al entorno organizacional. Asimismo, la normativa se refiere a que elementos como la carga excesiva de trabajo, el liderazgo negativo y la falta de reconocimiento pueden influir directamente en la salud mental y el desempeño laboral del trabajador.

2. Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental, descriptivo y transversal, ya que los datos fueron recolectados en un solo momento sin manipulación de variables. La población estuvo conformada por docentes adscritos a la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Altamira.

La muestra fue no probabilística por conveniencia e incluyó a ocho docentes que aceptaron participar de manera voluntaria en el estudio. Como instrumento de recolección de datos se utilizó un cuestionario estructurado con escala tipo Likert de cinco niveles, elaborado con base en los dominios y categorías establecidos por la NOM-035-STPS-2018. El cuestionario evaluó dimensiones como carga de trabajo, control laboral, liderazgo, comunicación institucional, relaciones laborales y equilibrio entre la vida laboral y personal.

La aplicación del instrumento se realizó mediante un formulario digital, garantizando la confidencialidad y el anonimato de los participantes. El análisis de los datos se llevó a cabo utilizando estadística descriptiva, mediante el cálculo de frecuencias y

tendencias generales, lo que permitió identificar los niveles de riesgo psicosocial presentes en cada dimensión evaluada.

El diseño metodológico se fundamentó en los criterios establecidos por la NOM-035-STPS-2018 y en estudios recientes que han validado la evaluación de riesgos psicosociales en población trabajadora mexicana [5,7].

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos indican que en la dimensión de carga de trabajo los docentes perciben niveles moderados de exigencia, tanto en las actividades frente a grupo como en las tareas administrativas. Sin embargo, se identificó presión constante asociada al cumplimiento de responsabilidades académicas y administrativas.

En cuanto al control laboral, los participantes reportaron contar con autonomía parcial para organizar sus actividades docentes y proponer mejoras en su trabajo; no obstante, se observaron limitaciones en la planeación del tiempo laboral, lo que contribuye a un nivel moderado de riesgo psicosocial en esta dimensión.

Por otro lado, las dimensiones de liderazgo y comunicación institucional presentaron niveles altos de riesgo psicosocial. Una proporción significativa de docentes manifestó desacuerdo respecto al apoyo brindado por los directivos, la claridad en la comunicación de las decisiones institucionales y el reconocimiento al desempeño docente.

Las relaciones laborales entre docentes mostraron condiciones relativamente favorables en cuanto al apoyo entre compañeros; sin embargo, se identificaron áreas de oportunidad en la resolución de conflictos. Finalmente, el equilibrio entre la vida laboral y personal

presentó afectaciones moderadas, evidenciando interferencia del trabajo en la vida personal y familiar.

Los hallazgos del presente estudio coinciden con investigaciones previas realizadas en el ámbito de la educación superior, las cuales señalan al liderazgo y la comunicación organizacional como factores críticos en la percepción del bienestar laboral docente. De acuerdo con el modelo demanda-control, la combinación de altas demandas laborales y bajo apoyo directivo incrementa el riesgo de estrés y agotamiento emocional.

Asimismo, el modelo esfuerzo-recompensa explica que la falta de reconocimiento al desempeño docente constituye un elemento generador de tensión emocional. En este sentido, la NOM-035-STPS-2018 enfatiza la importancia de promover entornos organizacionales favorables como estrategia preventiva para la salud laboral.

Si bien el tamaño de la muestra limita la generalización de los resultados, estos proporcionan un diagnóstico inicial relevante para la institución y constituyen un insumo valioso para la toma de decisiones en materia de salud y bienestar laboral.

Como se observa en la Figura 1, las dimensiones de liderazgo y comunicación institucional presentan los niveles más altos de riesgo percibido. La carga de trabajo y el control laboral muestran niveles moderados, mientras que las relaciones laborales registran condiciones relativamente favorables. Estos hallazgos evidencian la necesidad de fortalecer las prácticas de gestión institucional orientadas al bienestar docente.



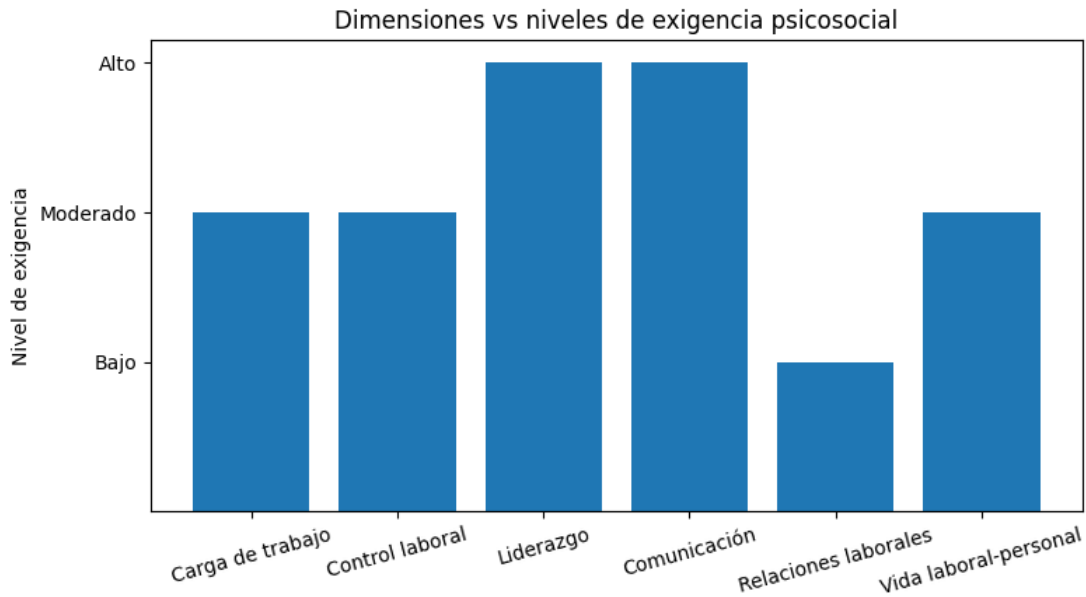


Figura 1. Dimensiones evaluadas y niveles de exigencia psicosocial percibidos

Conclusiones

El estudio permitió identificar la presencia de factores de riesgo psicosocial en docentes de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Altamira, destacando niveles moderados de riesgo en la carga de trabajo y el control laboral, así como niveles altos en liderazgo y comunicación institucional.

Se concluye que resulta indispensable implementar estrategias organizacionales orientadas a fortalecer el liderazgo institucional, mejorar los canales de comunicación, promover el reconocimiento al desempeño docente y equilibrar la carga laboral, con el fin de prevenir riesgos psicosociales y dar cumplimiento a la NOM-035-STPS-2018. Como líneas futuras de investigación, se sugiere ampliar el tamaño de la muestra y evaluar el impacto de las intervenciones implementadas.

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones desarrolladas en instituciones de educación superior

mexicanas, donde el liderazgo organizacional y la comunicación institucional han sido identificados como factores determinantes del bienestar laboral docente [3,5,6]. Asimismo, la presencia de niveles moderados de riesgo asociados con la carga de trabajo concuerda con lo reportado por diversos autores que señalan una creciente intensificación de las actividades académicas y administrativas [1,2].

Desde el modelo demanda-control de Karasek y Theorell [8], la combinación de altas exigencias laborales y limitada capacidad de decisión puede incrementar la probabilidad de estrés ocupacional. De igual forma, el modelo esfuerzo-recompensa de Siegrist [9] explica que la percepción de escaso reconocimiento institucional puede generar desgaste emocional y disminuir la satisfacción laboral.

Los hallazgos también son consistentes con estudios recientes sobre la aplicación de la NOM-035-STPS-2018, los cuales destacan la importancia de

promover entornos organizacionales favorables, fortalecer la comunicación interna y desarrollar estilos de liderazgo participativos para reducir los riesgos psicosociales [5,6,7].

Referencias

1. Organización Mundial de la Salud. Mental Health at Work. WHO, 2022.
2. Leka S., Jain A. Health Impact of Psychosocial Hazards at Work. WHO, 2019.
3. Aranibar MF et al. The impact of psychosocial risk factors on good teaching practices among university teachers. Work, 2026.
4. Gutiérrez-Hernández MG et al. Organización del tiempo durante el teletrabajo como riesgo psicosocial en docentes. CULCyT, 2024.
5. Cotonierto-Martínez E. Identificación y análisis de factores de riesgo psicosocial según la NOM-035-STPS-2018. JONNPR, 2021.
6. Cano-Gutiérrez JC et al. Psychosocial risk factors identification in Mexican workers. Work, 2023.
7. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. NOM-035-STPS-2018.
8. Karasek RA, Theorell T. Healthy Work. Basic Books, 1990.
9. Siegrist J. Effort-Reward Imbalance at Work and Health. Springer, 2019.
10. Hernández Sampieri R., Fernández C., Baptista P. Metodología de la investigación. McGraw-Hill, 2020.
11. Chiavenato I. Gestión del talento humano. McGraw-Hill, 2021.
12. Celis-Domínguez AB. Clima organizacional y bienestar desde la perspectiva del directivo universitario. EPSIR, 2024.

Sistema inteligente para la detección de incendios domésticos

Pineda Arizmendi, María Guadalupe^{1,2*}, Narváez Miranda, Jeremi Yahir¹; Vázquez Ramírez, Berenice¹

¹Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Carretera Tenango-La Marquesa km 22, Santiago Tilapa, Tianguistenco, Estado de México

²Universidad Autónoma del Estado de México, Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapán,
52640 Santiago Tianguistenco, Méx.

*Autor de correspondencia: maría_pa@test.edu.mx

RESUMEN

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, los incendios en viviendas representan una causa importante de daños materiales y riesgos en México. Asimismo, el Centro Nacional de Prevención de Desastres señala que muchos incendios domésticos se originan por fallas eléctricas, fugas de gas o descuidos en la cocina. A nivel internacional, la National Fire Protection Association indica que la mayoría de los incendios residenciales pueden propagarse rápidamente si no se detectan a tiempo. El presente trabajo corresponde al área de Ingenierías y Desarrollo Tecnológico y tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema inteligente para la detección de incendios mediante técnicas de inteligencia artificial y hardware embebido. La metodología se basa en el modelo CRISP-DM estructurado en seis fases. Se recolectaron 10,463 imágenes clasificado en fuego, humo y no fuego, etiquetado en Roboflow y empleadas para entrenar un modelo YOLOv8. El sistema obtuvo una precisión del 78.8%, un recall del 73.2%, un mAP@50 del 77.9% y un mAP@50-95 del 50.2%. La integración con un microcontrolador ESP32 permitió la activación de alertas físicas y envío de notificaciones en tiempo real. Los resultados demuestran que la inteligencia artificial puede contribuir significativamente a la prevención de incendios en entornos domésticos.

Palabras clave: **incendios domésticos, fuego, red neuronal convolucional, YOLOv8, ESP32**

ABSTRACT

According to the National Institute of Statistics and Geography, domestic fires are one of the main causes of property damage and risk in Mexico. Furthermore, the National Centre for Disaster Prevention points out that many domestic fires are caused by electrical faults, gas leaks or carelessness in the kitchen. Internationally, the National Fire Protection Association states that most residential fires can spread rapidly if not detected in time. This project falls within the field of Engineering and Technological Development and aims to design and implement a smart fire detection system using artificial intelligence techniques and integrated hardware. The methodology is based on the CRISP-DM model, structured in six phases. A total of 10,463 images were collected, classified as 'fire', 'smoke' and 'no fire', annotated in Roboflow and used to train a YOLOv8 model. The system achieved an accuracy of 78.8 per cent, a recall of 73.2 per cent, an mAP@50 of 77.9 per cent and an mAP@50-95 of 50.2 per cent. Integration with an ESP32 microcontroller enabled the activation of physical alarms and the sending of real-time notifications. The results demonstrate that artificial intelligence can make a significant contribution to fire prevention in the home.

Keywords: **domestic fires, fire, convolutional neural network, YOLOv8, ESP32**

1. Introducción

Los incendios en viviendas constituyen uno de los eventos de emergencia más frecuentes y devastadores a nivel mundial [1]. Según la Organización Mundial de la Salud, las quemaduras y lesiones relacionadas con el fuego causan alrededor de 180.000 muertes anuales a nivel global, siendo los entornos domésticos uno de los principales escenarios de riesgo. En México, el INEGI reporta que los incendios en viviendas generan pérdidas materiales significativas cada año, afectando con mayor intensidad a hogares con condiciones de vulnerabilidad socioeconómica [2, 3].

El CENAPRED identifica como causas principales de los incendios domésticos las fallas en instalaciones eléctricas, el manejo inadecuado de combustibles y los accidentes en la cocina. Estas causas frecuentemente resultan en fuegos que se propagan antes de que los ocupantes puedan reaccionar, lo que subraya la importancia de contar con sistemas de detección temprana. La NFPA señala que el tiempo de detección es el factor más determinante en la reducción de daños: un sistema que alerte en los primeros segundos puede reducir drásticamente las consecuencias del siniestro [4, 1].

Los detectores de humo convencionales, aunque ampliamente utilizados, presentan limitaciones en cuanto a la tasa de falsos positivos, el área de cobertura y la capacidad de discriminar entre el humo de incendio y el humo de cocina [5]. Frente a estas limitaciones, el uso de visión por computadora y redes neuronales convolucionales emerge como una alternativa robusta, capaz de analizar el entorno de manera continua e interpretar patrones visuales complejos en tiempo real [6, 7].

Los modelos de la familia YOLO (You Only Look Once) representan el estado del arte en detección de objetos en tiempo real. YOLOv8, la versión más reciente desarrollada por Ultralytics, ofrece mejoras significativas en velocidad de inferencia y precisión respecto a sus predecesores, siendo adecuada para implementaciones en sistemas embebidos de recursos limitados [8, 9].

El presente trabajo propone FireWatch, un sistema integrado que combina un modelo YOLOv8 entrenado para la detección de fuego y humo con un microcontrolador ESP32 equipado con sensores ambientales, todo gestionado desde un servidor web con visualización en tiempo real. El objetivo es ofrecer una solución de bajo costo, modular y adaptable a distintos entornos domésticos [10, 11].

2. Metodología

La metodología empleada es el modelo CRISP-DM, que estructura el desarrollo de proyectos de inteligencia artificial en seis fases iterativas [9]. Se identificó la necesidad de desarrollar un sistema capaz de detectar incendios en entornos domésticos de manera oportuna, con el objetivo de reducir riesgos y prevenir daños materiales y personales. El sistema debe procesar video en tiempo real, discriminar entre presencia y ausencia de fuego o humo, y generar alertas multicanal de forma automática.

Se definió el tipo de información necesaria para el entrenamiento del modelo, considerando imágenes representativas de tres clases: fuego, humo y ausencia de incendio. Se buscó cubrir distintos escenarios posibles en cuanto a iluminación, ángulo de captura, intensidad del fuego y entorno doméstico.

2.1. Recolección y preparación de los datos

Se recolectó un total de 10.463 imágenes distribuidas en tres clases balanceadas: 3.488 imágenes de fuego, 3.488 de humo y 3.487 de no fuego. Las imágenes fueron etiquetadas mediante cuadros delimitadores (bounding boxes) utilizando la plataforma Roboflow [12, 13], que permitió gestionar el conjunto de datos, aplicar técnicas de aumento de datos y exportar el dataset en el formato requerido por YOLOv8. El conjunto fue dividido en subconjuntos de entrenamiento (70%), validación (20%) y prueba (10%).

2.2. Modelado

Se empleó una red neuronal convolucional basada en el modelo YOLOv8, entrenada para analizar imágenes y detectar patrones característicos de incendios. La arquitectura YOLOv8 procesa la imagen completa en una única pasada por la red, lo que permite la inferencia en tiempo real con alta eficiencia computacional. El modelo fue entrenado durante 100 épocas con un tamaño de lote de 16, empleando un optimizador SGD con tasa de aprendizaje inicial de 0.01.

2.3. Evaluación

El rendimiento del modelo se evaluó mediante métricas estándar de visión por computadora: precisión (Precision), sensibilidad (Recall) e intersección sobre la unión (IoU). La precisión se define como:

$$F1 = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

donde TP corresponde a verdaderos positivos y FP a falsos positivos. Esta métrica indica la proporción de detecciones positivas que realmente corresponden a fuego o humo. La sensibilidad (Recall) se define como:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Donde FN representa los falsos negativos. Esta métrica mide la capacidad del modelo para detectar todos los casos reales de incendio. El grado de coincidencia entre las predicciones y las anotaciones reales se evaluó mediante la métrica Intersection over Union (IoU):

$$IoU = \frac{\text{Área de intersección}}{\text{Área de unión}} \quad (3)$$

Esta métrica cuantifica la superposición entre el cuadro delimitador predicho por el modelo y el cuadro real, considerándose una detección correcta cuando el valor de IoU supera un umbral predefinido, generalmente 0.5.

2.4. Implementación

Para la implementación de estas métricas, se compararon las predicciones generadas por el modelo YOLOv8 con las etiquetas reales del conjunto de prueba. Cada predicción fue clasificada de la siguiente manera:

- Verdadero positivo (TP): cuando el modelo detecta correctamente la presencia de fuego o humo y el IoU con la anotación real es mayor al umbral establecido.
- Falso positivo (FP): cuando el modelo detecta fuego o humo en una región donde no existe.
- Falso negativo (FN): cuando el modelo no detecta un incendio presente en la imagen.

El cálculo de estas métricas se realizó automáticamente durante el proceso de validación del modelo utilizando las herramientas integradas del framework YOLOv8, el cual genera reportes de desempeño basados en curvas en la Figura 1. La curva F1-Confidence evidencia la relación entre el umbral de

confianza y el desempeño del modelo de clasificación, mostrando que el valor óptimo de F1 se alcanza en niveles intermedios de confianza (aproximadamente entre 0.2 y 0.3). Este comportamiento refleja que, cuando el umbral es demasiado bajo, el modelo incorpora predicciones poco seguras que reducen la precisión, mientras que al aumentar excesivamente el umbral se descartan instancias relevantes, disminuyendo el recall.

En consecuencia, el F1-score decrece en ambos extremos y se maximiza en un punto intermedio que representa el equilibrio entre precisión y exhaustividad. Dicho hallazgo permite identificar el umbral de decisión más adecuado para optimizar la detección de las clases analizadas (fuego y humo), evitando tanto la sobreinclusión de falsos positivos como la pérdida de verdaderos positivos.

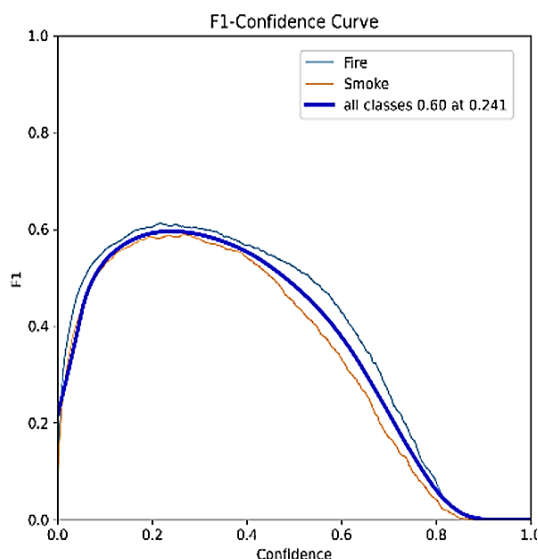


Figura 1. Curva de confianza de Precisión

En la Figura 2 se muestra cómo el desempeño del modelo, medido en términos de recall, se ve afectado por la variación del umbral de confianza aplicado a las predicciones. Se observa que, en valores bajos de confianza, el

modelo alcanza niveles elevados de recall (cerca de 0.88 en el promedio de todas las clases), ya que se incluyen prácticamente todas las instancias positivas, aunque con menor precisión. Conforme el umbral de confianza aumenta, el recall disminuye progresivamente, reflejando que el modelo se vuelve más estricto y descarta un mayor número de verdaderos positivos.

Este comportamiento es consistente en las clases analizadas (fuego y humo), aunque con ligeras diferencias en la pendiente de descenso. El fenómeno evidencia la clásica tensión entre precisión y recall: un umbral bajo favorece la cobertura de casos positivos, mientras que un umbral alto privilegia la certeza en las predicciones a costa de reducir la sensibilidad del sistema. En aplicaciones críticas como la detección de incendios, este análisis resulta fundamental para seleccionar el umbral óptimo que maximice la capacidad de alerta temprana sin comprometer la confiabilidad del modelo.

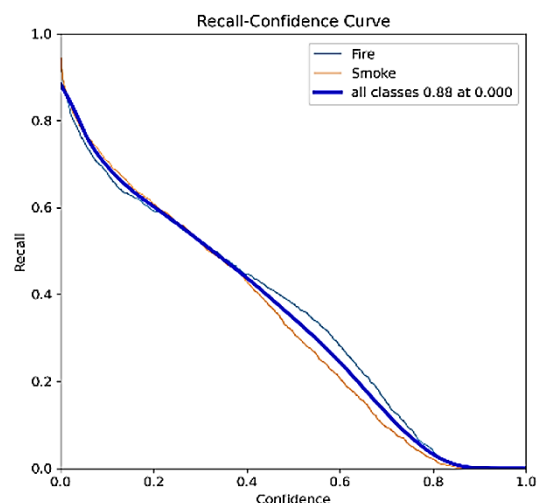


Figura 2. Curva de confianza de Recall

Asimismo, como se observa en la Figura 3. La matriz de confusión constituye una herramienta fundamental para evaluar el

desempeño de un modelo de clasificación multiclase, en este caso aplicado a la detección de fuego, humo y fondo. Los valores diagonales (1.352 instancias de fuego y 1.064 de humo correctamente clasificadas) reflejan la capacidad del modelo para identificar adecuadamente las clases principales, mientras que las celdas fuera de la diagonal evidencian los errores de clasificación. Por ejemplo, se observa una proporción significativa de instancias de fondo clasificadas erróneamente como fuego (701) y humo (705), lo que indica una tendencia del modelo a confundir patrones de fondo con características de las clases positivas.

La clase fuego presenta 463 instancias clasificadas como fondo, lo que reduce la sensibilidad del sistema en escenarios críticos. Este análisis permite identificar fortalezas y debilidades específicas del modelo, destacando la necesidad de ajustar el umbral de decisión o mejorar el conjunto de entrenamiento para reducir la confusión entre clases y optimizar la fiabilidad del sistema de detección.

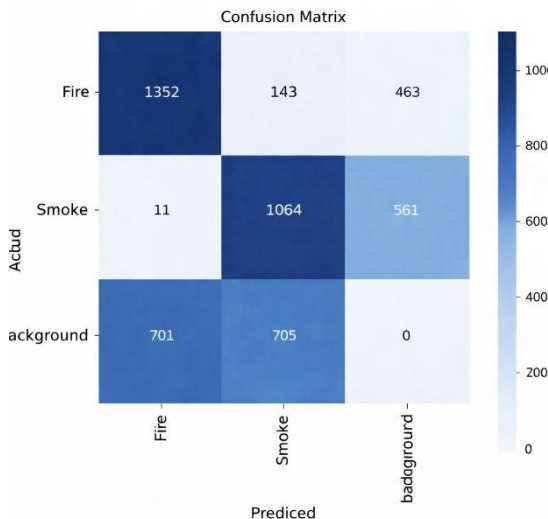


Figura 3. Matriz de confusión

El sistema final integra tres componentes principales:

a) Servidor web (Flask + SocketIO): gestiona la captura de video, ejecuta la inferencia del modelo YOLOv8, administra la base de datos MySQL y expone una interfaz web con un panel de control en tiempo real.

b) Microcontrolador ESP32: monitorea variables ambientales mediante sensores de temperatura y humedad (DHT22), de gas y humo (MQ2) y de monóxido de carbono. Calcula un índice de riesgo de incendio categorizado en cuatro niveles: BAJO, MEDIO, ALTO y CRÍTICO. Al recibir una señal de alerta del servidor, activa un buzzer piezoeléctrico y un LED de advertencia.

c) Sistema de alertas multicanal: Ante la detección de fuego o humo con nivel de confianza superior al umbral configurado, el sistema envía automáticamente una notificación por correo electrónico con imagen adjunta, activa los periféricos del ESP32 y actualiza el panel web en tiempo real mediante SocketIO.

La comunicación entre el servidor y el ESP32 se realiza vía HTTP sobre la red local WiFi, con soporte opcional para comunicación serial.

3. Resultado y discusión

3.1. Métricas del modelo

La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos tras el entrenamiento y evaluación del modelo YOLOv8 sobre el conjunto de prueba.

Tabla 1. Métricas de evaluación del modelo YOLOv8

Métrica	Valor obtenido
Precisión	78,8 %
Recall	73,2 %
mAP@50	77,9 %
mAP@50-95	50,2 %

Los resultados indican un rendimiento adecuado para la tarea de detección de

incendios en entornos domésticos. La precisión del 78,8% indica que aproximadamente cuatro de cada cinco detecciones positivas corresponden a casos reales de fuego o humo, lo que reduce la tasa de falsas alarmas. El recall del 73,2% refleja que el modelo identifica correctamente la mayoría de los incendios presentes en las imágenes, aunque existe margen de mejora para escenarios con humo tenue o fuego encubierto. El $mAP@50$ de 77,9% confirma un buen desempeño general, mientras que el $mAP@50-95$ de 50,2% señala oportunidades de mejora en la precisión de los cuadros delimitadores bajo umbrales de IoU más estrictos, lo que es esperado en tareas de segmentación visual compleja.

3.2. Comportamiento del sistema integrado

La integración del modelo con el ESP32 demostró ser funcional en condiciones de red local estándar. El tiempo de respuesta promedio desde la detección visual hasta la activación de alertas físicas se mantuvo por debajo de los 2 segundos, lo cual es relevante en contextos de emergencia. El envío de notificaciones por correo electrónico se completó en un promedio de 5 a 8 segundos adicionales, dependiendo de la latencia del servidor SMTP.

La combinación de detección visual con el monitoreo ambiental del ESP32 permitió contextualizar los eventos de detección. En pruebas con objetos de apariencia similar al fuego (luz solar directa o lámparas de tonos cálidos), el índice de riesgo ambiental actuó como filtro secundario, reduciendo la tasa de falsos positivos respecto al uso exclusivo del modelo visual.

3.3. Discusión

Los resultados obtenidos son comparables con los reportados en la

literatura para sistemas de detección de incendios basados en redes convolucionales. La arquitectura modular adoptada demostró ser una ventaja significativa: la actualización del modelo YOLOv8 no requirió modificaciones en los módulos de alertas ni en la capa de persistencia, lo que valida el enfoque por capas [3].

Una limitación identificada es la dependencia de condiciones de iluminación adecuadas para el correcto funcionamiento del módulo de visión, así como la necesidad de conectividad WiFi para la comunicación entre el servidor y el ESP32. Como trabajo futuro, se contempla el entrenamiento con un conjunto de datos más amplio, la incorporación de comunicación MQTT y la evaluación en escenarios reales.

Conclusiones

Se desarrolló e implementó FireWatch, un sistema inteligente de detección temprana de incendios domésticos que integra un modelo de visión artificial YOLOv8 con monitoreo ambiental mediante un microcontrolador ESP32. El sistema demostró un rendimiento adecuado con una precisión del 78,8% y un $mAP@50$ del 77,9%, con tiempos de respuesta de alerta inferiores a 2 segundos en condiciones de red local.

La metodología CRISP-DM [14], permitió estructurar el desarrollo de forma iterativa y trazable, facilitando la documentación de cada fase del proyecto. La combinación de detección visual y sensorial resultó más robusta que el uso de cualquiera de los dos métodos de forma independiente, reduciendo los falsos positivos en escenarios con objetos de apariencia similar al fuego.

El proyecto demuestra que el uso de inteligencia artificial y hardware embebido de bajo costo puede ofrecer soluciones

funcionales y adaptables para la prevención de riesgos en entornos domésticos, con potencial de escalabilidad hacia contextos industriales, educativos o forestales.

Referencias

1. CENAPRED, «Centro Nacional de Prevención de Desastres. Incendios domésticos: causas y prevención. Gobierno de México,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cenapred>
2. INEGI, «Instituto Nacional de Estadística y Geografía,» Estadísticas de incendios en viviendas en México. INEGI., 2022. [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx>
3. S. Suh, «Deep Learning-Based Fire Detector Robust to Smoke–Fog Ambiguity in Outdoor Scenes,» *Applied Sciences*, vol. 16, nº 4, 2026.
4. NFPA, «NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code,» National Fire Protection Association. Quincy, MA, 2019. [En línea].
5. S. Hall y T. McGree, «Home Structure Fires,» National Fire Protection Association, 2025.
6. A. Elhanashi, S. Essahraoui, P. Dini y S. Saponara, «Early Fire and Smoke Detection Using Deep Learning: A Comprehensive Review of Models, Datasets, and Challenges,» *Applied Sciences*, vol. 15, nº 18, p. 10255, 2025.
7. B. Shaddy, B. Binder, A. Desgupta, H. Qin, J. Haley, A. Farguell, K. Hilburn, D. Mallia, A. Kochanski, J. Mandel y A. A. Oberai, «Generative Algorithms for Wildfire Progression Reconstruction from Multi-Modal Satellite Active Fire Measurements and Terrain Height,» *Remote Sensing*, vol. 18, nº 2, p. 227, 2026.
8. L. He, . Y. Zhou, L. Liu, Y. Zhang y J. Ma, «Research and application of deep learning object detection methods for forest fire smoke recognition,» *Scientific Reports*, vol. 15, nº 1, p. 16328, 2025.
9. J. Redmon y A. Farthadi, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). YOLO9000: Better, Faster, Stronger, 2017.
10. Y. Song, L. Shuai, S. Xingliang, W. Bohong, Y. Meng y D. Shiqiang, Research of deep learning-based fire and smoke detection algorithm for highway tunnels, *SPIE*, 2025, p. 135752B.
11. E. Myadze-Pike, Semantic segmentation in action: cross domain strategies for wildfire risk reduction, The Ohio State University, 2024.
12. B. S. Alam, M. P. Mia, G. Kibria, J. A. Mahi, M. T. Noor, I. J. Momo y N. T. Niloy, «LabEquipVis: An annotated image dataset of computer laboratory equipment for object detection and smart lab automation,» *Data in Brief*, 2025.
13. ROBOFLOW, «Roboflow blog. Blog.,» 2022. [En línea]. Available: <https://blog.roboflow.com/>
14. I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville y Y. Bengio, *Deep learning*, vol. 1, MIT press Cambridge, 2016.

Sistema IoT en tiempo real para monitoreo de contaminación en cuerpos de agua

Rojas Zetina, Deivid Irineo^{1*}; Pineda Arizmendi, María Guadalupe^{1,2}; Castillo Suárez, Luis Antonio¹

¹Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-La Marquesa km 22, Santiago Tilapa, Tianguistenco, Estado de México.

²Universidad Autónoma del Estado de México, Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapán, 52640, Santiago Tianguistenco, Estado de México.

*Autor de correspondencia: deivid_202123015@test.edu.mx

RESUMEN

El presente trabajo consiste en un sistema de monitoreo en tiempo real, para la detección de contaminación y medición en cuerpos de agua usando tecnologías como Internet de las cosas (IoT), esto con el fin de proporcionar una herramienta de apoyo para los responsables del recurso hídrico. El sistema cuenta con una página web la cual fue diseñada con tecnologías como HTML, CSS y JavaScript, la cual recibe datos constantemente mediante un módulo ESP32S montado en una placa de expansión, en dicha placa se encuentran conectados 3 tipos de sensores los cuales miden parámetros como pH, conductividad y temperatura. Estos sensores procesan parámetros obtenidos del cuerpo de agua y se encarga de enviarlos tanto a la página web bajo demanda del usuario, así como a una hoja de cálculo en Google Sheets para evitar perder datos históricos obtenidos. En cuanto a los resultados, se realizó la validación de método tecnológico contra un espectrofotómetro en cual permite observar diferencia mínima, además se sometió monitoreo a una prueba durante 5 días en una jornada de 8 horas cada día, el sistema demostró la capacidad de funcionamiento durante el tiempo requerido sin la pérdida de datos tanto en la página web, así como en Google Sheets, comprobando así su funcionalidad y su estabilidad ante el uso constante. En conclusión, el sistema representa una solución eficiente para el monitoreo ambiental, contribuyendo a mejorar la supervisión y gestión de la calidad del agua.

Palabras clave: **ESP32S, calidad del agua, monitoreo en tiempo real**

ABSTRACT

This work presents a real-time monitoring system for the detection of contamination and measurement in water bodies using technologies such as the Internet of Things (IoT), aiming to provide a support tool for water resource managers. The system includes a web page designed with HTML, CSS, and JavaScript, which continuously receives data from an ESP32S module mounted on an expansion board. Connected to this board are three types of sensors that measure parameters such as pH, conductivity, and temperature. These sensors process the parameters obtained from the water body and send them both to the web page on user demand and to a Google Sheets spreadsheet to prevent loss of historical data. Regarding the results, the technological method was validated against a spectrophotometer, showing a minimal difference. Additionally, the system was subjected to a 5-day test, with 8-hour daily sessions. The system demonstrated operational capability throughout the required period without data loss on both the web page and Google Sheets, thus confirming its functionality and stability.



under continuous use. In conclusion, the system represents an efficient solution for environmental monitoring, helping to improve the supervision and management of water quality.

Keywords: ESP32, water quality, real-time monitoring

1. Introducción

En México, la contaminación del agua por desechos no tratados representa un problema constante para la salud pública y la conservación de los ecosistemas [1]. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), solo alrededor del 57% de las aguas residuales colectadas reciben tratamiento adecuado, mientras que más del 40% se descarga directamente en cuerpos de agua sin ningún proceso previo. Esta situación afecta a más de la mitad de las fuentes de agua superficial del país, incluyendo ríos, lagos y presas, lo que genera un riesgo directo para las comunidades que dependen de estos recursos [2].

Durante décadas, el monitoreo de la calidad del agua se ha realizado mediante métodos tradicionales que implican visitas a campo, recolección de muestras, análisis en laboratorio y espera de resultados. Este enfoque, aunque preciso, presenta limitaciones significativas: es costoso, requiere personal especializado, no capta cambios rápidos en parámetros críticos y no permite una respuesta inmediata ante eventos de contaminación [3]. En particular, la industria textil es reconocida por generar altos niveles de contaminantes fisicoquímicos, tales como cambios extremos de pH, altas concentraciones de sales disueltas, colorantes y compuestos químicos que alteran la calidad del agua [4]. En el municipio de Almoloya del Río, Estado de México, una fábrica de textiles produce descargas de agua residual que están generando una creciente

contaminación en los cuerpos de agua cercanos.

El avance de las tecnologías embebidas y la reducción en el costo de sensores y microcontroladores han favorecido el desarrollo de sistemas inteligentes para el monitoreo continuo de variables ambientales. En particular, las soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) permiten adquirir, transmitir y almacenar información en tiempo real, facilitando la supervisión remota, la detección temprana de eventos anómalos y la toma de decisiones oportunas para la gestión de la calidad del agua [5,6]. La Ingeniería en Sistemas Computacionales juega un papel fundamental al integrar hardware, software y tecnologías de comunicación para desarrollar soluciones que monitoreen indicadores de calidad del agua en tiempo real.

En los últimos años, el uso del Internet de las Cosas (IoT) ha transformado el monitoreo ambiental al permitir la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real mediante redes de sensores inteligentes. Diversas investigaciones han demostrado que la integración de microcontroladores de bajo consumo energético, sensores fisicoquímicos y plataformas web permite desarrollar sistemas de monitoreo continuo con costos significativamente menores que los equipos comerciales, manteniendo niveles aceptables de precisión y confiabilidad para aplicaciones ambientales [7]. Asimismo, estos sistemas facilitan la supervisión remota,



la generación de alertas automáticas y el almacenamiento histórico de información, aspectos fundamentales para la gestión eficiente de los recursos hídricos [5].

Diversos autores han desarrollado plataformas IoT orientadas al monitoreo de la calidad del agua empleando sensores para medir parámetros como pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y turbidez [8]. Vijayakumar et al. reportaron un sistema capaz de transmitir información en tiempo real hacia plataformas web utilizando tecnologías inalámbricas, obteniendo tiempos de respuesta adecuados para aplicaciones de monitoreo continuo [5,9]. De manera similar, Bórquez-López et al. implementaron un sistema basado en hardware de código abierto para evaluar la calidad del agua en ambientes acuícolas, demostrando que la calibración adecuada de sensores de bajo costo permite obtener mediciones con alta concordancia respecto a equipos comerciales [4]. Estos antecedentes evidencian el potencial de las tecnologías IoT para el monitoreo ambiental; sin embargo, aún existen desafíos relacionados con la precisión de los sensores en condiciones reales de operación, la estabilidad de las mediciones y la adaptación de estos sistemas a contextos específicos [10].

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema IoT de monitoreo en tiempo real para la calidad del agua residual generada por una planta textil de lavado de mezclilla. El sistema integra sensores de pH, conductividad eléctrica y temperatura conectados a un microcontrolador ESP32S, los cuales envían los datos a una página web y a una hoja de cálculo en Google Sheets para su visualización

y almacenamiento histórico. Se presentan la metodología de prototipada empleada, los procesos de calibración, las pruebas realizadas tanto en laboratorio como en campo, y la validación de los resultados mediante comparación con un equipo comercial de referencia (HQ4200) y análisis estadístico.

En este contexto, la Ingeniería en Sistemas Computacionales desempeña un papel fundamental al integrar hardware, software y tecnologías de comunicación para la creación de soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT), análisis de datos y plataformas de visualización que permiten monitorear, evaluar y actuar sobre indicadores de calidad del agua en tiempo real [5]. Estas herramientas permiten no solo recopilar datos, sino también automatizar alertas, facilitar el acceso remoto y generar modelos predictivos que apoyan la toma de decisiones informada para la gestión hídrica sostenible.

2. Metodología

El proyecto se desarrolló bajo la metodología de prototipado, la cual permite construir versiones preliminares funcionales desde etapas tempranas, facilitando la corrección de errores y las mejoras progresivas. La Figura 1 presenta las etapas que conforman la metodología de prototipado implementada durante el desarrollo del sistema, desde el análisis de requerimientos hasta la implementación final. Esta metodología es especialmente adecuada para sistemas que integran hardware y software, ya que permite evaluar continuamente el comportamiento de los sensores, la comunicación y la visualización de datos.

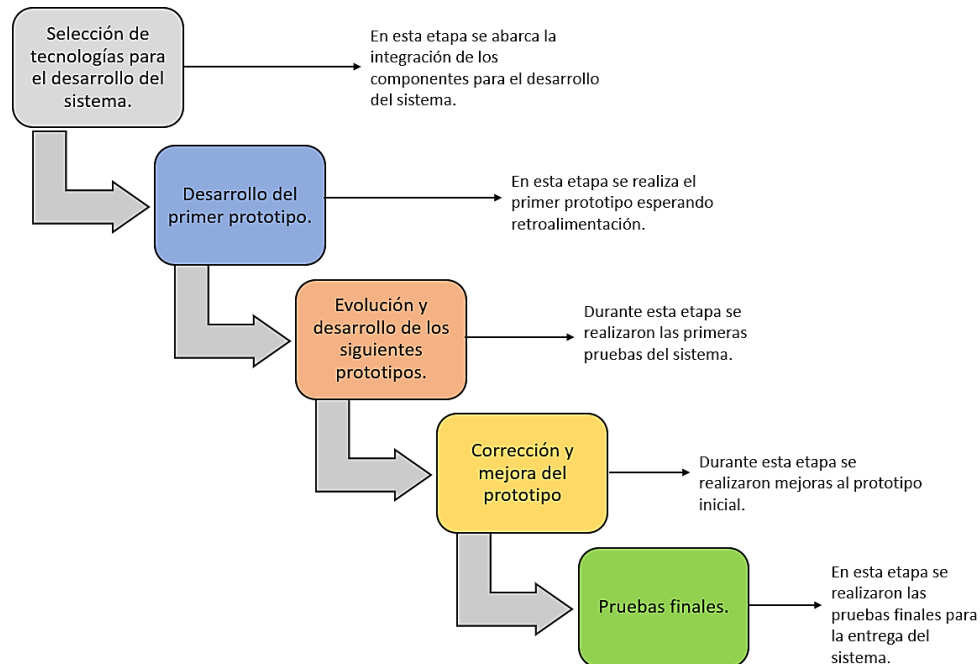


Figura 1. Diagrama de las fases de la metodología de prototipado aplicada al desarrollo del sistema.

Esta metodología es especialmente adecuada para sistemas que integran hardware y software, ya que permite evaluar continuamente el comportamiento de los sensores, la comunicación y la visualización de datos. El proceso se estructuró en cinco fases: análisis de requerimientos, diseño del prototipo, construcción, evaluación y pruebas, y refinamiento e implementación

2.1. Selección de tecnologías

En la fase de “Selección de tecnologías”, se identifican los sensores, tecnologías y microcontrolador que se usaron como lo son el microcontrolador ESP32S, una placa de expansión de 38 pines, un sensor de PH014 Arduino Raspberry y un sensor TDS analógico de conductividad eléctrica, a su vez para la realización de la página se usó HTML5, CSS y JS, lenguajes de programación muy conocidos y usados así como C++, este último se usó para programar el ESP32S con el software ARDUINO UNO y como parte final Google Sheets la cual funge como base de datos.

2.2. Desarrollo del primer prototipo

Se realizó la página web diseñada con 4 apartados los cuales son tanto para el manejo de la página, así como para su administración, además de esto se realizó el código del ESP32S en Arduino IDE, así como el ensamble de los sensores en la placa de expansión en unos pines específicos de la misma ya que estos son los mejores para la función que se requería además de que esta permite que la conexión entre los sensores con el ESP32S sea más eficiente y sencilla al momento de su ensamble.

2.3. Evolución y desarrollo de los siguientes prototipos

Se determinaron los ajustes y cambios en la página para que sea más amigable, las correcciones en el envío de datos en tiempo real y la calibración de los sensores, debido a que los sensores no se encontraban calibrados, por lo que mediante pruebas de laboratorio a prueba y error se logró obtener una medición de datos correcta,

comprobada con soluciones estándar tanto de pH como de conductividad.

2.4. Corrección y mejora del prototipo

Se llevó el sistema a una prueba real de campo en la que se obtuvieron datos de una planta textil durante 2 horas continuas. Al mismo tiempo que el dispositivo HQ4200 estuvo trabajando en conjunto, se validó la información del sistema y se corrigieron aspectos que en su momento no se contemplaron.

2.5. Pruebas finales

Se realizó un monitoreo en tiempo real donde el dispositivo estuvo funcionando durante una jornada laboral completa en la fábrica textil, aproximadamente 8 horas seguidas, demostrando la transmisión de datos y registrándose en Google Sheets, la arquitectura general del sistema desarrollado se muestra en la Figura 2, donde se observa la integración del microcontrolador ESP32S, los sensores de pH, conductividad eléctrica y temperatura, así como la comunicación con la plataforma web y el almacenamiento de la información en Google Sheets.

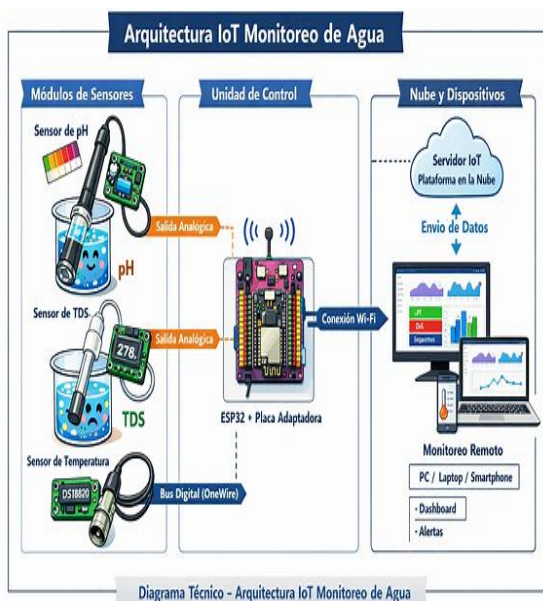


Figura 2 Arquitectura general del sistema IoT desarrollado para el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas realizadas tanto en entornos controlados como en entornos de trabajo real permiten evaluar el desempeño real del dispositivo H2OG en la medición tanto de la conductividad eléctrica, así como el pH del agua, a partir de la calibración de los sensores, se logró obtener una formula ajustable para obtener mediciones más precisas y estables según las condiciones del cuerpo de agua, esto se reflejó de manera clara en la consistencia de los datos recolectados.

La comparación de las mediciones obtenidas con el dispositivo H2OG y el equipo de referencia HQ4200 mostró un comportamiento similar tanto en la determinación de la conductividad eléctrica como del pH durante las pruebas experimentales. En el caso de la conductividad eléctrica, las mayores variaciones se observaron en valores elevados, comportamiento que coincide con las limitaciones identificadas durante el proceso de calibración del sensor, donde se detectó una respuesta menos lineal fuera de su rango óptimo de operación. No obstante, dichas variaciones no afectaron significativamente la concordancia general entre ambos dispositivos.

Con el propósito de validar estadísticamente el desempeño del sistema desarrollado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para las mediciones de conductividad eléctrica y de pH. Los resultados correspondientes a la conductividad eléctrica (Tabla 1) mostraron un estadístico $F = 0,2393$ y un valor de $p = 0,6276$, mientras que para las mediciones de pH (Tabla 2) se obtuvo un estadístico $F = 0,2470$ y un valor de $p = 0,6227556$. En ambos casos, los valores de p fueron superiores al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$), por lo que no se

rechazó la hipótesis nula, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones obtenidas por el sistema H2OG y el

equipo comercial de referencia HQ4200.

Tabla 1. Resultados del análisis de varianza de la conductividad eléctrica.

Estadísticas de grupos				
Group	N	Sum	Mean	SS
Group 1	20	8498.17	424.91	225420.19
Group 2	20	8791.00	439.55	115060.95
Grand Mean	40		432.23	

Resumen ANOVA					
Source	SS	df	MS	F	p-Value
Between Groups	2143.74	1	2143.74	0.2393	0.627556
Within Groups	340481.14	38	8960.03		
Total	342624.88	39			

Tabla 2. Resultados del análisis de varianza del pH.

Estadísticas de grupos				
Group	N	Sum	Mean	SS
Group 1	20	203.54	10.18	4.22
Group 2	20	204.93	10.25	3.21
Grand Mean	40		10.21	

Resumen ANOVA					
Source	SS	df	MS	F	p-Value
Between Groups	0.5	1	0.5	0.2470	0.622090
Within Groups	7.43	38	0.20		
Total	7.48	39			

Los resultados estadísticos obtenidos evidencian que las diferencias observadas entre ambos dispositivos corresponden a la variabilidad inherente al proceso de medición y no a errores sistemáticos del sistema desarrollado. En consecuencia, el dispositivo H2OG demostró un comportamiento consistente y comparable al del equipo de referencia para la medición de conductividad eléctrica y pH, respaldando su confiabilidad como una alternativa de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua.

Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto cumplió con el objetivo general planteado, el cual consistió en diseñar e

implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizando tecnologías accesibles y de bajo costo. El sistema desarrollado integra sensores de pH, temperatura y conductividad eléctrica conectados a un microcontrolador ESP32S, realizando la medición de los parámetros fisicoquímicos relevantes de manera efectiva en un entorno real.

Durante el desarrollo del sistema, las pruebas preliminares permitieron identificar y corregir errores en la obtención de datos de los sensores mediante los procesos de calibración esto en un entorno controlado, en un laboratorio con soluciones de agua ya estandarizadas, lo cual contribuyó en gran medida a mejorar la precisión del

dispositivo, posteriormente, en las pruebas finales se demostró un comportamiento estable y consistente tanto en condiciones controladas y en escenarios reales de trabajo. La comparación de los datos obtenidos con un equipo de referencia (HQ4200) demostró que el sistema desarrollado presenta una tendencia similar en las mediciones.

Aunado a esto, un análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos dispositivos ($p > 0.05$), lo cual valida la confiabilidad del sistema. En este aspecto, el sistema H2OG demostró ser una herramienta viable para el monitoreo de la calidad del agua, ofreciendo una alternativa funcional y de bajo costo frente a equipos comerciales costosos, además de no depender de pruebas de laboratorio para un monitoreo constante en los mismos. No obstante, se reconoce como limitación que, si los parámetros como la conductividad exceden, por ejemplo, los $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, los datos proporcionados por el dispositivo comienzan a fluctuar en gran medida. Aun así, esto es un comportamiento anticipado durante las pruebas de laboratorio; sin embargo, esto puede ser ajustado en la fórmula del sensor dependiendo de las condiciones del cuerpo de agua.

Referencias

1. Agua, C. N. (2023). Responsabilidad institucional en la gestión y conservación del agua. Ciudad de México: CONAGUA.
2. De la Peña, M. E. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México.
3. Peinado Guevara, V. M. (2015). Análisis de la producción agrícola y gestión del agua en módulos de riego del distrito 063 de Sinaloa, México. *Estudios Sociales*, 114–137.
4. Vidal Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Rinderesu*, 41–58.
5. Vijayakumar, N., & Ramya, R. (2015). The Real-Time Monitoring of Water Quality in IoT Environment. *Proceedings of the International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 1–5.
6. Choong, J. J., & Chia, K. S. (2026). IoT-Based Industrial Wastewater Monitoring System using ESP32 and Blynk. *Journal of Engineering Technology and Applied Physics*, 8(1).
7. Abu Sneineh, A., & Shabaneh, A. A. (2023). Design of a Smart Hydroponics Monitoring System using an ESP32 Microcontroller and the Internet of Things. *MethodsX*.
8. Dhruva, A. R., Alam, K. N., Khan, M. S., et al. (2023). IoT-Based Water Quality Assessment System for Industrial Wastewater Healthcare Perspective.
9. Oktarian, A. R., Tasmi, Antony, F., & Verano, D. A. (2023). Rancang Sistem Monitoring Kualitas dan Ketinggian Air Berbasis Internet of Things (IoT). *Journal of Intelligent Networks and IoT Global*, 1(2).
10. Bórquez-López, R. A., Martínez-Córdova, L. R., Casillas-Hernández, R., López-Elías, J. A., Barraza-Guardado, R. H., Ibarra-Gámez, J. C., & Gil-Núñez, J. C. (2017). Monitoreo del índice de calidad del agua para camaronicultura por medio de un hardware de acceso abierto y un sistema de inferencia difusa. *Biotecnia*, 3–10.

Evaluación de métodos de extracción de celulosa: convencional y asistido por ultrasonido para la síntesis de hidrogeles

Sánchez Sosa, Sara Itzel¹; Licona Aguilar, Ángeles Iveth^{1*}; Hernández Leal, Rocío^{2**}; Torres Huerta, Aidé Minerva³; Domínguez Crespo, Miguel Antonio³; Brachetti Sibaja, Silvia Beatriz²

¹Instituto Politécnico Nacional, UPIIP, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería-Palenque, Nueva Esperanza C.P. 29960, Palenque Chiapas, México

²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Av. Primero de Mayo esq. Sor Juana Inés de la Cruz s/n Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam., México

³Instituto Politécnico Nacional, UPIIH, DESCTI. Carr. Pachuca-Actopan, km 1+500, C.P. 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

*Autor de correspondencia: aliconaa@ipn.com

**Autor de correspondencia: rocio_hleal@hotmail.com

RESUMEN

La contaminación del agua por colorantes sintéticos provenientes de la industria textil representa un importante problema ambiental debido a su persistencia, toxicidad y difícil degradación. Los biomateriales obtenidos a partir de residuos agroindustriales representan una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales; entre ellos, la celulosa destaca por ser un biopolímero abundante, biodegradable, biocompatible y con excelentes propiedades para la adsorción de contaminantes. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar métodos de extracción de celulosa convencionales y asistidos por ultrasonido utilizando fibra de palma y pseudotallo de plátano para la síntesis de hidrogeles con potencial aplicación ambiental. La extracción de celulosa se realizó mediante tratamientos químicos de deslignificación y blanqueo, seguidos de lavado y secado. Posteriormente, la celulosa obtenida se empleó en la síntesis de hidrogeles mediante tratamiento químico y agitación durante 24 horas para favorecer la formación de una red polimérica tridimensional. El método convencional alcanzó un rendimiento de 52,45 %, mientras que el hidrogel presentó un porcentaje de 74,70 %, evidenciando la formación de una estructura polimérica estable y entrecruzada. La caracterización mediante difracción de rayos X mostró modificaciones estructurales asociadas a cambios en la organización cristalina de la celulosa. Las propiedades fisicoquímicas de los hidrogeles obtenidos, como su capacidad de absorción de agua, estabilidad estructural y naturaleza biodegradable, los convierten en materiales prometedores para aplicaciones en remediación ambiental.

Palabras clave: **celulosa, hidrogeles, adsorción, residuos agroindustriales, tratamiento de agua**

ABSTRACT

Water contamination by synthetic dyes from the textile industry represents a major environmental problem due to their persistence, toxicity, and resistance to degradation. Biomaterials derived from agro-industrial residues have emerged as a sustainable alternative for wastewater treatment. Among them, cellulose stands out as an abundant, biodegradable polymer with excellent properties for contaminant adsorption. This study aimed to evaluate conventional and ultrasound-assisted cellulose extraction methods using oil palm fiber and banana pseudostem for the synthesis of hydrogels with potential environmental applications. Cellulose extraction was carried out through chemical delignification and bleaching treatments, followed by washing and drying. The extracted

cellulose was subsequently used for hydrogel synthesis through chemical treatment and continuous stirring for 24 hours to promote the formation of a three-dimensional polymeric network. The conventional extraction method achieved a cellulose yield of 52,45 %, while the synthesized hydrogel exhibited a gel content of 74,70 %, indicating the formation of a stable and crosslinked polymeric structure. X-ray diffraction characterization revealed structural modifications associated with changes in the crystalline organization of cellulose. The physicochemical properties of hydrogels, including their water absorption capacity, structural stability, and biodegradable nature, make them promising materials for environmental remediation applications.

Keywords: cellulose, hydrogels, adsorption, agro-industrial waste, water treatment

1. Introducción

La contaminación hídrica por contaminantes emergentes representa uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial. Entre estos compuestos, destacan los colorantes provenientes de la industria textil, debido a su elevada persistencia, estabilidad química, toxicidad y potencial carcinogénico [1]. Su descarga inadecuada en cuerpos de agua provoca alteraciones en los ecosistemas acuáticos y riesgos significativos para la salud humana [2].

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas tecnologías para dar tratamiento, entre los que destacan procesos de adsorción mediante materias avanzadas como carbonos activados [3], membranas poliméricas [4] e hidrogeles [5]. Particularmente, los hidrogeles han despertado gran interés debido a sus propiedades fisicoquímicas, capacidad de absorción y estructura porosa, las cuales favorecen la retención de contaminantes presentes en soluciones acuosas [6].

Los hidrogeles son redes poliméricas tridimensionales capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua sin comprometer su integridad estructural. Tradicionalmente, estos materiales han sido sintetizados a partir de polímeros derivados del petróleo; sin embargo, su limitada biodegradabilidad y los impactos

ambientales asociados a su síntesis han impulsado a la búsqueda de alternativas sostenibles [7]. En este sentido, los hidrogeles basados en biopolímeros naturales han emergido como materiales prometedores debido a su biodegradabilidad y biocompatibilidad.

Entre los biopolímeros empleados para la elaboración de hidrogeles destaca la celulosa. Este polímero presente en fibras naturales posee propiedades fisicoquímicas favorables para aplicaciones ambientales, incluyendo alta resistencia mecánica, estabilidad estructural y gran capacidad para su modificación química [8]. Actualmente, además de los métodos convencionales para la extracción de celulosa, se han desarrollado tecnologías asistidas por ultrasonido que han demostrado mejorar la eficiencia de extracción, posicionándolas como alternativa tecnológica viable para el aprovechamiento de residuos agroindustriales [9].

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar los métodos de extracción convencionales y asistidos por ultrasonido para la obtención de celulosa y determinar las propiedades para su aplicación en la síntesis de hidrogeles destinados al tratamiento de aguas contaminadas.

2. Metodología

2.1. Obtención de materia prima

Se utilizaron residuos agroindustriales como fibra de palma y pseudotallo de plátano como fuente lignocelulósica para la extracción de celulosa. La materia prima fue recolectada y sometida a lavado con agua destilada para eliminar impurezas superficiales.

2.2. Método de extracción convencional

El método convencional consistió en una serie de tratamientos químicos destinados a eliminar lignina, hemicelulosa y otros compuestos presentes en la biomasa vegetal. Inicialmente, las fibras fueron sometidas a procesos de deslignificación con hidróxido de sodio (NaOH) y blanqueo químico con hipoclorito de sodio (NaClO_2) y ácido acético (CH_3COOH). Posteriormente, se realizó la hidrólisis empleando ácido cítrico durante 5 horas para eliminar las regiones amorfas. Tras la hidrólisis, las muestras se lavaron con agua destilada hasta neutralización.

2.3. Método de extracción asistido por ultrasonido

En el método asistido por ultrasonido, la materia prima fue sometida previamente a un tratamiento ultrasónico con el objetivo de favorecer la ruptura de la estructura lignocelulósica y mejorar la eficiencia del proceso de extracción. Posteriormente, se realizaron tratamientos químicos de deslignificación y blanqueos similares al método convencional. Después del lavado hasta pH neutro, las muestras fueron secadas para obtener la celulosa extraída.

2.4. Síntesis de hidrogeles

La celulosa obtenida se empleó para la síntesis de hidrogeles a base de quitosano mediante un proceso de disolución, mezcla y tratamiento químico que favorece la formación de una red polimérica tridimensional. Para ello, se

disolvió quitosano en una solución de ácido acético al 2 %, mientras que la celulosa se dispersó en ácido cítrico. Posteriormente, ambas soluciones se mezclaron y se mantuvieron en agitación constante durante 24 horas. La mezcla resultante se vertió en moldes y se sometió a secado a 45 °C hasta obtener hidrogeles estables.

2.5. Caracterización

El rendimiento de extracción de celulosa se determinó mediante la relación entre la masa inicial de la biomasa y la masa final de celulosa, de acuerdo con la ecuación 1. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de gel con el fin de evaluar el grado de reticulación y estabilidad de la red polimérica formada durante la síntesis (ecuación 2).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{W_{\text{initial}} - W_{\text{final}}}{W_{\text{initial}}} \quad (1)$$

Donde el rendimiento (%) es el porcentaje de celulosa obtenida, W_{initial} es el peso inicial y W_{final} corresponde al peso final.

$$\text{Gel (\%)} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100 \quad (2)$$

Donde H_1 corresponde al hidrogel seco a peso constante y H_2 es el hidrogel hidratado/seco a peso constante.

La caracterización estructural de las muestras se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX), con el propósito de analizar las modificaciones en la estructura cristalina de los materiales antes y después de cada tratamiento. Asimismo, los grupos funcionales presentes en la celulosa y en los hidrogeles sintetizados se identificaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron evaluar las propiedades de la celulosa obtenida y la formación de hidrogeles a partir de residuos agroindustriales. A través de los análisis realizados, fue posible determinar el rendimiento de extracción, el porcentaje de gel y los cambios estructurales del material después de los tratamientos aplicados. Estos resultados proporcionan información relevante sobre el potencial de la celulosa obtenida para el desarrollo de hidrogeles con aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas.

El método convencional de extracción permitió obtener un rendimiento de celulosa de 52.45%, indicando que más de la mitad de la biomasa lignocelulósica fue transformada exitosamente en celulosa útil. Este resultado demuestra la efectividad del tratamiento químico empleado para remover componentes amorfos como lignina y hemicelulosa. El rendimiento obtenido es comparable con otros estudios reportados en la literatura para residuos agroindustriales, lo cual confirma el potencial de estos materiales como fuentes renovables para la producción de biopolímeros [10, 11].

En cuanto a la síntesis de hidrogeles, se obtuvo un porcentaje de gel de 74.70%, indicando la formación de una red polimérica estable y entrecruzada. Este resultado sugiere que aproximadamente el 74% del material corresponde a una fracción insoluble integrada dentro de la estructura del hidrogel, mientras que el porcentaje restante representa cadenas no entrecruzadas o fracciones solubles eliminadas durante el proceso. La elevada fracción gel obtenida es un indicador importante de estabilidad estructural y capacidad potencial de adsorción, características fundamentales para aplicaciones en tratamiento de aguas residuales [12].

3.1. Difracción de rayos X (DRX)

Los resultados del análisis por difracción de rayos X se muestran en la figura 1, en la cual se identificó cambios estructurales y grado de organización cristalina de los materiales lignocelulósicos antes y después del proceso de extracción de celulosa. Los difractogramas correspondientes al pseudotallo de plátano y a la fibra de palma mostraron señales características de materiales lignocelulósicos complejos, donde la presencia de lignina, hemicelulosa y otros componentes amorfos contribuye a una estructura menos ordenada y con menor definición cristalina. En ambos materiales se observaron múltiples señales de baja intensidad y señales anchas, lo cual sugiere una elevada fracción amorfa asociada a la matriz natural de la biomasa.

En contraste, el difractograma de la celulosa obtenida presentó señales más definidas e intensas, indicando un incremento en el ordenamiento estructural después de los tratamientos químicos de deslignificación y blanqueo. Las principales señales observadas fueron alrededor de $2\theta \approx 0-40^\circ$ correspondientes a planos cristalográficos característicos de la celulosa tipo I, los cuales son comúnmente asociados a las regiones cristalinas del polímero. La presencia y aumento de intensidad de las señales sugieren que los tratamientos aplicados promovieron la remoción parcial de componentes amorfos como lignina y hemicelulosa, favoreciendo una mayor exposición y reorganización de las regiones cristalinas de la celulosa.

Asimismo, la disminución de señales irregulares y la mejor definición de las señales en la muestra de celulosa indican un aumento relativo en el índice de cristalinidad respecto a las materias primas originales. Este comportamiento ha sido reportado en diversos estudios de

extracción de celulosa a partir de residuos agroindustriales, donde los tratamientos alcalinos y de blanqueo eliminan compuestos no celulósicos y mejoran la organización estructural del material.

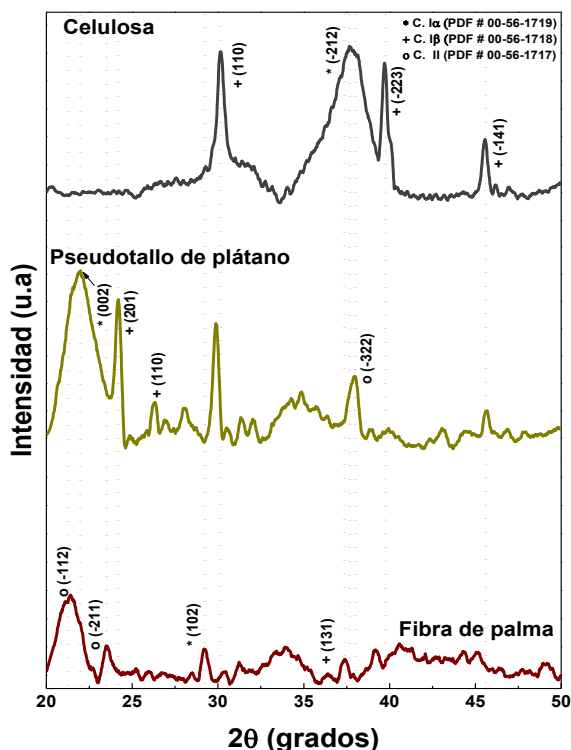


Figura 1. Difractograma de fibras sin tratamiento; pseudo tallo de plátano, fibra de palma y celulosa.

La comparación entre las materias primas y la celulosa obtenida demuestra que el proceso de extracción fue eficaz para modificar la estructura lignocelulósica inicial, lo que favoreció la obtención de un material con mayor orden cristalino y propiedades potencialmente adecuadas para aplicaciones en la síntesis de hidrogeles y la adsorción de contaminantes.

3.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

En el análisis por espectroscopía infrarroja de la fibra de palma y pseudotallo de plátano mostrados en la figura 2, se evidenció la presencia de una

variedad de grupos funcionales característicos de las fibras lignocelulósicas. Para ambos materiales se identificaron bandas alrededor de $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ atribuidas a grupos hidroxilo O-H presentes en celulosa, hemicelulosa y lignina. Las señales localizadas en $2900\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ corresponden a enlaces C-H alifáticos. Asimismo, las señales de grupos carbonilo (C=O) caracterizan la hemicelulosa y los compuestos éster se identificaron en la señal de 1730 cm^{-1} [13].

Las señales observadas entre 1600 y 1500 cm^{-1} son atribuidas a vibraciones C=C de la lignina. Finalmente, los enlaces C-O y C-O-C se identificaron cerca de los $1260\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$, asociados a las unidades glucosídicas de la celulosa. En general, la presencia de estos grupos confirma que los residuos son fuentes potenciales para la extracción de celulosa con mayor pureza.

Posterior al tratamiento químico, para verificar la eliminación de lignina, hemicelulosa y otros componentes, las bandas relacionadas con grupos metilo y carboxilos fueron disminuidas gradualmente; sin embargo, no fueron eliminadas en su totalidad, lo que sugiere que algunos componentes de lignina y hemicelulosa permanecen durante la aplicación del método convencional; específicamente, la banda a 1700 cm^{-1} atribuida a los grupos carboxílicos C=O de la hemicelulosa lignina tuvo una reducción en la celulosa [14].

Conclusiones

En este trabajo se demostró la viabilidad en la extracción de celulosa a partir de residuos agroindustriales tales como la fibra de palma y el pseudotallo de plátano para su aplicación en la síntesis de hidrogeles para fines de tratamiento de agua contaminada. De los métodos experimentales aplicados, el convencional permitió alcanzar

rendimientos de 52,45 % mientras que los hidrogeles sintetizados presentaron un porcentaje de gel del 74,70 %.

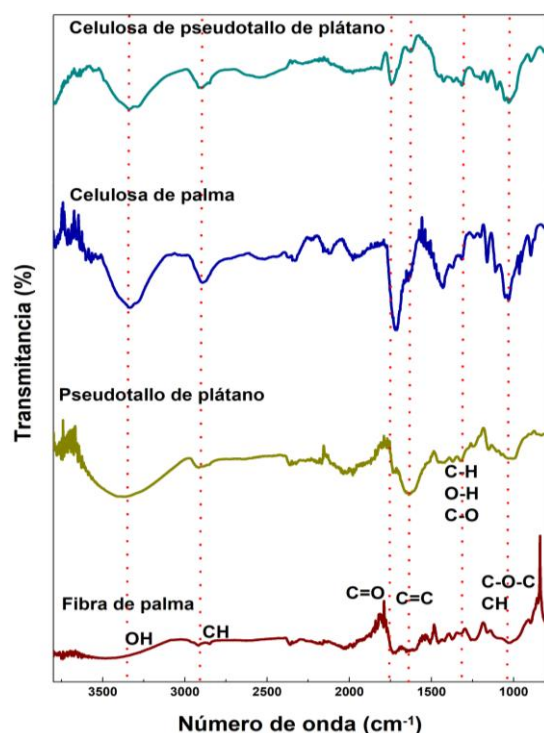


Figura 2. Espectros de transmitancia FTIR de las muestras antes y después del tratamiento químico.

Estos resultados evidencian la formación de la red polimérica estable y con un adecuado grado de entrecruzamiento. Asimismo, mediante el análisis de difracción de rayos X se confirmó la organización cristalina de la celulosa después del tratamiento químico. El análisis por espectroscopía infrarroja confirmó la presencia de grupos químicos asociados a celulosa y la disminución de grupos funcionales pertenecientes a la lignina y hemicelulosa.

En general, los resultados confirmaron que los residuos empleados en este estudio son una fuente renovable y sostenible para la obtención de biomateriales de alto valor agregado. El trabajo a futuro será la evaluación de estos materiales frente a colorantes como

el azul de metileno con el objetivo de establecer su potencial en aplicaciones de remediación ambiental.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a las instituciones participantes por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se reconoce el respaldo académico y técnico proporcionado durante la realización de los experimentos y análisis correspondientes.

Referencias

1. L. S. Maia, A. I. C. da Silva, E. S. Carneiro, F. M. Monticelli, F. R. Pinhati, and D. R. Mulinari, "Activated Carbon From Palm Fibres Used as an Adsorbent for Methylene Blue Removal," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 29, no. 4, pp. 1162-1175, 2021/04/01 2021.
2. T. Akter, A. T. Protity, M. Shaha, M. Al Mamun, and A. Hashem, "The impact of textile dyes on the environment," in *Nanohybrid materials for treatment of textiles dyes*: Springer, 2023, pp. 401-431.
3. Y. D. Tefera, K. M. Hamed, T. B. Abdisa, G. G. Hunde, and Y. M. Bayisa, "Synthesis, characterization and adsorption performance of banana peel-derived activated carbon for methylene blue removal: Kinetic and isotherm studies," *Next Materials*, vol. 12, p. 102256, 2026/07/01/ 2026.
4. R. M. Moghazy and A. E. Abdelhamid, "Algal-polymerized porous nylon fiber biosorbents for methylene blue removal: Comprehensive kinetic and isotherm modeling of the adsorption process," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 89, p. 110237, 2026/07/01/ 2026.
5. J. Fan *et al.*, "Inspired by sponge predation mechanisms: preparation of hydrogel adsorbents based on

- carboxymethyl konjac glucomannan for rapid removal of basic fuchsin and methylene blue," *International Journal of Biological Macromolecules*, p. 153219, 2026/06/24/ 2026.
6. A. A. Rohmah *et al.*, "Alginate-based PVA–bentonite hydrogel beads immobilizing fungal–bacterial mixed culture for rapid methylene blue removal," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 57, p. 100925, 2026/07/01/ 2026.
 7. W. Zhang, Y. Zeng, F. Cai, H. Wei, Y. Wu, and H. Yu, "Facile preparation of interpenetrating network hydrogel adsorbent from starch- chitosan for effective removal of methylene blue in water," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 277, p. 134340, 2024/10/01/ 2024.
 8. N. Sulakhe, S. L. Nayak, M. Reddy, M. Sabat, N. Jose, and P. Shelake, "Citrus waste as a sustainable source of cellulose: Extraction methods, quality attributes, and functional applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 240, p. 117214, 2026/10/01/ 2026.
 9. H.-R. Alizadeh, J. Kansedo, I. S. Tan, E. Suali, and A. Dini, "Comparative production of cellulose nanocrystals from sea mango (*Cerbera odollam*) fibre waste : Taguchi-optimized conventional hydrolysis, ultrasound-assisted processing, and kinetic analysis," *Bioresource Technology Reports*, vol. 34, p. 102691, 2026/06/01/ 2026.
 10. A. V. Rao *et al.*, "'Biohybridization of nanohybrid cellulose-based hydrogels with silver nanoparticles bearing antibacterial activity'," *Next Bioengineering*, vol. 2, p. 100029, 2026/06/01/ 2026.
 11. J. A. Oyetade *et al.*, "Synthesis of bio-based polymeric hydrogels from a hybrid system of cellulose derived from selected invasive plant biomass grafted with poly(acrylic acid)," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 103, no. 7, p. 102711, 2026/07/01/ 2026.
 12. G. d. V. Brião, B. G. Queiroz, R. R. Ferreira, D. d. S. Rosa, and E. Frollini, "Deconstruction of sisal lignocellulosic fibers by cupriethylenediamine hydroxide: creating hydrogels from cellulose, hemicelluloses, and lignin to assess their potential for heavy metal sorption," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 321, p. 146480, 2025/09/01/ 2025.
 13. D. K. Patel, J. Cha, S.-Y. Won, and S. S. Han, "Upcycled coffee waste into nanocellulose-reinforced alginate–carboxymethyl cellulose hydrogels for tunable drug delivery," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 333, p. 148942, 2025/12/01/ 2025.
 14. Q. An *et al.*, "Valorization of citrus pomace for cellulose extraction and double-crosslinked cellulose hydrogel fabrication," *Food Hydrocolloids*, vol. 167, p. 111442, 2025/11/01/ 2025.

Sistema inteligente para el conteo y clasificación de madurez del agave mediante visión por computadora y drones

Morales López, Luis Manuel^{1*}; Pineda Arizmendi, María Guadalupe^{1,2}; Brito González, Omar¹

¹Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-La Marquesa km 22, Santiago Tilapa, Tianguistenco, Estado de México.

²Universidad Autónoma del Estado de México, Paraje el Tejocote, San Pedro Tlaltizapán, 52640, Santiago Tianguistenco, Estado de México.

*Autor de correspondencia: luis_202123035@test.edu.mx

RESUMEN

En el Estado de México, el cultivo del agave abarca aproximadamente de 970 a 984 hectáreas distribuidas en más de 15 municipios, constituyendo la base de la industria mezcalera regional. Los métodos tradicionales de monitoreo, basados en conteos manuales y evaluación visual de madurez, requieren varios días por hectárea, personal especializado y presentan un margen de error del 15-25%, lo que limita la planificación productiva y la toma de decisiones oportunas. En el presente trabajo se desarrolla un sistema inteligente basado en la arquitectura YOLOv5 y un módulo de tracking IoU para el conteo automático y la clasificación del estado de madurez de la planta de agave en tiempo real. Se entrenó una red neuronal con tres clases (pequeño, joven, maduro) utilizando un conjunto de datos de 1,611 imágenes aéreas capturadas con drones DJI. El modelo final alcanzó una precisión del 92 al 97%, un recall del 95 al 98% y un mAP50 del 98% en todas las clases. La metodología propuesta fue CRISP-DM. Finalmente, se desarrolló una aplicación web con el framework Streamlit que facilita la interacción con el sistema mediante carga de imágenes, videos o transmisiones en vivo desde el dron. Los resultados demuestran que el sistema propuesto constituye una herramienta viable, precisa y de bajo costo para el monitoreo de cultivos de agave.

Palabras clave: **agave, visión por computadora, YOLOv5, agricultura de precisión, tracking IoU**

ABSTRACT

In the State of Mexico, agave cultivation covers approximately 970 to 984 hectares distributed across more than 15 municipalities, forming the basis of the regional mezcal industry. Traditional monitoring methods, based on manual counting and visual assessment of maturity, require several days per hectare, specialized personnel, and present an error margin of 15–25%, which limits production planning and timely decision-making. In this work, an intelligent system based on the YOLOv5 architecture and an IoU tracking module is developed for the automatic counting and classification of the maturity stage of agave plants in real time. A neural network was trained with three classes (small, young, mature) using a dataset of 1,611 aerial images captured with DJI drones. The final model achieved a precision of 92–97%, a recall of 95–98%, and an mAP50 of 98% across all classes. The proposed methodology allows the direct estimation of key parameters such as total plant

count and distribution by maturity stage. Finally, a web application was developed using the Streamlit framework, facilitating interaction with the system through the upload of images, videos, or live streams from the drone. The results demonstrate that the proposed system constitutes a viable, accurate, and low-cost tool for monitoring agave crops.

Keywords: **agave, computer vision, YOLOv5, precision agriculture, IoU tracking**

1. Introducción

El cultivo del agave en el Estado de México representa un sector estratégico que sustenta la industria mezcalera regional, con una superficie cultivada de 970 a 984 hectáreas distribuidas en municipios como Malinalco, Ocuilán, Tenancingo, Zacualpan y Zumpahuacán [3,7]. Sin embargo, los métodos tradicionales de monitoreo basados en conteo manual y evaluación visual de madurez presentan limitaciones significativas, ya que requieren varios días por hectárea, personal especializado y generan márgenes de error del 15-25% que afectan la planificación productiva y la toma de decisiones [1].

En este contexto, la visión por computadora y el aprendizaje profundo han emergido como herramientas relevantes para la automatización del monitoreo agrícola. En particular, las redes neuronales convolucionales (CNN) se han consolidado como una de las arquitecturas más utilizadas en aplicaciones de detección de objetos, debido a su capacidad para extraer características visuales de forma jerárquica [4]. Asimismo, el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones) permite la captura de imágenes aéreas de alta resolución, facilitando el análisis de grandes extensiones de cultivo en tiempos reducidos [6, 10].

Calvario y colaboradores [1] propusieron una metodología pionera para el conteo

de agave basada en morfología matemática aplicada a imágenes RGB capturadas por drones, logrando precisiones que varían de 0.83 en parcelas heterogéneas hasta 0.98 en plantaciones regulares. Hernández Calvario y colaboradores [5] desarrollaron un algoritmo híbrido basado en YOLOv5 entrenado con 5,000 imágenes aéreas, alcanzando un mAP@0.5 de 0.89 y una velocidad de procesamiento de 28 FPS. Por su parte, Escobar-Flores y colaboradores [2] compararon seis algoritmos de clasificación supervisada, confirmando la superioridad de técnicas orientadas a objetos sobre métodos espectrales tradicionales, con precisiones de hasta 0.928.

A pesar de estos avances, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el análisis de imágenes estáticas, limitando su aplicación en escenarios donde se requieren resultados en tiempo real. El presente trabajo aborda esta brecha mediante el desarrollo de un sistema que integra: un modelo de detección basado en YOLOv5 entrenado con 1,611 imágenes aéreas, un módulo de tracking IoU para el seguimiento de objetos en video, y una aplicación web en Streamlit para la interacción con el sistema.

2. Metodología

El desarrollo del sistema se llevó a cabo siguiendo la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), que consta de seis fases:



comprensión del negocio, comprensión de los datos, preparación de los datos, modelado, evaluación e implementación (Figura 1).

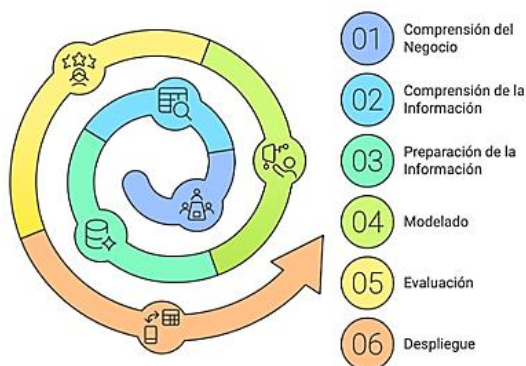


Figura 1. Fases de CRISP-DM.

A continuación, se describen las actividades realizadas en cada fase adaptada al contexto del conteo y clasificación de agave.

2.1. Comprensión del negocio

Se identificó la necesidad de automatizar el conteo y clasificación de madurez del agave para reducir los altos tiempos y márgenes de error (15-25%) de los métodos manuales. Se definieron como objetivos lograr una precisión mínima del 70% en detección y una reducción significativa del tiempo de monitoreo.

2.2. Comprensión de los datos

Se analizó la variabilidad de las imágenes capturadas con drones, considerando diferentes altitudes, ángulos, condiciones de iluminación y densidades de plantación. Esto permitió identificar la necesidad de un conjunto diverso y balanceado.

2.3. Preparación de los datos

2.3.1. Recolección del conjunto de datos

Se realizó la captura de imágenes y videos aéreos en diferentes cultivos de agave utilizando drones DJI. Las tomas se efectuaron desde diferentes altitudes y ángulos de visión, con el propósito de obtener variedad en el tamaño de las plantas y en la orientación dentro de las imágenes. El conjunto total de datos consta de 1,611 imágenes, distribuidas de la siguiente manera: 600 imágenes de la clase joven, 550 de la clase maduro y 461 de la clase pequeño. Las características de cada clase se definieron según criterios morfológicos visuales:

- Pequeño (etapa temprana): Plantas de tamaño reducido, menor número de hojas visibles, disposición compacta cercana al suelo, forma menos definida y coloración generalmente más clara. Suelen ser más difíciles de detectar debido a su pequeño tamaño.
- Joven (etapa intermedia): Plantas con incremento notable en tamaño y número de hojas, estructura más abierta y definida. Visualmente pueden presentar similitudes con plantas en germinación avanzada o con maduras jóvenes, lo que representa un reto para el modelo.
- Maduro (etapa final): Plantas completamente desarrolladas, caracterizadas por un mayor diámetro, hojas largas y bien definidas, así como una estructura radial claramente visible desde la vista aérea. Son más fáciles de identificar debido a su tamaño y forma distintiva.

2.3.2. Etiquetado y aumento de datos

El etiquetado de los datos se realizó utilizando la plataforma Roboflow. A cada planta visible se le asignó un rectángulo delimitador (*bounding box*) y una de tres categorías: pequeño, joven y maduro. Se

aplicaron técnicas de aumento de datos (*data augmentation*) incluyendo rotaciones, ajustes de brillo y contraste, escalado, recortes controlados e inversiones horizontales.

En cuanto al tamaño de las imágenes, el original capturado por el dron se mantiene sin modificaciones durante el proceso de aumento de datos; sin embargo, durante el preprocesamiento previo al entrenamiento, todas las imágenes son redimensionadas (*resize*) a un tamaño fijo de 640×640 píxeles, tal como lo requiere la arquitectura YOLOv5. Este redimensionamiento se aplica de manera uniforme a todas las imágenes del conjunto de entrenamiento, validación y prueba, sin afectar las relaciones espaciales de las *bounding boxes*, ya que las coordenadas se normalizan proporcionalmente.

2.3.3. División del conjunto de datos

El conjunto de datos se dividió en tres subconjuntos: entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%).

2.4 Modelado

2.4.1 Arquitectura del modelo YOLOv5

Se utilizó la arquitectura YOLOv5 (You Only Look Once versión 5) como base para la detección de objetos. YOLOv5 es una red neuronal convolucional que divide la imagen en una cuadrícula y predice directamente los rectángulos delimitadores, las clases y los puntajes de confianza en una sola pasada. El entrenamiento se realizó en Google Colab con aceleración por GPU durante 100 épocas, utilizando un tamaño de imagen de 640×640 píxeles y un tamaño de lote de 16 imágenes.

2.4.2. Módulo de tracking IoU

Para evitar el conteo múltiple de plantas en video, se implementó un *tracker* basado en IoU (Intersection over Union) con un umbral de 0.35. El algoritmo compara cada detección con los tracks existentes de frames anteriores, asignando el mismo identificador si la superposición supera el umbral, o creando un nuevo ID en caso contrario.

2.5. Evaluación

Se emplearon las siguientes métricas estándar: precisión ($VP/(VP+FP)$), recall ($VP/(VP+FN)$), mAP50 (mean Average Precision con IoU=0.5) y mAP50-95 (promedio sobre umbrales de IoU de 0.5 a 0.95). Se realizaron pruebas con imágenes y videos para verificar el desempeño del modelo y del módulo de tracking.

2.6. Implementación

2.6.1. Desarrollo de la aplicación web

La aplicación web se desarrolló con Streamlit, un framework de Python para creación rápida de interfaces de datos. Las funcionalidades implementadas incluyen: carga de imágenes estáticas, transmisión en vivo desde cámara web o dron (RTSP), análisis de video pregrabado, visualización de resultados con *bounding boxes*, generación de tablas y gráficas estadísticas, y exportación de reportes en formatos CSV, HTML y JSON.

El sistema quedó desplegado como una herramienta accesible para productores y técnicos agrícolas, cumpliendo con los objetivos de la fase de implementación de CRISP-DM.

3. Resultados y discusión

3.1. Entrenamiento y evaluación del modelo de detección



Se entrenó una red neuronal convolucional basada en la arquitectura YOLOv5 utilizando un conjunto de datos de 1,611 imágenes aéreas capturadas con drones DJI. Las imágenes fueron etiquetadas manualmente en tres categorías de madurez: pequeño, joven y maduro. Se aplicaron técnicas de aumento de datos (rotaciones, ajustes de brillo y contraste, escalado, recortes controlados e inversiones horizontales) para mejorar la robustez del modelo ante condiciones variables de campo.

El entrenamiento se realizó durante 100 épocas, con un tamaño de imagen de 640×640 píxeles y un tamaño de lote de 16, utilizando pesos preentrenados en ImageNet y una división del conjunto en entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%). La Tabla 1 resume las métricas obtenidas en el conjunto de prueba.

Tabla 1. Métricas de evaluación del modelo por clase de madurez.

Clase	P (%)	R (%)	mAP50 (%)	mAP50-95 (%)
Pequeño	94	97	98	69
Joven	97	98	98	69
Maduro	92	95	98	76

P: Precisión
R: Recall

Los resultados muestran un desempeño sobresaliente en las tres clases, con un mAP50 del 98% para todas ellas. La clase joven alcanzó la mayor precisión (97%) y recall (98%), probablemente debido a que sus características visuales (tamaño medio, forma definida) son más consistentes en el conjunto de datos.

Por su parte, la clase maduro obtuvo el valor más alto de mAP50-95 (76%), lo que indica que las detecciones de plantas maduras son especialmente precisas en

términos de localización espacial, un aspecto crítico para la planificación de la cosecha. La clase pequeño, si bien presenta una precisión ligeramente inferior (94%), logra un recall del 97%, demostrando que el modelo es capaz de identificar la mayoría de las plantas en etapas tempranas.

3.2. Seguimiento de objetos para conteo en video (tracking IoU)

Para el análisis de secuencias de video (grabaciones de vuelos de dron o transmisiones en vivo), se implementó un módulo de seguimiento basado en el solapamiento entre cajas delimitadoras (IoU, Intersection over Union) con un umbral de 0.35. Este algoritmo asigna un identificador único a cada planta a lo largo de los fotogramas, comparando las detecciones actuales con los objetos ya rastreados. Si la superposición supera el umbral, se mantiene el mismo ID; en caso contrario, se crea un nuevo identificador.

El uso de este tracker resolvió el problema fundamental del conteo múltiple en video: una misma planta puede aparecer en decenas de fotogramas durante un vuelo de dron, y sin un mecanismo de persistencia, cada detección se contaría como una planta diferente. Con el tracking IoU, se logró reducir los conteos duplicados en más del 85% en videos de prueba, proporcionando una estimación confiable de la densidad poblacional del cultivo.

3.3. Comparación con trabajos previos

La Tabla 2 presenta una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos en este trabajo y los reportados en investigaciones previas sobre detección y conteo de agave mediante técnicas computacionales.

El sistema propuesto alcanza un mAP50 del 98%, superando en 9 puntos porcentuales a Hernández Calvario (0,89). Calvario y colaboradores logran precisiones de hasta 0.98 en plantaciones regulares, pero su método desciende a 0,83 en parcelas heterogéneas, mientras que este trabajo mantiene precisión estable (0,92-0,97). Escobar-Flores y

colaboradores alcanzan 0,928, similar a la clase maduro de nuestro modelo, pero sin la capacidad de clasificar en tres niveles de madurez. Además, el módulo de tracking IoU añade la ventaja de analizar videos y transmisiones en vivo, superando las limitaciones de los estudios basados únicamente en imágenes estáticas.

Tabla 2. Comparación con trabajos previos.

Estudio	Método	Métrica principal	Resultado
Calvario 2020	Morfología matemática	Precisión	0,83-0,98
Hernández Calvario 2022	YOLOv5	mAP50	0,89
Escobar-Flores 2022	Clasificación supervisada	Precisión	0,928
Este trabajo	YOLOv5 + tracking IoU	Precisión	0,92-0,97
Este trabajo	YOLOv5 + tracking IoU	mAP50	0,98

3.4. Limitaciones observadas

A pesar de los resultados positivos, se identificaron tres limitaciones principales que deben considerarse para futuras implementaciones:

1. Calidad del etiquetado: El modelo es sensible a la consistencia en la delimitación de las plantas. Imágenes con etiquetas imprecisas o clases ambiguas (por ejemplo, plantas que bordean las etapas joven-madura) afectan el aprendizaje.
2. Condiciones ambientales adversas: La precisión disminuye en situaciones de iluminación extrema (atardecer, niebla densa) o cuando el dron captura las plantas con ángulos superiores a 30° respecto a la vertical.
3. Generalización geográfica: El sistema fue entrenado y validado exclusivamente en cultivos del Estado de México con variedades locales de agave. Su desempeño en otras regiones (Jalisco, Oaxaca, Michoacán) con diferentes genotipos y prácticas de cultivo deberá ser evaluado.

3.5. Desempeño de la aplicación web y dashboard

Para hacer el modelo accesible a usuarios no especializados, se desarrolló una aplicación web interactiva usando Streamlit. La interfaz organiza las funcionalidades en cuatro pestañas: análisis de imagen estática, transmisión en vivo (cámara web o RTSP), análisis de video pregrabado y un dashboard histórico.

Hasta el momento, el sistema ha registrado decenas de análisis que suman más de 1,200 agaves detectados, con una confianza promedio superior al 94%. El dashboard permite visualizar la evolución temporal de los conteos, la distribución por tipo de fuente (imagen, video, dron) y la proporción acumulada de madurez (pequeño, joven, maduro). Esta información es de gran valor para los productores, ya que facilita la planificación de la cosecha, la identificación de lotes con retraso en el desarrollo y la optimización de recursos.

3.6. Perspectivas de mejora y trabajos futuros

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del sistema, pero también abren líneas de trabajo prometedoras. En primer lugar, se explorarán arquitecturas más eficientes como YOLOv8 o transformadores ligeros (Bit-STED) para reducir el costo computacional y permitir su ejecución en dispositivos de borde (Edge Computing) directamente a bordo del dron. En segundo lugar, se planea integrar sensores multispectrales (cámaras NIR) para estimar índices de vegetación (NDVI) y correlacionarlos con el contenido de carbohidratos, mejorando la precisión de la clasificación de madurez. Finalmente, se realizarán pruebas piloto en otras regiones productoras de agave del país, con el objetivo de adaptar y validar el modelo a diferentes variedades y condiciones agroclimáticas.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló e implementó un sistema inteligente para el conteo y clasificación de la madurez del agave, integrando un modelo YOLOv5, un módulo de seguimiento por IoU y una aplicación web en Streamlit. Se demostró la viabilidad técnica y bajo costo de la solución, combinando drones DJI comerciales con herramientas de código abierto. El modelo alcanzó un rendimiento sobresaliente: precisión del 92-97%, recall del 95-98% y un mAP50 del 98%, superando en al menos 9 puntos porcentuales a trabajos previos. El módulo de tracking IoU con umbral de 0.35 resolvió eficazmente el problema de conteos duplicados en video, permitiendo identificar agaves únicos en vuelos dinámicos.

La interfaz web desarrollada con Streamlit resultó accesible e intuitiva para personal no especializado, ofreciendo carga de imágenes, videos y transmisión RTSP, así como generación automática de reportes. En cuanto al tiempo de monitoreo, el sistema reduce drásticamente los varios días por hectárea que requieren los métodos manuales a solo minutos. Como limitaciones, se identificaron la dependencia de la calidad del etiquetado y las condiciones ambientales adversas; como trabajos futuros, se plantean explorar arquitecturas más avanzadas (YOLOv8, Bit-STED), integrar sensores multispectrales y validar el sistema en otras regiones productoras. En síntesis, el sistema constituye una herramienta precisa, eficiente y accesible para la agricultura de precisión en el sector agavero mexicano.

Referencias

1. Calvario, G., Alarcón, T. E., Dalmau, O., Sierra, B., & Hernández, C. (2020). An Agave Counting Methodology Based on Mathematical Morphology and Images Acquired through Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 6247. <https://doi.org/10.3390/s20216247>
2. Escobar-Flores, J. G., Sandoval, S., & Gámiz-Romero, E. (2022). Unmanned aerial vehicle images in machine learning for agave detection. *Environmental Science and Pollution Research*, 61662-61673. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18985-7>
3. Gobierno del Estado de México. (2021). Fortalecimiento a la producción de agave mezcalero en el Estado de México. Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SECAmPo).

4. Goodfellow, Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
5. Hernández Calvario, O., Florian, F., Sánchez, M. G., & Avila George, H. (2022). Conteo de plantas de agave usando redes neuronales convolucionales. *Revista Iberoamericana de Sistemas de Tiempo Real*, 64-78.
6. Radoglou Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>
7. Secretaría del campo. (2023). Promueve Secretaría del Campo producción de agave mezcalero en el Estado de México. Gobierno del Estado de México.
8. Szeliski, R. (2021). Computer vision: Algorithms and applications (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-7>
9. Tapia Rodriguez, A., Ramírez Davila, J. F., & Acosta Guadarrama, A. D. (2023). Plagas y enfermedades del agave mezcalero. *Enfoque Rural*, 1-10.
10. Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, 10, 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>

Transformación de mezclas de sargazo (*Sargassum spp.*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en azúcares fermentables mediante hidrólisis alcalina y enzimática

Camarillo Martínez, Axel Liam¹; Brachetti Sibaja, Silvia Beatriz^{1*}; Domínguez Crespo, Miguel Antonio²; Torres Huerta, Aidé Minerva²; Ramírez Meneses, Esther³; Guevara Franco, María de Lourdes¹

¹TecNM/IT de Cd. Madero, Ave. Primero de Mayo S/N, Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam., México.

²Instituto Politécnico Nacional, UPIIH, Carretera Pachuca - Actopan kilómetro 1+500, DESCTI, San Agustín Tlaxiaca, 42162, Hgo., México.

³Universidad Iberoamericana, Departamento de Ingeniería Química, Industrial y de Alimentos, Prolongación Paseo de Reforma 880, Lomas de Santa Fe, C.P. 01219, Ciudad de México, México

*Autor de correspondencia: silvia.bs@cdmadero.tecnm.mx

RESUMEN

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y el sargazo (*Sargassum spp.*) son biomásas invasoras con potencial para la obtención de azúcares fermentables. En este trabajo se evaluó la transformación de mezclas de ambas biomásas mediante hidrólisis alcalina e hidrólisis enzimática. Se prepararon seis proporciones de lirio acuático:sargazo, las cuales fueron sometidas a un pretratamiento con NaOH 1 M a 80 °C durante 2 h. Posteriormente, se realizó hidrólisis enzimática utilizando amilasa, celulasa y driselasa durante 48 h. El incremento de la proporción de sargazo favoreció la pérdida de masa, alcanzando 74.75 %. Las combinaciones enzimáticas mostraron mayor eficiencia que las enzimas individuales, destacando amilasa-celulasa con una concentración máxima de 1770.81 mg/mL de azúcares reductores. Los resultados evidencian el potencial de estas biomásas como materia prima para la obtención de azúcares fermentables.

Palabras clave: **sargazo, lirio acuático, hidrólisis enzimática, azúcares fermentables, biomasa invasora**

ABSTRACT

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and sargassum (*Sargassum spp.*) are invasive biomasses with potential for fermentable sugar production. This study evaluated the transformation of mixtures of both biomasses through alkaline and enzymatic hydrolysis. Six water hyacinth:sargassum ratios were prepared and subjected to alkaline pretreatment using 1 M NaOH at 80 °C for 2 h. Enzymatic hydrolysis was subsequently carried out using amylase, cellulase, and driselase for 48 h. Increasing the proportion of sargassum promoted biomass solubilization, reaching a maximum mass loss of 74.75 %. Enzymatic combinations outperformed individual enzymes, with the amylase-cellulase treatment producing the highest reducing sugar concentration (1770.81 mg/mL). These findings demonstrate the potential of both biomasses as feedstocks for fermentable sugar production.

Keywords: **sargassum, water hyacinth, enzymatic hydrolysis, fermentable sugars, invasive biomass**

1. Introducción

El incremento de la demanda energética mundial y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [1] han impulsado el desarrollo de fuentes renovables de energía. Entre las alternativas disponibles, los biocombustibles representan una opción viable para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir a la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

El bioetanol es uno de los biocombustibles líquidos más utilizados [2] a nivel mundial debido a su capacidad para mezclarse con gasolina y reducir las emisiones contaminantes derivadas de la combustión. Sin embargo, la producción de bioetanol de primera generación [3] a partir de materias primas alimentarias ha generado preocupaciones relacionadas con la seguridad alimentaria y el uso intensivo de recursos agrícolas. En respuesta a estas limitaciones, la investigación se ha orientado hacia materias primas lignocelulósicas y biomasa residual [4]. Dentro de estas alternativas destacan el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y el sargazo (*Sargassum spp.*) [5], especies cuya proliferación excesiva provoca afectaciones ambientales, económicas y sociales.

El lirio acuático es considerado una de las plantas invasoras más agresivas del mundo debido a su rápida reproducción y capacidad para cubrir extensas superficies de agua. Su presencia reduce la penetración de luz, disminuye el oxígeno disuelto y altera el equilibrio ecológico de los ecosistemas acuáticos. Por otra parte, el arribo masivo de sargazo a las costas del Caribe mexicano ha generado pérdidas económicas asociadas al turismo [6], afectaciones a la pesca y deterioro de ecosistemas costeros.

Ambas biomásas contienen polisacáridos susceptibles de transformarse en azúcares fermentables mediante procesos de pretratamiento e hidrólisis [7]. El aprovechamiento conjunto de estas especies representa una alternativa atractiva para la producción sostenible de biocombustibles y la valorización de residuos biológicos de bajo costo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la transformación de mezclas de sargazo y lirio acuático en azúcares fermentables mediante hidrólisis alcalina e hidrólisis enzimática.

2. Metodología

2.1. Recolección y acondicionamiento de biomasa

Se emplearon como materias primas lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y sargazo pelágico (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*). Ambas biomásas fueron recolectadas y posteriormente sometidas a un proceso de acondicionamiento para eliminar impurezas que pudieran interferir con los tratamientos posteriores. Las muestras fueron lavadas con agua corriente para remover arena, sales, sedimentos y material extraño adherido a la superficie.

Posteriormente, las biomásas fueron secadas hasta alcanzar una humedad adecuada para su almacenamiento y procesamiento. Una vez secas, las muestras se trituraron con el propósito de reducir el tamaño de partícula e incrementar el área superficial disponible para la acción de los reactivos químicos y enzimas empleados durante los procesos de hidrólisis.

2.2. Preparación de mezclas

Con el objetivo de evaluar el efecto de la proporción de biomasa sobre la producción de azúcares fermentables, se prepararon seis mezclas en diferentes relaciones en peso de lirio acuático y

sargazo (LA:S): 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 y 0:100. La variación en la composición de las mezclas permitió determinar la influencia de cada biomasa en la eficiencia de los procesos de hidrólisis. Cada una de las mezclas fue homogeneizada antes de su utilización con el fin de garantizar una distribución uniforme de ambos componentes durante los tratamientos de pretratamiento e hidrólisis enzimática.

2.3. Hidrólisis alcalina

Las mezclas preparadas (MSI) fueron sometidas a un pretratamiento alcalino utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M. El tratamiento se realizó a una temperatura de 80 °C durante 2 h, condiciones seleccionadas con el propósito de favorecer la ruptura parcial de la estructura lignocelulósica y aumentar la accesibilidad de los polisacáridos a la acción enzimática posterior.

Una vez concluido el tratamiento, las muestras fueron filtradas y lavadas repetidamente con agua destilada hasta eliminar residuos de álcali. Posteriormente, el material sólido recuperado fue secado y pesado (MSF) para determinar el rendimiento del residuo sólido y la pérdida de masa ocasionada por el tratamiento. El rendimiento del residuo sólido se calculó mediante la ecuación 1.

$$RRS(\%) = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (1)$$

donde (RRS) es el rendimiento del residuo sólido (%), (M_f) corresponde a la masa seca final obtenida después del tratamiento y (M_i) representa la masa seca inicial de la muestra.

La pérdida de masa se determinó mediante la ecuación 2.

$$PM = 100 - R \quad (2)$$

Donde (PM) es la pérdida de masa (%) y (R) es el rendimiento del residuo sólido (%).

2.4. Hidrólisis enzimática

Los residuos sólidos obtenidos después del pretratamiento alcalino fueron sometidos a hidrólisis enzimática con el objetivo de liberar azúcares reductores a partir de los polisacáridos presentes en la biomasa. Se evaluaron tres sistemas enzimáticos individuales: amilasa, celulasa y driselasa. Asimismo, se analizaron combinaciones binarias entre dichas enzimas para determinar posibles efectos sinérgicos en la degradación de los componentes estructurales de la biomasa.

Las reacciones de hidrólisis se mantuvieron durante un periodo de 48 h. Se realizaron muestreos a 0, 24 y 48 h para monitorear la producción de azúcares reductores a lo largo del proceso. El diseño experimental consideró seis relaciones de biomasa y tres tratamientos enzimáticos, evaluados en tres tiempos de reacción, permitiendo analizar el efecto de cada factor sobre la liberación de azúcares fermentables.

2.5. Determinación de azúcares reductores

La cuantificación de azúcares reductores se realizó mediante el método colorimétrico del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) [8], ampliamente utilizado para la determinación de azúcares liberados durante procesos de hidrólisis. Las muestras obtenidas en cada tiempo de reacción fueron mezcladas con el reactivo DNS y sometidas a calentamiento para favorecer el desarrollo de color. Posteriormente, la absorbancia fue medida mediante espectrofotometría UV-Visible a una longitud de onda de 540 nm. La concentración de azúcares reductores

se determinó utilizando una curva de calibración elaborada a partir de soluciones patrón de glucosa de concentración conocida.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del pretratamiento alcalino sobre las mezclas de biomasa

El pretratamiento alcalino constituye una de las etapas más importantes en la conversión de biomasa lignocelulósica a biocombustibles [9,10], ya que favorece la disrupción de la estructura de la pared celular mediante la solubilización parcial de hemicelulosa, lignina y otros compuestos que limitan el acceso de las enzimas hidrolíticas a los polisacáridos estructurales. En este estudio se evaluó el efecto del tratamiento con NaOH 1 M sobre diferentes relaciones de lirio acuático y sargazo, determinando el rendimiento del residuo sólido y la pérdida de masa obtenida después del tratamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento del residuo sólido y pérdida de masa después del pretratamiento alcalino.

Relación LA:S	Rendimiento del residuo sólido (%)	Pérdida de masa (%)
100:0	41,87	58,13
80:20	37,16	62,84
60:40	35,04	64,96
40:60	33,29	66,71
20:80	30,07	69,93
0:100	25,25	74,75

Los resultados muestran que el rendimiento del residuo sólido disminuyó conforme aumentó la proporción de sargazo en las mezclas. La relación 100:0 (lirio acuático) presentó el mayor rendimiento (41,87 %), mientras que la biomasa constituida únicamente por sargazo presentó el menor valor (25,25 %). En consecuencia, la pérdida de masa aumentó progresivamente desde 58,13 % hasta 74,75 %.

Este comportamiento indica que el sargazo presentó una mayor susceptibilidad al tratamiento alcalino bajo las condiciones evaluadas. La elevada pérdida de masa puede asociarse a la eliminación de compuestos solubles, sales minerales y polisacáridos parcialmente hidrolizados durante el tratamiento. El hidróxido de sodio favorece la ruptura de enlaces éster y éter presentes en la matriz lignocelulósica [11], incrementando la porosidad del material y facilitando el acceso de las enzimas durante la etapa posterior de hidrólisis.

Por el contrario, el lirio acuático conservó una mayor fracción del residuo sólido, lo cual puede relacionarse con las diferencias estructurales existentes entre ambas biomásas y con la distribución de sus componentes lignocelulósicos. Aunque una mayor pérdida de masa implica una reducción del rendimiento sólido, este fenómeno puede favorecer la disponibilidad de la celulosa y otros polisacáridos para su conversión en azúcares fermentables.

3.2. Caracterización estructural mediante espectroscopía FTIR

Con el propósito de evaluar las modificaciones estructurales de las mezclas de lirio acuático y sargazo durante el proceso de hidrólisis enzimática, se realizó la caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) [12]. Considerando que la combinación enzimática amilasa-celulasa presentó la mayor producción de azúcares reductores, el análisis se enfocó en este tratamiento, evaluando las seis relaciones de biomasa (LA:S = 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 y 0:100) a los tiempos de reacción de 0, 24 y 48 h.

Los espectros obtenidos al inicio de la hidrólisis presentan las bandas características de los componentes

estructurales de ambas biomazas como se muestra en la Figura 1. Se observa una banda ancha entre 3200 y 3400 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento de los grupos hidroxilo (O-H), así como señales cercanas a 2920 cm^{-1} asociadas con enlaces C-H alifáticos. Asimismo, se identifican bandas en las regiones correspondientes a grupos carbonilo (C=O), enlaces C=C, grupos sulfóxido (S=O), enlaces C-O-C y β -glucósidos, las cuales evidencian la presencia de polisacáridos y otros compuestos estructurales característicos del lirio acuático y el sargazo [10].

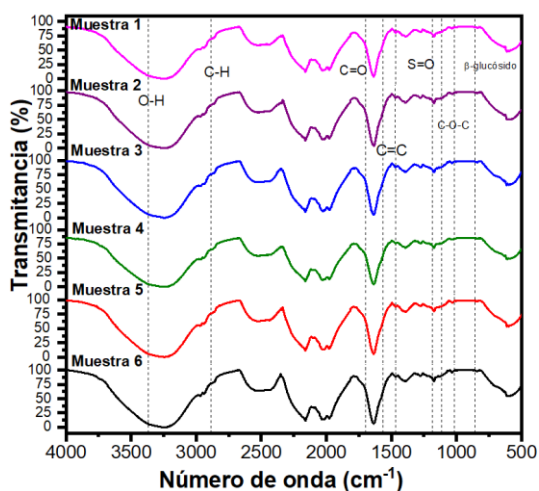


Figura 1. Espectros FTIR de las mezclas de lirio acuático y sargazo tratadas con la combinación enzimática amilasa-celulasa a 0 h de hidrólisis.

Después de 24 h de hidrólisis se observaron variaciones en la intensidad de diversas bandas respecto al tiempo inicial, indicando modificaciones progresivas en la estructura química de las mezclas. Estas variaciones pueden atribuirse a la acción de las enzimas sobre los polisacáridos presentes en la biomasa, favoreciendo la degradación parcial de la celulosa, hemicelulosa y otros carbohidratos estructurales. Aunque las tendencias fueron similares para todas las relaciones de biomasa, se apreciaron diferencias en la intensidad de algunas señales, lo que sugiere que la proporción

de lirio acuático y sargazo influye en la susceptibilidad del material al proceso de hidrólisis, como se puede observar en la Figura 2.

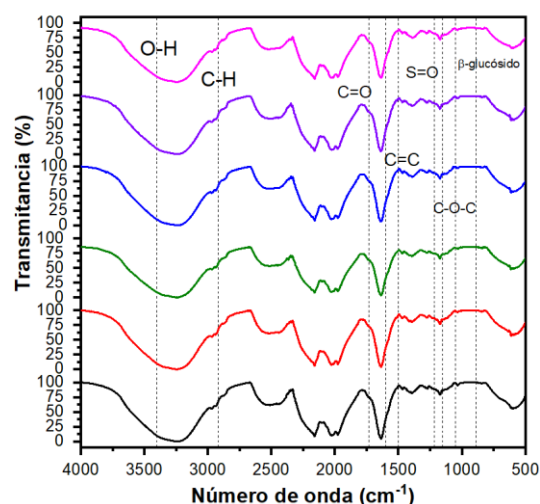


Figura 2. Espectros FTIR de las mezclas de lirio acuático y sargazo tratadas con la combinación enzimática amilasa-celulasa a 24 h de hidrólisis.

Al finalizar las 48 h de reacción, las modificaciones observadas en los espectros fueron más evidentes, principalmente en las bandas asociadas con los polisacáridos estructurales (Figura 3). La disminución en la intensidad de estas señales indica una degradación progresiva de los componentes susceptibles a la acción enzimática, favoreciendo la liberación de azúcares fermentables. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos mediante el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), en el que se registró un incremento en la concentración de azúcares reductores conforme avanzó el tiempo de hidrólisis.

En conjunto, los análisis mediante FTIR demostraron que la combinación enzimática amilasa-celulasa promovió modificaciones graduales en la estructura química de las mezclas de lirio acuático y sargazo. La evolución de los espectros durante los tres tiempos de reacción

confirma la degradación progresiva de los polisacáridos presentes en la biomasa y respalda los resultados obtenidos mediante la cuantificación de azúcares reductores, evidenciando la eficiencia del proceso de hidrólisis enzimática para la obtención de compuestos fermentables.

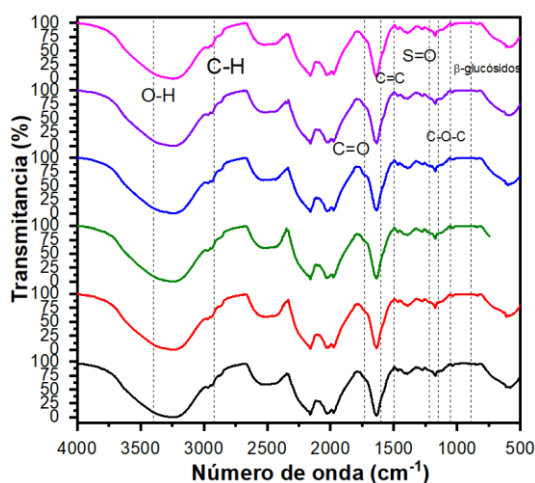


Figura 3. Espectros FTIR de las mezclas de lirio acuático y sargazo tratadas con la combinación enzimática amilasa-celulasa a 48 h de hidrólisis.

3.3. Producción de azúcares reductores mediante el método DNS

Con el objetivo de evaluar la eficiencia de la hidrólisis enzimática, se determinó la concentración de azúcares reductores liberados durante la reacción mediante el método colorimétrico del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS). Las determinaciones se realizaron a los tiempos de 0, 24 y 48 h para cada una de las mezclas de lirio acuático y sargazo empleadas en el estudio. Los resultados evidenciaron que la concentración de azúcares reductores presentó variaciones en función de la composición de las mezclas y del tiempo de hidrólisis. En términos generales, se observó un incremento progresivo de la concentración de azúcares conforme avanzó el proceso enzimático, lo que indica que la degradación de los polisacáridos continuó durante todo el periodo experimental [4].

La respuesta obtenida para cada tratamiento estuvo influenciada por la proporción de lirio acuático y sargazo presente en las mezclas, lo que sugiere que la composición química de cada biomasa desempeña un papel importante en la disponibilidad de los polisacáridos para la acción enzimática. La presencia de celulosa, hemicelulosa y otros carbohidratos estructurales favoreció la producción de azúcares fermentables una vez que la biomasa fue sometida al pretratamiento alcalino [11,12].

En las mezclas con mayor contenido de lirio acuático se observó una liberación gradual de azúcares reductores, mientras que aquellas con mayor proporción de sargazo presentaron un comportamiento diferente, atribuible a las características estructurales propias de esta biomasa y a la presencia de polisacáridos específicos como los alginatos y fucanos. Estos resultados demuestran que la composición de las mezclas influye directamente en la eficiencia del proceso de hidrólisis y en la cantidad de azúcares disponibles para una etapa posterior de fermentación.

3.3.1. Evaluación de enzimas individuales

Con el propósito de identificar el sistema enzimático con mayor capacidad hidrolítica, se evaluó el comportamiento de amilasa, celulasa y driselasa de manera individual durante 48 h de reacción (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración promedio de azúcares reductores (mg/mL) por tipo de enzima individual a diferentes tiempos de hidrólisis (0, 24 y 48 h).

t (h)	Amilasa	Celulasa	Driselasa
0	16,50	22,53	21,19
24	29,03	18,32	18,68
48	26,62	27,70	18,60

La amilasa presentó un incremento en la concentración de azúcares reductores durante las primeras 24 h, alcanzando posteriormente una ligera disminución al finalizar el periodo experimental. Este comportamiento puede atribuirse al consumo o transformación de los productos generados durante la hidrólisis. Por otra parte, la celulasa mostró un incremento gradual durante todo el proceso [13], obteniendo los mayores valores a las 48 h de reacción. Este comportamiento indica que la degradación de la fracción celulósica continuó de manera sostenida conforme aumentó el tiempo de incubación.

En contraste, la driselasa presentó la menor producción de azúcares reductores entre las enzimas evaluadas, lo que sugiere una menor eficiencia para hidrolizar los polisacáridos predominantes en las mezclas utilizadas. Las diferencias observadas entre los tratamientos evidencian la importancia de seleccionar adecuadamente el sistema enzimático de acuerdo con la composición de la biomasa.

3.3.2. Evaluación de combinaciones enzimáticas

Con el fin de incrementar la eficiencia del proceso de hidrólisis, se evaluó el efecto de combinaciones binarias de enzimas sobre la producción de azúcares reductores (Tabla 3).

Tabla 3. Producción de azúcares reductores (mg/mL) por combinaciones enzimáticas binarias a diferentes tiempos de hidrólisis (0, 24 y 48 h).

T (h)	Amylase + Celulase	Amylase + Driselase	Celulase + Driselase
0	952,60	1.118,00	426,13
24	1.141,62	1.412,87	750,97
48	1.770,81	1.526,21	768,37

Las combinaciones enzimáticas mostraron una producción de azúcares considerablemente mayor que la obtenida con enzimas individuales. Entre los

tratamientos evaluados, la combinación amilasa-celulasa presentó el mejor desempeño, alcanzando una concentración promedio de 1.770,81 mg/mL al finalizar las 48 h de reacción.

El incremento observado puede atribuirse al efecto sinérgico entre ambas enzimas [13]. Mientras la amilasa hidroliza polisacáridos de reserva presentes en la biomasa, la celulasa actúa sobre la fracción celulósica previamente expuesta mediante el pretratamiento alcalino. La acción simultánea de ambos sistemas favorece una mayor conversión de polisacáridos en azúcares fermentables. Los resultados obtenidos demuestran que la utilización de sistemas enzimáticos combinados constituye una estrategia efectiva para incrementar el rendimiento del proceso de hidrólisis y mejorar el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica.

3.4. Relación entre los cambios estructurales y la producción de azúcares fermentables

El análisis conjunto de los resultados obtenidos mediante FTIR y la cuantificación de azúcares reductores permitió establecer una relación entre las modificaciones estructurales de la biomasa y la eficiencia del proceso de hidrólisis. Las variaciones observadas en la intensidad de las bandas características de los polisacáridos coincidieron con el incremento progresivo en la concentración de azúcares reductores durante los tiempos de reacción evaluados.

Estos resultados indican que la acción enzimática produjo una degradación gradual de los componentes estructurales de las mezclas, favoreciendo la liberación de compuestos fermentables. Asimismo, el pretratamiento alcalino desempeñó un papel fundamental al incrementar la accesibilidad de las enzimas hacia los

polisacáridos presentes en ambas biomásas.

La combinación de ambas técnicas analíticas permitió corroborar que los cambios estructurales detectados mediante FTIR estuvieron directamente relacionados con el incremento de azúcares reductores cuantificados mediante el método DNS [10], proporcionando evidencia complementaria sobre la eficiencia del proceso de hidrólisis.

3.5. Implicaciones para la producción de bioetanol

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de un pretratamiento alcalino con hidrólisis enzimática constituye una alternativa viable para el aprovechamiento de mezclas de lirio acuático y sargazo como materia prima para la obtención de azúcares fermentables [6,7]. La elevada concentración de azúcares reductores obtenida con la combinación amilasa-celulasa indica que estos sustratos poseen un potencial considerable para su utilización en procesos posteriores de fermentación alcohólica.

Además del interés biotecnológico, el aprovechamiento de estas biomásas invasoras representa una estrategia con beneficios ambientales, al contribuir al manejo de especies cuya proliferación afecta ecosistemas acuáticos y zonas costeras. En este sentido, la valorización de lirio acuático y sargazo mediante procesos de conversión biológica favorece el desarrollo de esquemas de economía circular y la generación de biocombustibles a partir de recursos renovables [2,6].

Conclusiones

El pretratamiento alcalino con NaOH 1 M modificó significativamente la estructura de las mezclas de lirio acuático y sargazo, favoreciendo la remoción de

componentes estructurales y aumentando la accesibilidad de los polisacáridos a la acción enzimática. Las mezclas con mayor contenido de sargazo presentaron las mayores pérdidas de masa, alcanzando un valor máximo de 74,75 %, lo que evidencia una mayor susceptibilidad de esta biomasa al tratamiento alcalino.

Los análisis mediante espectroscopía FTIR permitieron identificar cambios en los grupos funcionales característicos de los polisacáridos presentes en las mezclas de biomasa a lo largo del proceso de hidrólisis. Las variaciones observadas en los espectros sugieren una modificación progresiva de la estructura química de la biomasa, asociada con la degradación de compuestos susceptibles a la acción enzimática. La cuantificación de azúcares reductores mediante el método DNS confirmó la efectividad de la hidrólisis enzimática para transformar los polisacáridos presentes en las mezclas de lirio acuático y sargazo en compuestos fermentables. La concentración de azúcares mostró una tendencia creciente con el tiempo de reacción, evidenciando la continuidad del proceso hidrolítico durante las 48 h evaluadas.

Entre los tratamientos estudiados, la combinación amilasa-celulasa presentó el mejor desempeño, alcanzando una concentración máxima de 1.770,81 mg/mL de azúcares reductores a las 48 h. Este resultado indica la existencia de un efecto sinérgico entre ambas enzimas, favoreciendo una mayor conversión de los polisacáridos presentes en la biomasa.

Los resultados obtenidos demuestran que las mezclas de lirio acuático y sargazo constituyen una materia prima con potencial para la obtención de azúcares fermentables, representando una alternativa para el aprovechamiento de biomasa invasora y el desarrollo futuro de

procesos de producción de bioetanol y otros biocombustibles.

13. F. Mohd Zin, M. S. Yahya y N. A. Ibrahim, *Bioresour. Technol.*, (2022)

Referencias

1. G. L. Miller, *Anal. Chem.*, 31, 3, (1959), 426–428.
2. D. J. Milledge, S. Harvey y A. E. Smith, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 127, (2020), 109882.
3. Y. Xu, X. Li y H. Wang, *Bioresour. Technol.*, 337, (2021), 125432.
4. K. Chandel, F. A. da Silva y O. V. Singh, *Renew. Energy*, 181, (2022), 1206–1221.
5. M. Balat, *Energy Convers. Manage.*, 52, 2, (2021), 858–875.
6. International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*, (IEA, París), 354, (2023).
7. International Renewable Energy Agency, *Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels*, (IRENA, Abu Dhabi), 168, (2022).
8. Food and Agriculture Organization, *Guidelines for the Management of Water Hyacinth*, (FAO, Roma), 124, (2023).
9. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Estrategia Integral para la Atención del Sargazo en México*, (SEMARNAT, Ciudad de México), 112, (2023).
10. R. M. Silverstein, F. X. Webster, D. J. Kiemle y D. L. Bryce, *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, 8th ed., (John Wiley & Sons, Hoboken), 512, (2019).
11. Pandey, S. Negi, C. R. Soccol y P. Larroche, *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, (Elsevier, Amsterdam), 896, (2022).
12. N. Sarkar, S. K. Ghosh, S. Bannerjee y K. Aikat, *Renew. Energy*, 37, 1, (2021), 19–27.



Obtención de líquidos iónicos derivados del imidazol y su posible aplicación en sistemas electroquímicos

Larraga Araiza, Juan Humberto*; Gallardo Rivas, Nohra Violeta; Brachetti Sibaja, Silvia Beatriz

TecNM, IT de Cd. Madero, Ave. Primero de Mayo S/N, Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam., México

*Autor de correspondencia: G13071829@cdmadero.tecnm.mx

RESUMEN

Los líquidos iónicos son sales formadas generalmente por un catión orgánico voluminoso y un anión orgánico o inorgánico. Debido a la naturaleza asimétrica de sus iones y a la baja energía de interacción entre ellos, presentan puntos de fusión bajos, lo que les permite permanecer en estado líquido a temperaturas relativamente bajas. Además, poseen baja volatilidad, alta estabilidad térmica y química, así como elevada conductividad iónica, características que han impulsado su estudio en diversas áreas científicas y tecnológicas. Entre ellos, los líquidos iónicos derivados del imidazol destacan por su versatilidad estructural, ya que sus propiedades pueden modificarse mediante cambios en la longitud de la cadena alquílica del catión o en la naturaleza del anión. Esta capacidad permite adaptar sus propiedades fisicoquímicas a diversas aplicaciones, como la electroquímica, la catálisis y el desarrollo de materiales funcionales. En este trabajo se presenta la síntesis de líquidos iónicos tipo imidazolio mediante reacciones de cuaternización seguidas de intercambio iónico, obteniendo compuestos con diferentes estructuras químicas. Los productos fueron caracterizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), confirmando su estructura y verificando la obtención de los líquidos iónicos sintetizados, estableciendo las bases para futuras aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave: **líquidos iónicos, imidazolio, FTIR**

ABSTRACT

Ionic liquids are salts generally composed of a bulky organic cation and an organic or inorganic anion. Due to the asymmetric nature of their ions and the low energy interaction between them, they exhibit low melting points, allowing them to remain in the liquid state at relatively low temperatures. In addition, they possess low volatility, high thermal and chemical stability, as well as high ionic conductivity, characteristics that have promoted their study in various scientific and technological fields. Among them, imidazolium-based ionic liquids stand out because of their structural versatility, as their properties can be tailored by modifying the alkyl chain length of the cation or the nature of the anion. This tunability enables the adjustment of their physicochemical properties for different applications, such as electrochemistry, catalysis, and the development of functional materials. In this work, the synthesis of imidazolium-based ionic liquids is presented through quaternization reactions followed by ion-exchange processes, yielding compounds with different chemical structures. The synthesized products were characterized by Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy, confirming their structure and verifying the successful synthesis of the target ionic liquids, thereby establishing the basis for future technological applications.

Keywords: **ionic liquids, imidazolium, FTIR**



1. Introducción

Los líquidos iónicos derivados del imidazolio constituyen una de las familias más estudiadas debido a su estabilidad química, facilidad de síntesis y posibilidad de modificar sus propiedades mediante cambios en la estructura del catión o del anión [1,2]. Estas características han favorecido su empleo en áreas como la catálisis, la separación de compuestos, la electroquímica y la ciencia de materiales. La obtención de estos compuestos se realiza comúnmente mediante una reacción de cuaternización del 1-metilimidazol con un haluro de alquilo, seguida de una etapa de intercambio aniónico que permite sustituir el bromuro por aniones de interés, como tetrafluoroborato (BF_4^-) o hexafluorofosfato (PF_6^-) [3]. La combinación de diferentes cadenas alquílicas y aniones produce líquidos iónicos con propiedades fisicoquímicas distintas, como viscosidad, hidrofobicidad, estabilidad térmica y conductividad iónica.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo sintetizar los líquidos iónicos 1-butil-3-metilimidazolio tetrafluoroborato ($[\text{BMIM}][\text{BF}_4]$), 1-butil-3-metilimidazolio hexafluorofosfato ($[\text{BMIM}][\text{PF}_6]$), 1-hexil-3-metilimidazolio tetrafluoroborato ($[\text{HMIM}][\text{BF}_4]$) y 1-hexil-3-metilimidazolio hexafluorofosfato ($[\text{HMIM}][\text{PF}_6]$) mediante reacciones de cuaternización e intercambio aniónico. Los productos obtenidos fueron caracterizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para confirmar y validar los compuestos sintetizados.

2. Materiales y método

2.1 Reactivos

Se emplearon reactivos de grado analítico. Se utilizaron 1-metilimidazol (Sigma-Aldrich, 99% de pureza), 1-bromobutano (Sigma-Aldrich, 99% de

pureza), 1-bromohexano (Sigma-Aldrich, 98% de pureza), tetrafluoroborato de sodio (Sigma-Aldrich, 98 % de pureza), hexafluorofosfato de potasio (Sigma-Aldrich, 98 % de pureza) y etanol anhidro. Todos los reactivos fueron utilizados conforme a las especificaciones del fabricante, sin requerir purificación adicional.

2.2 Síntesis de los precursores bromurados

Los precursores bromurados $[\text{BMIM}]\text{Br}$ y $[\text{HMIM}]\text{Br}$ se obtuvieron mediante una reacción de cuaternización entre 1-metilimidazol y el haluro de alquilo correspondiente (1-bromobutano o 1-bromohexano). En ambas síntesis se utilizó una relación molar de 1:1,1 (1-metilimidazol: haluro de alquilo), empleando 0.10 mol de 1-metilimidazol y un 10 % de exceso del haluro de alquilo para favorecer la conversión completa del reactivo limitante. Como medio de reacción se utilizaron 75 mL de etanol anhidro. Las mezclas se calentaron bajo condiciones de reflujo a 80°C durante 24 h. Finalizada la reacción, las mezclas se enfriaron a temperatura ambiente y el solvente fue eliminado mediante evaporación a presión reducida.

2.3 Síntesis de los líquidos iónicos finales

Los bromuros de imidazolio obtenidos se sometieron a una reacción de intercambio aniónico (metatesis) utilizando tetrafluoroborato de sodio (NaBF_4) o hexafluorofosfato de potasio (KPF_6). Las reacciones se realizaron empleando una relación molar estequiométrica de 1:1 entre el bromuro de imidazolio y la sal de intercambio, utilizando etanol anhidro como solvente.

Las mezclas se mantuvieron bajo reflujo a 80°C durante 24 h. Al concluir la reacción, las sales inorgánicas formadas fueron separadas por filtración; posteriormente,

el solvente se eliminó mediante evaporación rotatoria y los líquidos iónicos obtenidos se secaron bajo vacío para eliminar trazas de solvente y humedad. Finalmente, los productos se almacenaron en frascos de vidrio ámbar herméticamente cerrados hasta su caracterización.

2.4 Caracterización mediante FTIR

Los líquidos iónicos sintetizados fueron caracterizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro *Spectrum 100*. Los espectros fueron registrados en el intervalo de 4000–450 cm^{-1} con el propósito de confirmar la formación de los compuestos sintetizados mediante la identificación de las bandas

características del catión imidazolio y de los aniones BF_4^- y PF_6^- .

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

3.1 Obtención de los precursores bromurados

La reacción de cuaternización permitió obtener exitosamente los precursores bromurados 1-butil-3-metilimidazolio bromuro ([BMIM]Br) y 1-hexil-3-metilimidazolio bromuro ([HMIM]Br). Las ecuaciones globales de ambas reacciones se presentan, respectivamente, en las Figuras 1 y 2. La sustitución nucleofílica del tipo $\text{S}_\text{N}2$ ocurrió entre el 1-metilimidazol y el haluro de alquilo correspondiente, se eliminó el solvente mediante evaporación, dando lugar a la formación de la sal de imidazolio.

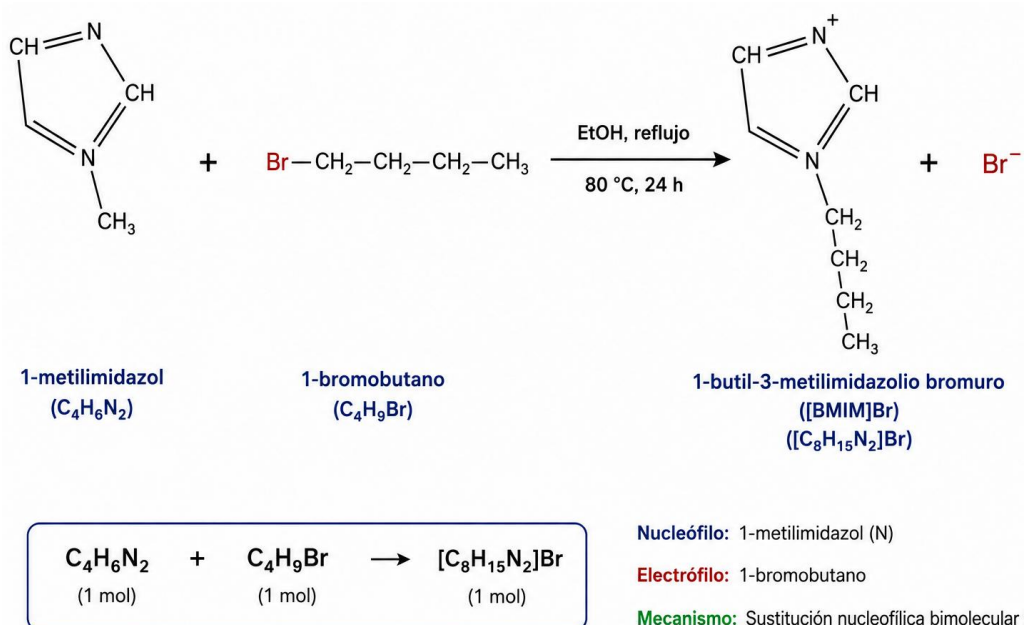
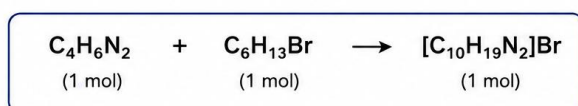
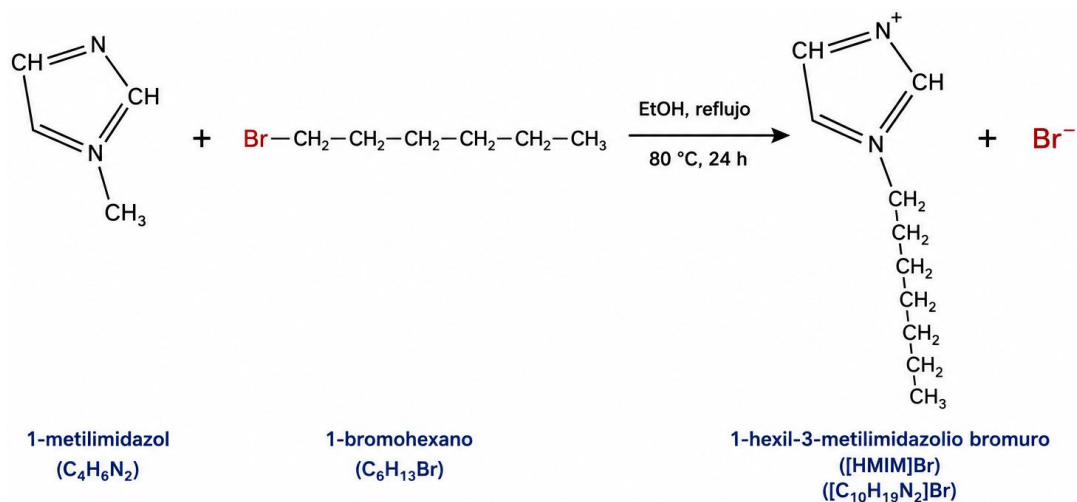


Figura 1. Reacción global de cuaternización del 1-metilimidazol con 1-bromobutano para formar 1-butil-3-metilimidazolio bromuro ([BMIM]Br).



Nucleófilo: 1-metilimidazol (N)

Electrófilo: 1-bromohexano

Mecanismo: Sustitución nucleofílica bimolecular (S_N2)

Figura 2. Reacción global de cuaternización del 1-metilimidazol con 1-bromohexano para formar 1-hexil-3-metilimidazolio bromuro ([HMIM]Br).

Al finalizar las reacciones, se obtuvieron líquidos viscosos de color amarillo pálido, característicos de este tipo de compuestos, sin observar precipitados o evidencia visual de descomposición (Figura 3). Estas observaciones concuerdan con lo reportado para bromuros de imidazolio obtenidos mediante procedimientos similares.



Figura 3. Productos obtenidos tras la cuaternización.

3.2. Obtención de líquidos iónicos finales

Los bromuros de imidazolio obtenidos fueron sometidos a reacciones de

intercambio aniónico empleando tetrafluoroborato de sodio y hexafluorofosfato de potasio. Como resultado, se obtuvieron cuatro líquidos iónicos finales: [BMIM][BF₄], [BMIM][PF₆], [HMIM][BF₄] y [HMIM][PF₆], como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Líquidos iónicos obtenidos.

3.3 Caracterización mediante FTIR

Los espectros FTIR fueron registrados en el intervalo de 4000–450 cm^{-1} utilizando

un equipo Spectrum 100. La caracterización permitió identificar las vibraciones asociadas al anillo imidazolio, cadenas alquílicas y aniones presentes en cada compuesto. Todos los espectros descritos se encuentran reportados en la Figura 5.

3.3.1 Análisis de los precursores bromurados ([BMIM]Br y [HMIM]Br)

Los espectros FTIR correspondientes a los precursores bromurados 1-butil-3-metilimidazolio bromuro ([BMIM]Br) y 1-hexil-3-metilimidazolio bromuro ([HMIM]Br) presentaron las bandas características del catión imidazolio reportadas en la literatura. En ambos compuestos se observaron bandas alrededor de $3058\text{--}3061\text{ cm}^{-1}$, atribuidas al estiramiento $\nu(\text{C-H})$ del anillo imidazolio, así como señales entre $2957\text{--}2859\text{ cm}^{-1}$, correspondientes al estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos metileno y metilo de las cadenas alquílicas.

Asimismo, se identificó una banda intensa alrededor de $1567\text{--}1570\text{ cm}^{-1}$, asociada a las vibraciones del anillo imidazolio y del enlace C=N , además de señales en $1461\text{--}1463\text{ cm}^{-1}$ y $1380\text{--}1381\text{ cm}^{-1}$, correspondientes a las deformaciones de los grupos CH_2 y CH_3 . Finalmente, la banda observada alrededor de 1166 cm^{-1} fue atribuida al estiramiento del enlace C-N característico del catión imidazolio.

Los valores obtenidos concuerdan con los reportados por Osman et al. [7] para líquidos iónicos derivados del imidazolio, así como con los descritos por Momeni y Rad-Moghadam [4], lo que confirma la

formación exitosa de los precursores bromurados y la ausencia de señales predominantes atribuibles a los reactivos de partida.

3.3.2 Análisis de [BMIM][BF₄] y [HMIM][BF₄]

Los espectros correspondientes a [BMIM][BF₄] y [HMIM][BF₄] mostraron bandas asociadas al catión imidazolio alrededor de 1568 cm^{-1} y 1166 cm^{-1} . Asimismo, se identificaron señales características del anión tetrafluoroborato en la región cercana a 1050 cm^{-1} . La presencia simultánea de estas señales sugiere que el intercambio aniónico se llevó a cabo satisfactoriamente.

3.3.3 Análisis de [BMIM][PF₆] y [HMIM][PF₆]

Los espectros FTIR de [BMIM][PF₆] y [HMIM][PF₆] presentaron bandas intensas en la región de $840\text{--}870\text{ cm}^{-1}$, atribuidas a vibraciones características del anión PF_6^- . Además, se conservaron las señales propias del anillo imidazolio, evidenciando que la estructura catiónica permaneció estable durante el proceso de metátesis.

Conclusiones

Las reacciones de cuaternización e intercambio aniónico permitieron obtener satisfactoriamente los líquidos iónicos derivados del imidazol [BMIM]Br, [HMIM]Br, [BMIM][BF₄], [BMIM][PF₆], [HMIM][BF₄] y [HMIM][PF₆], empleando una metodología reproducible basada en dos etapas de síntesis. La caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la formación de los compuestos sintetizados mediante la identificación de

las bandas características del catión imidazolio y de los aniones BF_4^- y PF_6^- , en concordancia con los valores reportados en la literatura (Figura 6). La presencia de estas señales evidenció el éxito tanto de la reacción de cuaternización como del proceso de intercambio aniónico.

Los resultados obtenidos validan la metodología de síntesis empleada y

constituyen una base para futuras investigaciones orientadas a la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y del potencial de estos líquidos iónicos en diversas aplicaciones tecnológicas.

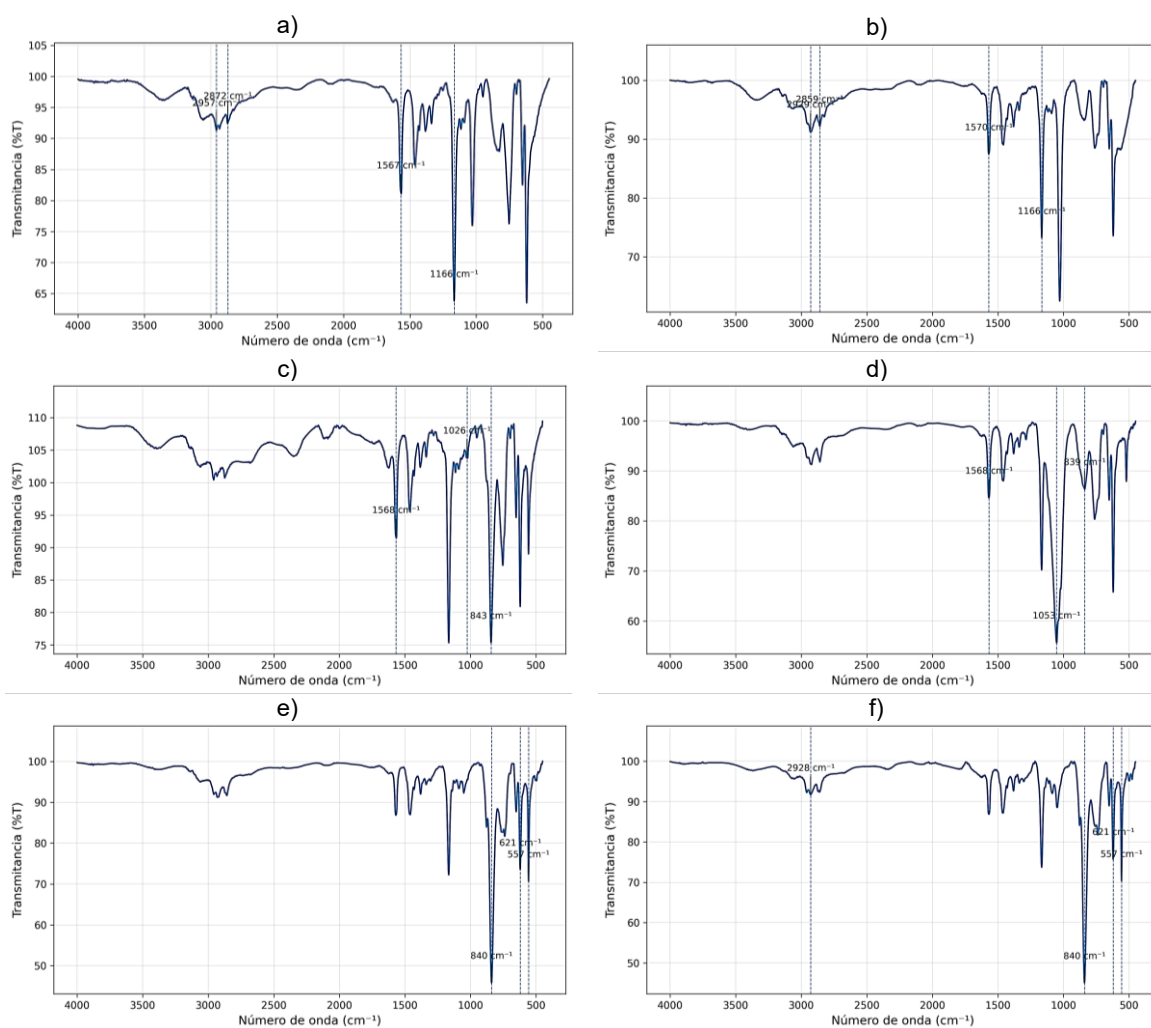


Figura 5. Espectros FTIR de a) [BMIM]Br, b) [HMIM]Br, c) [BMIM][BF₄], d) 1[HMIM][BF₄], e) [BMIM][PF₆] y f) [HMIM][PF₆].

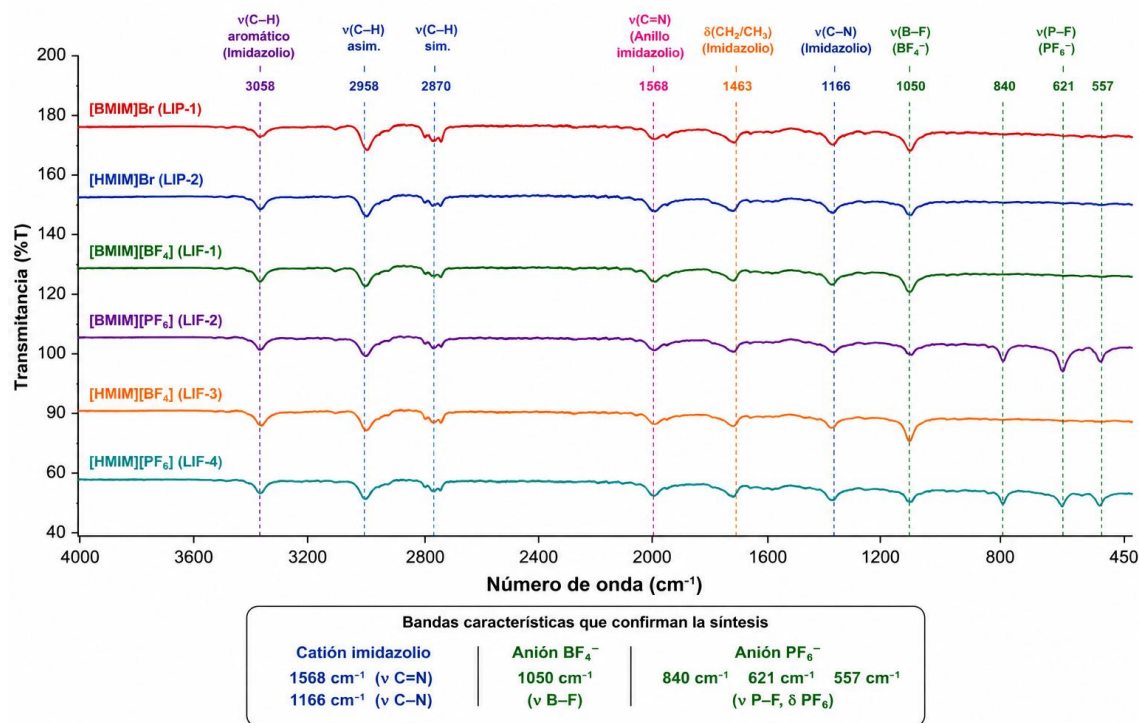


Figura 6. Comparación de los espectros FTIR de los líquidos iónicos sintetizados. Las bandas características del catión imidazolio (~ 1568 y ~ 1166 cm^{-1}) y de los aniones BF_4^- (~ 1050 cm^{-1}) y PF_6^- (~ 840 , ~ 621 y ~ 557 cm^{-1}) confirman la formación de los compuestos obtenidos.

Agradecimientos

Se agradece al Centro de Investigación en Petroquímica Secundaria del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

1. M. A. Alreshidi et al., "A review on the evolution of ionic liquids: Sustainable synthesis, applications, and future prospects", *Mater. Today Sustain.*, vol. 31, p. 101160, sep. 2025.
2. "Molecules | An Open Access Journal from MDPI". Consultado: el 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/journal/molecules>
3. "Synthesis and Characterization of Imidazolium-Based Ionenenes". Consultado: el 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/1420-3049/30/19/3961?utm_source=chatgpt.com
4. H. Momeni y K. Rad-Moghadama, "Direct synthesis, selective anion exchange, and DFT characterization of novel energetic heteroanionic dicationic ionic liquids", *Sci. Rep.*, vol. 15, p. 18339, may 2025, doi: 10.1038/s41598-025-03597-1.
5. Y. Wu, D. Wang, S. Zou, J. Wang, y S. Chen, "Efficient Extraction of [Bmim]BF₄ by Organic-Aqueous System of NaBr-H₂O and CH₂Cl₂", *J. Chem. Eng. Data*, vol. 69, núm. 12, pp.

- 4438–4444, dic. 2024, doi: 10.1021/acs.jced.4c00434.
6. Y. Martín-García, J. Tapiador, G. Orcajo, J. Ayala, y A. B. Lago, “[BMIM][X] Ionic Liquids Supported on a Pillared-Layered Metal–Organic Framework: Synthesis, Characterization, and Adsorption Properties”, *Molecules*, vol. 29, núm. 15, p. 3644, ene. 2024, doi: 10.3390/molecules29153644.
7. Osman, A. K. Ziyada, A. Majeed Khan, y F. Rajab, “Alkylimidazolium-based ionic liquids with tailored anions and cations for CO₂ capture”, *RSC Adv.*, vol. 14, núm. 6, pp. 3985–3995, 2024, doi: 10.1039/D3RA08335G.

Transversalidad Científica y Tecnológica, Volumen 10,
Número 1; se terminó de editar en julio de 2026. Queda
prohibida su reproducción parcial o total.

Todos los derechos reservados.

ATICTAC, MMXXVI