

QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas

Julio-Diciembre 2025 Núm. 4



U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A

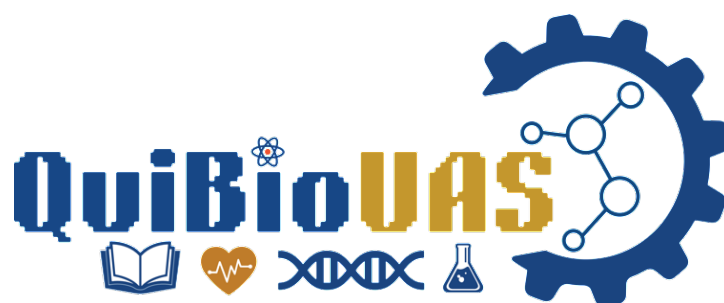


ISSN (en trámite)

QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas

Número IV, 2025. ISSN (en trámite)

<https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

DR. JESÚS MADUEÑA MOLINA

Rector

DRA. NIDIA YUNIBA BRUNN CORONA

Secretaria General

DR. VÍCTOR HUGO AGUILAR GAXIOLA

Director General de Servicio Social

M.C. SERGIO MARIO ARREDONDO SALAS

Secretario Académico Universitario

DRA. MARCELA DE JESÚS VERGARA JIMÉNEZ

Director General de Investigación y Posgrado

DR. EUSIEL RUBIO CASTRO

Director de la FCQB

DRA. MARTHA EDITH LÓPEZ LÓPEZ

Editora en Jefe de la Revista

QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas

COMITÉ EDITORIAL

DRA. MARTHA EDITH LÓPEZ LÓPEZ

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Editora en Jefe

DR. CARLOS IVÁN DELGADO NIEBLA

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Editor de Sección y Soporte Técnico

DRA. MARÍA DE JESÚS NAVARRO ARIAS

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Editor de Sección

DR. CRISTIAN ALARID GARCÍA

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Editor de Sección

DRA. LIDIA ELENA AYÓN REYNA

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Corrector de Estilo

DRA. EVANGELINA GARCÍA ARMENTA

Profesor Investigador FCQB, SNII Nivel 1
Corrector de Estilo

DRA. MARCELA MARTÍNEZ VALENZUELA

Profesor Investigador FCQB, SNII Candidato
Corrector de Estilo

LIC. JUAN ANTONIO ZAMORA LÓPEZ

Diseño Gráfico-Maquetador

LIC. HÉCTOR CARLOS LEAL LÓPEZ

Coordinador General de Soporte Técnico

COMITÉ CIENTÍFICO

DR. ROBERTO GUTIÉRREZ DORADO

Profesor Investigador FCQB, SNI Nivel 1
<https://orcid.org/0000-0002-3192-1588>

DRA. PERLA ROSA FITCH VARGAS

Profesor Investigador Facultad de Ciencias del Mar, SNII Nivel 1
<https://orcid.org/0000-0003-4097-4726>

DR. JORDI GERARDO LÓPEZ VELÁZQUEZ

Profesor Investigador en Universidad Tecnológica de Culiacán, SNII Nivel 1
<https://orcid.org/0000-0002-0901-5984>

El Comité Editorial de QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, agradece la colaboración realizada como pares evaluadores doble ciego, a los autores, revisores, así como a los correctores de estilo, editores, maquetador y soporte técnico. Todo el proceso editorial mantuvo siempre la integridad del proceso de evaluación, cuidando la calidad de la revista QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas en su Número 4, julio-diciembre 2025. El acceso es libre, permitiendo que cualquier persona interesada pueda leer y descargar los artículos sin costo alguno.

CINTILLO LEGAL

QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas No. 4, julio-diciembre 2025, es una publicación semestral, editada por la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas Calzada de las Américas Nte 2771, Cd Universitaria, Burócrata, Culiacán Rosales, Sinaloa. CP. 80013, teléfono 6677520460, página de internet <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>, y correo electrónico editor.quibiouas@uas.edu.mx. Editora responsable: Dra. Martha Edith López López, Profesora Investigadora Titular C y SNII Nivel 1. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. (en trámite), ISSN: (en trámite en el Instituto Nacional de Derechos de Autor). Responsable de actualizar la publicación: Dra. Martha Edith López López en julio de 2025. Las opiniones expresadas por los/las/autores/as no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se permite la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación siempre y cuando se cite la fuente original de forma detallada. Cada manuscrito está bajo la licencia Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

CONTENIDO

EDITORIAL

Carta de la Editora en Jefe

Dra. Martha Edith López López

AVANCES DE INVESTIGACIÓN

Desempeño diagnóstico y correlación de la proteína en orina de 12 horas vs. 24 horas en mujeres embarazadas con preeclampsia en un Hospital Obstétrico Mexicano

Diagnostic performance and correlation of 12-hour vs. 24-hour urinary protein in pregnant women with preeclampsia at a Mexican Obstetric Hospital

8-14

Gámez-Meza, A.H.¹, Terán-Cabanillas, E.2, Murillo-Llanes, J.^{2,3}, Canizalez-Román, A.^{2,3}, León-Sicaños, N.2, Sandoval-Quirón, P.A.⁴, Osuna-Álvarez, O.⁴, Peña-García, G.M. 2, Magaña-Ordorica, D.2, Favela-Heredia, C.E. ⁵, Heusinkveld, J.M. ⁶, Castro-Apodaca, F.J.2 7*

Calidad microbiológica y riesgo de infección por el consumo de emparedados elaborados en servicios de alimentación universitarios de Culiacán, Sinaloa, México

Microbiological quality and risk of infection for the consumption of sandwiches made in university food services in Culiacan, Sinaloa, Mexico

15-23

Castañeda-Ruelas, G.M.1, González-Morales, D.2, Fierros-Pérez, C.E.2, Jiménez-Edeza, M.1*

Diseño responsable de un proceso de destilación extractiva para bioetanol: evaluación económica, ambiental y de seguridad con integración energética

Responsible design of an extractive distillation process for bioethanol: economic, environmental, and safety assessment with energy integration

24-37

Salazar-Melendres, J.A., Hernández-Calderón, O.M., González-Llanes, M.D., Moraila-Anchondo, M.A., Cervantes-Gaxiola, M.E., Laguna-Martínez, M.G.*

Detección del gen de virulencia fimH en aislados clínicos de Klebsiella pneumoniae mediante PCR-RFLP

PCR-RFLP detection of the fimH virulence gene in clinical isolates of Klebsiella pneumoniae

38-45

Gómez-García, A. K.1, Vega-Castillo, U.1, Hernández-Sánchez, N. F.1, Beltrán-López, E.1, Sosa-Sillas, E. C.1, Bueno-González, E.1, Contreras-Méndez, J. A.1, León-Sicaños, C. R.2 y López-Moreno, H. S.1*

Producción de películas comestibles a base de harina de almendra de mango mediante la optimización de variables de proceso de extrusión termoplástica

Production of edible films based on mango kernel flour through optimization of thermoplastic extrusion process variables

46-59

Aguilar-Palazuelos, E.1, Sánchez-Chilero, M.A. 1, Fitch-Vargas, P.R. 2, Limón-Valenzuela, V. 1, Calderón Castro, A.1, Ruiz-Armenta, X.A.1, Gutiérrez-Dorado, R.1, López-Díaz, A.1, Galán-Rodríguez, L.3, Gómez-Favela, M.A.1*

CARTA DEL EDITOR

Estimada comunidad de la Química

Con gran entusiasmo, presentamos la tercera edición de QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas, una revista científica dedicada a la difusión de investigaciones de vanguardia y al fomento del conocimiento en diversas áreas del saber. Desde su fundación, QUIBIOUAS ha buscado ser un puente entre la ciencia y la sociedad, promoviendo un diálogo accesible y enriquecedor entre investigadores, académicos y lectores curiosos de todo el mundo.

En esta edición, reunimos una colección de artículos que exploran temas actuales y relevantes. Cada contribución ha sido rigurosamente revisada por pares, garantizando la calidad y la fiabilidad de la información que presentamos.

Agradecemos a todos los autores y revisores que han dedicado su tiempo y esfuerzo para hacer posible esta edición. Su compromiso con la excelencia académica y su pasión por el conocimiento son la esencia de QUIBIOUAS. También expresamos nuestra gratitud a nuestros lectores, cuya curiosidad y sed de saber nos inspiran a seguir creciendo y mejorando con cada número.

Esperamos que disfruten de esta nueva edición y que los artículos aquí presentados sean una fuente de inspiración y aprendizaje. Que cada página les invite a explorar, cuestionar y descubrir, contribuyendo así al enriquecimiento de nuestro vasto y maravilloso mundo del conocimiento.

Atentamente

Dra. Martha Edith López López

Editora en Jefe

QUIBIOUAS Revista de Ciencias Químico Biológicas

Desempeño diagnóstico y correlación de la proteína en orina de 12 horas vs. 24 horas en mujeres embarazadas con preeclampsia en un Hospital Obstétrico Mexicano

Diagnostic performance and correlation of 12-hour vs. 24-hour urinary protein in pregnant women with preeclampsia at a Mexican Obstetric Hospital

Gámez-Meza, A.H.¹, Terán-Cabanillas, E.², Murillo-Llanes, J.^{2,3}, Canizalez-Román, A.^{2,3}, León-Sicaños, N.², Sandoval-Quirón, P.A.⁴, Osuna-Álvarez, O.⁴, Peña-García, G.M.², Magaña-Ordorica, D.², Favela-Heredia, C.E.⁵, Heusinkveld, J.M.⁶, Castro-Apodaca, F.J.^{2,7*}

¹ Departamento de Ginecología y Obstetricia, Hospital de la Mujer, Secretaría de Salud, 80020 Culiacán, Sinaloa, México. ² Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80246, Av. de las Américas S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México. ³ Departamento de Investigación, Hospital de la Mujer, Secretaría de Salud, 80020 Culiacán, Sinaloa, México. ⁴ Centro de Diagnóstico Fetal, 81200, Los Mochis, Sinaloa, México. ⁵ Departamento de Medicina Fetal, Hospital de la Mujer, Secretaría de Salud, 80020 Culiacán, Sinaloa, México. ⁶ Profesor Asociado, Departamento de Obstetricia y Ginecología, Universidad de Arizona, 85724, Tucson, Arizona, EE.UU.

⁷ Residente SubEspecialidad de Urología Ginecológica, Antiguo Hospital Civil de Guadalajara "Fray Antonio Alcalde", 44200, Guadalajara, Jalisco, México.

RESUMEN

La preeclampsia (PE) afecta hasta el 8% de los embarazos. En casos de PE no severa, el diagnóstico requiere la presencia de proteinuria, siendo la recolección de orina de 24 horas (R024H) el estándar de oro. Sin embargo, tiempos de recolección más cortos podrían mejorar la eficiencia clínica. El objetivo de este proyecto consistió en evaluar la precisión de la recolección de orina de 12 horas (R012H) en comparación con la de R024H para el diagnóstico de PE en el Hospital de la Mujer de Sinaloa. Se realizó un estudio observacional transversal que incluyó a 103 pacientes embarazadas con trastornos hipertensivos ingresadas en el Hospital de la Mujer entre el 1 de mayo y el 31 de octubre de 2022. La R012H se recolectó en un contenedor etiquetado dentro del período de 24 h. Encontrando que la R012H demostró alta sensibilidad y especificidad en comparación con la R024H, con una eficacia diagnóstica del 88.35% y un coeficiente de correlación de $r = 0.60$ ($p < 0.000$) con un umbral de >150 mg/12 h. La R012H muestra una correlación positiva moderada con la R024H y ofrece ventajas potenciales al reducir el tiempo de cateterización, el riesgo de infección y los costos de hospitalización asociados con el manejo de la PE.

Palabras clave: Preeclampsia, Proteinuria, Diagnóstico temprano, Recolección de orina.

ABSTRACT

Preeclampsia (PE) affects up to 8% of pregnancies. In cases of non-severe PE, diagnosis requires the presence of proteinuria, with the 24-hour urine collection (24HUC) being the gold standard. However, shorter collection times could improve clinical efficiency. The objective of this project was to evaluate the accuracy of 12-hour urine collection (12HUC) compared to 24HUC. A cross-sectional observational study was conducted that included 103 patients with hypertensive disorders admitted to the Women's Hospital between May 1 and October 31, 2022. R012H was collected in a labeled container within 24 h. R012H demonstrated higher sensitivity and specificity compared to R024H, with a diagnostic efficiency of 88.35% and a correlation coefficient of $r = 0.60$ ($p < 0.000$), with a threshold of >150 mg/12 h. R012H shows a moderate positive correlation with R024H and offers potential advantages by reducing catheterization time, infection risk, and hospitalization costs associated with PE management.

Keywords: Preeclampsia, Proteinuria, Early diagnosis, Urine collection.

*Autor de correspondencia: Francisco Castro Apodaca

Email: francisco.castroapodaca@uas.edu.mx

ORCID ID: [0000-0002-1857-1595](https://orcid.org/0000-0002-1857-1595)

Registro ORCID Autores: TC: [0000-0002-6915-3852](https://orcid.org/0000-0002-6915-3852); JH: [0000-0002-5708-2647](https://orcid.org/0000-0002-5708-2647); GM: [0009-0005-8085-9476](https://orcid.org/0009-0005-8085-9476);

ML: [0000-0002-8937-2710](https://orcid.org/0000-0002-8937-2710); MO: [0009-0006-9307-2119](https://orcid.org/0009-0006-9307-2119); PG: [0000-0001-9935-608X](https://orcid.org/0000-0001-9935-608X);

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

INTRODUCCIÓN

Dentro de los diferentes estados hipertensivos que pueden manifestarse durante el embarazo, la PE es una enfermedad que puede complicar hasta el 8% de todas las gestaciones a nivel mundial (ACOG, 2020). Esta condición, estrechamente relacionada con una alta morbilidad y mortalidad materna y neonatal, contribuye de manera significativa a la muerte de aproximadamente 46,000 mujeres embarazadas y 500,000 recién nacidos cada año en todo el mundo (Cresswell *et al.*, 2025). Debido a sus graves consecuencias clínicas, la PE se encuentra constantemente entre las dos primeras causas de mortalidad materna y de infecciones neonatales, compitiendo en primer lugar con la hemorragia obstétrica, lo que subraya la importancia de su detección, diagnóstico y tratamiento oportunos (Restrepo-Moreno *et al.*, 2016; Magee *et al.*, 2022).

La aplicación de cuestionarios de tamizaje a todas las mujeres embarazadas constituye un componente esencial del cuidado prenatal. Estos instrumentos de evaluación deben permitir la identificación de los factores de riesgo más relevantes asociados con la PE, como son las características sociodemográficas de la paciente, antecedentes de PE en embarazos previos y el uso de técnicas de reproducción asistida. La identificación de mujeres con un mayor riesgo de desarrollar PE posibilita su referencia oportuna a médicos especialistas en el manejo de embarazos de alto riesgo, lo que puede mejorar significativamente los desenlaces materno-fetales. En los países en vías de desarrollo, incluido México, el tamizaje para PE se basa principalmente en estudios de ultrasonido, evaluación del flujo Doppler de las arterias uterinas y medición de la presión arterial. No obstante, en muchas de estas naciones, los sistemas de salud generalmente no cuentan con la disponibilidad de biomarcadores angiogénicos para la detección de dicha patología, a pesar de que en estas regiones la PE representa una de las principales causas de morbilidad y mortalidad materna y perinatal (Magee *et al.*, 2022; Wright *et al.*, 2020).

Desde el punto de vista operativo, el diagnóstico de PE se establece cuando se detectan cifras de presión arterial superiores a 140 / 90 mm Hg, que aparecen de manera súbita en una paciente con una gestación mayor a 20 semanas. Además, el diagnóstico se confirma cuando la hipertensión se asocia con alguna evidencia de disfunción orgánica, como la presencia de proteinuria, trombocitopenia, alteraciones enzimáticas, disfunción hepática, incremento en los niveles de creatinina, edema pulmonar, encefalopatía hipertensiva, restricción del crecimiento intrauterino, alteraciones en la flujometría arterial uterina o

un desequilibrio en los marcadores angiogénicos (Lai *et al.*, 2021; Suresh *et al.*, 2023).

Dentro de los parámetros diagnósticos utilizados para identificar la PE, la proteinuria se considera un marcador clave en la evaluación clínica de esta enfermedad. La R024H es el método de referencia o estándar de oro para el diagnóstico de la proteinuria en pacientes con sospecha de PE. Se establece como criterio diagnóstico la detección de una cantidad de proteína en orina superior a 300 mg en un período de 24 h, acompañada de cifras de presión arterial elevadas a partir de la semana 20 de gestación. Sin embargo, este método presenta importantes limitaciones en la práctica clínica, ya que requiere que la paciente permanezca hospitalizada durante un período mínimo de un día completo para garantizar una recolección adecuada de la muestra. Esto no solo prolonga la estancia hospitalaria de la paciente, sino que, cuando se realiza de manera ambulatoria, puede estar sujeto a errores en la recolección de la muestra, lo que aumenta el riesgo de obtener resultados falsos negativos y, en consecuencia, retrasar el inicio del tratamiento adecuado (Côté *et al.*, 2008; Rao *et al.*, 2023).

Se plantea la hipótesis de que la R012H presenta una alta correlación y concordancia diagnóstica con la R024H para la detección de proteinuria en mujeres con PE, lo cual respaldaría su uso como alternativa válida en contextos clínicos donde el tiempo y los recursos son limitados.

Con el objetivo de superar estas limitaciones y optimizar la detección de proteinuria en PE, se ha propuesto el uso de la recolección de orina durante un período más corto, R012H. La American College of Obstetricians and Gynecologists (ACOG) ha respaldado esta alternativa como un método válido para la detección de proteinuria, considerando como punto de referencia una cantidad superior a 150 mg de proteínas en un período de 12 h para establecer el diagnóstico en un contexto de PE.

A pesar de que la ACOG ha validado el uso de la recolección de orina en 12 h para la detección de proteinuria, este estudio tiene como objetivo evaluar su desempeño diagnóstico en una población mexicana, dado que las condiciones epidemiológicas, clínicas y operativas en contextos de países en vías de desarrollo pueden diferir significativamente de aquellas en las que se estableció dicha validación. Este método ofrece varias ventajas en comparación con la recolección convencional de 24h, ya que permite reducir la estancia hospitalaria de las pacientes, disminuir el tiempo de uso de sondas vesicales en aquellos casos donde se requiera su colocación, minimizar el riesgo de infecciones urinarias asociadas al

uso prolongado de catéteres y, adicionalmente, disminuir los costos de atención médica (Stout *et al.*, 2015).

Con el objetivo de mejorar la precisión diagnóstica en la identificación de proteinuria en PE, este estudio explora la correlación entre los resultados obtenidos mediante las recolecciones de orina de 12 y 24 h. Validar la utilidad de la R012H frente a la R024H permitiría optimizar los criterios clínicos empleados en el manejo de esta patología. En nuestra institución, no existen estudios previos que evalúen específicamente esta relación, por lo que resulta esencial establecer el grado de concordancia entre ambos métodos. Una correlación positiva reforzaría la confiabilidad diagnóstica del método abreviado y respaldaría su implementación en la práctica clínica.

El desempeño de una prueba diagnóstica se determina comparándola con un método de referencia, o estándar de oro, que ofrece la mayor certeza diagnóstica. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la correlación entre R024H y R012H, así como analizar la eficacia diagnóstica de la R012H para detectar proteinuria en mujeres con PE.

MATERIALES Y MÉTODOS

DISEÑO DEL ESTUDIO

Se llevó a cabo un estudio prospectivo, transversal, observacional y analítico, en el que se incluyeron 103 pacientes hospitalizadas en el Hospital de la Mujer con diagnóstico de PE, durante el periodo comprendido entre el 1 de mayo y el 31 de octubre de 2022.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Se incluyeron pacientes hospitalizadas en el Área de Obstetricia del Hospital de la Mujer de la Secretaría de Salud de Sinaloa, con diagnóstico confirmado de PE y con resultados disponibles de proteinuria tanto en R024H y R012H. No se establecieron restricciones por edad. Todas las participantes firmaron un consentimiento informado.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

Se excluyeron pacientes que no completaron el proceso de R024H o que decidieron no participar en el estudio.

RECOLECCIÓN DE ORINA

La recolección de orina se inició al ingreso hospitalario de la paciente y se realizó en un recipiente debidamente etiquetado. Se realizó R012H; al término de este periodo se extrajo una muestra de 6 mL y se registró el volumen total recolectado. Luego se continuó hasta completar las 24 h y al finalizar se extrajo una segunda muestra de 6 mL para análisis. Ambas

muestras fueron enviadas al laboratorio junto con el volumen total recolectado para su procesamiento.

Simultáneamente, el personal del Laboratorio de Análisis Clínicos del Hospital de la Mujer realizó la toma de muestra sanguínea en condiciones de ayuno, mediante punción venosa, durante las primeras horas del ingreso hospitalario.

Los análisis bioquímicos incluyeron la medición de deshidrogenasa láctica (DHL), ácido úrico, creatinina sérica, nitrógeno ureico en sangre (BUN) y recuento plaquetario, así como la determinación de creatinina urinaria y otros parámetros relacionados con la función renal.

Todas las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Análisis Clínicos del Hospital de la Mujer, siguiendo protocolos estandarizados de control y aseguramiento de la calidad.

DETERMINACIÓN DE PROTEINURIA

La cuantificación de proteína en las muestras se realizó con el sistema Roche Cobas 6000, modelo C501 (Basel, Switzerland), utilizando el reactivo TP2 (Total Protein Gen.2) (Basel, Switzerland), el cual presenta un coeficiente de variación entre -2 y +2.

Se definieron los siguientes valores diagnósticos:

Proteinuria en 12 h: valores >150 mg de proteína en la muestra de 6 mL.

Proteinuria en 24 h: valores >300 mg de proteína en la muestra de 6 mL.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se construyó una base de datos con pacientes con trastornos hipertensivos del embarazo. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para variables cuantitativas (media, mediana, desviación estándar) y frecuencias para variables cualitativas.

Para evaluar el desempeño diagnóstico de la R012H, se compararon sus resultados con los de R024H (considerada como estándar de oro). La correlación entre ambas fue evaluada mediante el coeficiente de correlación de McPearson.

El análisis estadístico se realizó utilizando Stata Intercooled versión 13.1 (College Station, Texas, USA).

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El estudio se desarrolló conforme a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki (1975) y el Acuerdo de la Secretaría de Salud publicado el 26 de enero de 1982. Fue aprobado por el Comité de Ética e Investigación del Hospital de la Mujer en Culiacán, Sinaloa, con el número

202310-22, garantizando la confidencialidad y el bienestar de todas las participantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron un total de 103 resultados obtenidos a partir de pruebas de R012H y R024H en pacientes diagnosticadas con PE entre el 1 de mayo y el 31 de octubre de 2022, quienes cumplieron con los criterios de inclusión establecidos. La edad promedio de las participantes fue de 25.8 años (DE ± 6.5), con un rango de 14 a 40 años, siendo el grupo etario más prevalente el de 40 años (39%). La edad gestacional promedio fue de 37.0 semanas (DE ± 3.3), y el índice de embarazo promedio se situó en 2.2 gestaciones (DE ± 1.2), con un rango de 1 a 7 embarazos. También se evaluaron parámetros bioquímicos vinculados con el daño a órganos diana, como la deshidrogenasa láctica, ácido úrico, nitrógeno ureico y creatinina (Tabla 1).

Tabla 1. Historia obstétrica y valores de laboratorio asociados con lesiones en órganos blanco

Variable	Valor $\pm$ DE
Edad (años)	25.8 $\pm$ 6.5
Semanas de gestación	37.0 $\pm$ 3.3
Número de embarazos	2.2 $\pm$ 1.2
Plaquetas ($\times 10^3/\text{mm}^3$)	224 $\pm$ 64
Deshidrogenasa láctica (UI/L)	235.2 $\pm$ 337.9
Ácido úrico (mg/dL)	4.8 $\pm$ 1.3
Creatinina (mg/dL)	0.58 $\pm$ 0.11
Nitrógeno ureico en sangre (mg/dL)	8.3 $\pm$ 3.2

La edad promedio de las participantes fue de 25.8 $\pm$ 6.5 años, un rango dentro de lo esperado para embarazos en población general, y que no se considera de riesgo per se. La edad materna joven ha sido asociada con menor riesgo de comorbilidades, aunque esto puede variar según factores socioculturales y de atención prenatal (Sibai, 2005).

En promedio, las mujeres embarazadas se encontraban en la semana 37.0 $\pm$ 3.3 de gestación, lo que indica una mayoría en el término o pre-término inmediato. Esta etapa es crítica en la vigilancia de signos de compromiso orgánico, como elevación de biomarcadores renales o hepáticos, que pueden indicar desarrollo de PE u otras complicaciones obstétricas.

En cuanto al número de embarazos, se observó que las mujeres no eran primigestas en su mayoría. La multiparidad leve no se asocia por sí sola con mayor riesgo de complicaciones, pero en combinación con factores como edad o antecedentes, puede modificar el riesgo de PE (ACOG, 2020).

Respecto a los biomarcadores bioquímicos, las plaquetas se encontraron en niveles normales. Sin embargo, el valor de deshidrogenasa láctica (DHL) mostró una desviación estándar amplia (235.2 $\pm$ 337.9 UI/L), lo que podría indicar variabilidad individual considerable. Elevaciones significativas de DHL (>600 UI/L) se han relacionado con hemólisis y daño celular, siendo marcador útil de lesiones en órganos blanco en PE (Vazquez-Alanis *et al.*, 2019). El ácido úrico, creatinina y nitrógeno ureico en sangre se encontraron dentro de los rangos normales.

En conjunto, los datos sugieren una población gestante sin alteraciones clínicas graves en los parámetros de laboratorio medidos, pero con una necesidad de vigilancia estrecha, especialmente por los niveles dispersos de DHL y ácido úrico, que podrían estar relacionados con etapas tempranas de alteración endotelial o disfunción orgánica subclínica.

Tabla 2. Tabla 2x2 de los resultados de las pruebas de proteína en orina de 12 horas y 24 horas.

	>300 mg/24h	<300 mg/24h	Total
>150 mg/12H	61	2	63
<150mg/12H	10	30	40
Total	71	32	103

Con el objetivo de evaluar la validez diagnóstica de la R012H en comparación con la R024H (considerada como prueba de referencia), se construyó una tabla de contingencia 2 x 2 (Tabla 2) y se calcularon indicadores diagnósticos clave: sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo (VPP), valor predictivo negativo (VPN), razones de verosimilitud y eficacia global (Tabla 3). Los resultados obtenidos mostraron una sensibilidad del 85.92% y una especificidad del 93.73%, respaldando el uso potencial de la R012H como una alternativa diagnóstica viable.

Estos hallazgos están en concordancia con estudios previos que han sugerido la utilidad clínica de reducir el tiempo de recolección de orina para la cuantificación de proteinuria. Desde los primeros planteamientos de Rinehart *et al.* (1999), hasta investigaciones recientes como las de

Tabla 3. El desempeño de la recolección de orina de 12 horas se comparó con recolección de 24 horas (estándar de oro).

Prueba diagnóstica	S	E	PPV	VPN	LR+	LR-	Ef	AUC
Proteinuria in R012H	85.92	93.75	96.82	75.03	13.75	0.15	88.35	0.9123

R012H: Colección de orina de 12 horas; S: sensibilidad; E: especificidad; PPV: valor predictivo positivo; NPV: valor predictivo negativo; LR+: razón de verosimilitud positiva; LR-: razón de verosimilitud negativa; Ef: Eficacia; AUC: Área bajo la curva

Sasipomos Sarnnok *et al.* (2020), se ha demostrado que la R012H permite una detección confiable de la proteinuria, disminuyendo al mismo tiempo la necesidad de hospitalizaciones prolongadas y los riesgos asociados a procedimientos invasivos como la sonda vesical. En nuestra muestra, el valor predictivo negativo fue particularmente alto, lo que indica una elevada probabilidad de que una paciente con resultado negativo en la R012H realmente no presente PE. Asimismo, el valor predictivo positivo sugiere que las pacientes con diagnóstico basado en esta prueba tienen una alta probabilidad de padecer efectivamente la enfermedad. En términos de desempeño global, el área bajo la curva (AUC) ROC fue de 0.9123 (Figura 1), lo que refleja una excelente capacidad discriminativa. Además, el coeficiente de relación de Pearson entre R012H y R024H fue de 0.60 ($p < 0.001$), indicando una correlación positiva moderada entre ambas técnicas (Tabla 4).

Tabla 4. correlación de Pearson entre R012H y R024H

Prueba diagnóstica	Proteinuria >150 mg / 12 h (R012H)	Valor de p
R024H	0.60	0.000

Comparativamente, estudios como el de Silva *et al.* (2017), que incluyó 99 pacientes con puntos de corte >150 mg / 12 h y >300 mg / 24 h, reportaron una sensibilidad de 85.9% y una especificidad de 91.7%, junto a un VPP de 88.2% y un VPN de 90%. Estos valores son muy similares a los obtenidos en nuestro estudio, lo que refuerza la reproducibilidad y consistencia del uso de R012H en diferentes contextos clínicos.

Cabe señalar que el estudio de Sasipomos Sarnnok *et al.* (2020) reportó una sensibilidad de 89.8%, especificidad de 90.8% y una precisión diagnóstica del 90.2%, con una correlación más alta ($r = 0.83$). No obstante, en dicho estudio el punto de corte fue de 143 mg / 12 h, el cual

es inferior al utilizado en nuestra investigación (150 mg / 12 h), lo que podría explicar la diferencia en la magnitud de la correlación observada. En suma, los resultados obtenidos en esta investigación aportan evidencia sólida sobre la viabilidad del uso de la recolección de orina de 12 h como alternativa diagnóstica confiable y eficiente para la detección de proteinuria en pacientes con sospecha de PE. Su implementación en entornos hospitalarios no solo puede optimizar el diagnóstico precoz y reducir costos, sino también disminuir la exposición de las pacientes a procedimientos innecesarios, favoreciendo una atención médica más humana, rápida y efectiva. Estos beneficios deben ser considerados por los responsables de protocolos clínicos, especialmente en sistemas de salud con recursos limitados.

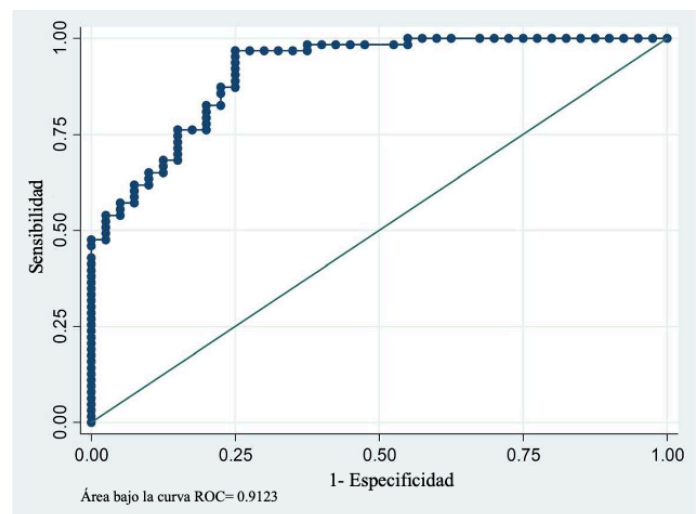


Figura 1. Sensibilidad y especificidad de la prueba de colección de orina de 12 horas en comparación con la prueba de 24 horas referencia. La figura mostrada es una curva ROC (Receiver Operating Characteristic) que evalúa el desempeño diagnóstico de la colección de orina de 12 horas, comparada con una prueba de referencia, que es la colección de orina de 24 horas. El área bajo la curva (AUC) de 0.9123 sugiere que la prueba de 12 horas puede distinguir de manera efectiva entre pacientes con y sin la preeclampsia. Es decir, es una alternativa válida y confiable frente a la prueba tradicional de 24 horas, siendo más práctica por su menor duración.

CONCLUSIONES

El método R012H para el diagnóstico de proteinuria en mujeres con trastornos hipertensivos del embarazo ha demostrado ser una alternativa viable a la R024H. Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que R012H ofrece una buena sensibilidad y especificidad, con una eficiencia diagnóstica del 88.35%.

Se observó una correlación moderada positiva ($r = 0.60$) con un punto de corte de >150 mg / 12 h, lo que permite considerar R012H como un método confiable, con la ventaja adicional de reducir costos de hospitalización y mejorar la accesibilidad al diagnóstico en entornos hospitalarios con recursos limitados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al personal del laboratorio clínico del Hospital de la Mujer por su colaboración en la realización de este estudio. Asimismo, se agradece sinceramente la participación voluntaria y compromiso de las pacientes involucradas en el estudio.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo.

APROBACIÓN DE COMITÉ DE INVESTIGACIÓN Y DE ÉTICA

El estudio fue aprobado por el Comité de Ética del Hospital de la Mujer, Secretaría de Salud, con el número de registro 202310-22.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados y analizados durante el presente estudio están disponibles bajo solicitud razonable al autor correspondiente.

REFERENCIAS

American College of Obstetricians and Gynecologists. (2020). Gestational hypertension and preeclampsia: ACOG practice bulletin, number 222. *Obstet Gynecol*, 135(6), e237-e260. <https://doi.org/10.1097/AOG.0000000000003891>

Côté, A. M., Firoz, T., Mattman, A., Lam, E. M., von Dadelszen, P., & Magee, L. A. (2008). The 24-hour urine collection: gold standard or historical practice?. *American journal of obstetrics and gynecology*, 199(6), 625-e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2008.06.009>

Cresswell, J. A., Alexander, M., Chong, M. Y. C., Link, H. M., Pejchinovska, M., Gazeley, U., Ahmed, S. M. A., Chou, D., Moller, A.-B., Simpson, D., Alkema, L., Villanueva, G., Sguassero, Y., Tunçalp, Ö., Long, Q., Xiao, S., & Say, L. (2025). Global and regional causes of maternal deaths 2009–20: a WHO systematic analysis. *The Lancet Global Health*, 13(4), e626–e634. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(24\)00560-6](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(24)00560-6)

Lai, J., Syngelaki, A., Nicolaides, K. H., von Dadelszen, P., & Magee, L. A. (2021). Impact of new definitions of preeclampsia at term on identification of adverse maternal and perinatal outcomes. *American journal of obstetrics and gynecology*, 224(5), 518-e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2020.11.004>

Magee, L. A., Nicolaides, K.H., & Von Dadelszen, P. (2022). Preeclampsia. *The New England Journal of Medicine*, 386 (19), 1817-1832. <https://doi.org/10.1056/nejmra2109523>

Rao, S., Somalwar, S., Bhalerao, A., Raman, V., Rao Jr, S., & Raman Jr, V. (2023). Accuracy of Spot Urine Albumin Creatinine Ratio With Respect to 24-Hour Urine Albumin for the Detection of Proteinuria in Antenatal Women With Preeclampsia: A Descriptive Study. *Cureus*, 15(6). <http://doi:10.7759/cureus.39961>

Restrepo-Moreno, M., Arango-Buitrago, V., Gil-Pabón, C. J., Campo-Campo, M. N., García-Posada, R. A., Gutiérrez-Marín, J. H., Sanín-Blair, J. E., & Echavarría-Restrepo, L. G. (2016). Evaluación de las características operativas de la relación proteína / creatinina en orina ocasional para la detección de proteinuria significativa en gestantes con sospecha de preeclampsia. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 67(3), 223. <https://doi.org/10.18597/rcog.770>

Rinehart, B. K., Terrone, D. A., Larmon, J. E., Perry, K. G., Martin, R. W., & Martin, J. N. (1999). A 12-hour urine collection accurately assesses proteinuria in the hospitalized hypertensive gravida. *Journal of Perinatology*, 19(8), 556-558. <https://doi.org/10.1038/sj.jp.7200271>

Sarnnok, S., & Kitiyodom, S. (2022). Accuracy of 12-hour versus 24-hour Urine Collection for Diagnosis of Preeclampsia. *Thai Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 82-90. <https://doi.org/10.14456/tjog.2022.11>

- Sibai, B. M. (2005). Diagnosis, prevention, and management of eclampsia. *Obstetrics & Gynecology*, 105(2):402-10. <https://doi:10.1097/01.AOG.0000152351.13671.99>.
- Silva, R. M., Pereira, S. R., Rego, S., & Clode, N. (2018). Accuracy of 12-hour urine collection in the diagnosis of preeclampsia. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 142(3), 277-282. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12536>
- Stout, M. J., Conner, S. N., Colditz, G. A., Macones, G. A., & Tuuli, M. G. (2015). The utility of 12-hour urine collection for the diagnosis of preeclampsia: a systematic review and meta-analysis. *Obstetrics & Gynecology*, 126(4), 731-736. <https://doi.org/10.1097/aog.0000000000001042>
- Suresh, S., Patel, E., Mueller, A., Morgan, J., Lewandowski, W. L., Verlohren, S., ... & Rana, S. (2023). The additive role of angiogenic markers for women with confirmed preeclampsia. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 228(5), 573-e1. <http://doi:10.1016/j.ajog.2022.10.044>
- Vazquez-Alaniz, F., Salas-Pacheco, J. M., Sandoval-Carrillo, A. A., Llave-Leon, O., & Hernandez, E. M. M. (2019). Lactate dehydrogenase in hypertensive disorders in pregnancy: severity or diagnosis marker. *J Hypertens Manag*, 5, 040. <http://doi:10.23937/2474-3690/1510040>
- Wright, D., Wright, A., & Nicolaides, K. H. (2020). The competing risk approach for prediction of preeclampsia. *American journal of obstetrics and gynecology*, 223(1), 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2019.11.1247>

Calidad microbiológica y riesgo de infección por el consumo de emparedados elaborados en servicios de alimentación universitarios de Culiacán, Sinaloa, México

Microbiological quality and risk of infection for the consumption of sandwiches made in university food services in Culiacan, Sinaloa, Mexico

Castañeda-Ruelas, G.M.¹, González-Morales, D.², Fierros-Pérez, C.E.², Jiménez-Edeza, M.^{1*}

¹Laboratorio de Investigación y Diagnóstico Microbiológico, CAEF Gestión de la Calidad e Inocuidad Alimentaria UAS-CA-323, Programa de Posgrado Integral en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Las Américas S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México, CP. 80013

²Facultad de Biología, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Las Américas S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México, CP. 80013.

RESUMEN

El emparedado es un alimento popular en las universidades debido a la facilidad de consumo. Por ende, la pérdida de la inocuidad es una amenaza para el desarrollo de enfermedades. Este estudio examinó la calidad microbiológica y riesgo de infección por consumo de emparedados preparados en servicios de alimentación universitarios de Culiacán, Sinaloa, México. Se recolectaron 40 muestras de emparedados provenientes de cinco ($n = 8$) distintos servicios. La calidad microbiológica se determinó mediante la detección y/o cuantificación de *Listeria monocytogenes* (LM), *Salmonella* (SE), *Staphylococcus aureus* (SA), *Escherichia coli* (EC), coliformes totales (CT), mesófilos aerobios (MA), hongos y levaduras (HL). El riesgo de infección por consumo de emparedado (165 g por porción) fue realizado con las concentraciones de EC o SA determinadas. Adicionalmente, una encuesta descriptiva sobre las prácticas de venta fue realizada. La encuesta identificó la pérdida de la cadena de frío de los insumos perecederos y la exhibición del emparedado a la intemperie como factores de riesgo. MA (98 %), SA (98 %), EC (95 %), CT (88 %) y HL (95 %) fueron detectados en las muestras de emparedados, cuyas concentraciones variaron entre los servicios ($P < 0.05$). La presencia de LM y SE fueron descartadas en las muestras. El riesgo promedio por consumo de emparedado contaminado con SA y EC fue de 13.6/1,000 y 48.4/1,000 casos de infección, respectivamente. Se recomienda a los preparadores de alimentos reforzar las buenas prácticas higiénicas para garantizar la inocuidad y calidad del alimento, y minimizar el riesgo de infecciones en la población.

Palabras clave: Infección, Inocuidad, Microorganismos, Riesgo

ABSTRACT

Sandwiches are a popular food on university campuses due to their convenience. Therefore, safety concerns pose a potential risk for disease transmission. This study assessed the microbiological quality and infection risk of sandwiches prepared in university dining halls in Culiacan, Sinaloa, Mexico. Forty sandwich samples were collected from five food services ($n = 8$ each). Microbiological quality was assessed by detecting and/or quantifying *Listeria monocytogenes* (LM), *Salmonella* (SE), *Staphylococcus aureus* (SA), *Escherichia coli* (EC), total coliforms (TC), aerobic mesophiles (AM), fungi and yeasts (FY). The infection risk from eating sandwiches (165 g per serving) was estimated based on the concentrations of EC or SA. Additionally, a descriptive survey on sales practices was conducted. The survey identified cold chain interruptions for perishable ingredients and the outdoor display of sandwiches as risk factors. AM (98 %), SA (98 %), EC (95 %), TC (88 %), and FY (95 %) were detected in the samples, with levels varying across food services ($P < 0.05$). The presence of LM and SE was ruled out. The average risk from consuming a sandwich contaminated with SA and EC was 13.6/1,000 and 48.4/1,000 infection cases, respectively. Food handlers are advised to strengthen hygiene practices to ensure food safety and quality and to reduce the risk of infection in the population.

Keywords: Infection, Safety, Microorganisms, Risk

*Autor de correspondencia: Maribel Jiménez Edeza

Email: mjimenez@uas.edu.mx

ORCID ID: 0000-0002-9835-9665

Registro ORCID Autores: GM: 0000-0001-8970-0035;

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) son un problema de salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima la ocurrencia anual de 600 millones de casos de ETA, lo cual representa 420,000 casos de muerte. La mayoría de las ETA's se deben a infecciones por bacterias (*Salmonella*, *Campylobacter*, *Escherichia coli*, *Listeria* y *Vibrio cholerae*), virus (norovirus y hepatitis A), parásitos (*Taenia solium*, *Acaris*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica*, *Giardia*) o sustancias químicas tóxicas que pueden provocar desde enfermedades diarreicas hasta enfermedades severas. Los productos lácteos no pasteurizados, diversos alimentos listos para el consumo, frutas y hortalizas frescas se han identificado como los principales vehículos de ETA (OMS, 2025).

Particularmente en México, la Dirección General de Epidemiología (DGE) reporta 3,878,561 casos de infecciones intestinales y 25,929 casos de intoxicaciones alimentarias, así como la incidencia de infecciones relacionadas con ETA incluyendo ascariasis, brucelosis, enterobiasis, giardiasis, hepatitis A, salmonelosis, shigelosis y otras. La población joven resulta ser un segmento afectado con estos padecimientos (DGE, 2025). Cabe señalar que la relación epidemiológica y los alimentos involucrados en estos casos no están definidos en el sistema.

Actualmente, la población escolar opta por realizar su almuerzo en su centro de enseñanza (Sánchez, 2015). Por lo tanto, la garantía de la inocuidad de los alimentos preparados en los comedores o puntos de venta en los centros escolares es tema importante para la salud pública (Castañeda & Jiménez, 2024) debido a que esta población es un colectivo vulnerable (DGE, 2025). En México, se ha advertido sobre la calidad microbiológica de los alimentos preparados en los comedores de primarias, siendo *Salmonella*, *S. aureus* y *E. coli* los principales peligros identificados (Castañeda & Jiménez, 2020). Adicionalmente, el reporte de brotes de ETA e intoxicaciones en planteles escolares también ha sido expuesto en el país (Castañeda & Jiménez, 2024). La pérdida de la inocuidad se ha atribuido a la seguridad de las materias primas, la higiene del personal y la falta de protocolos de buenas prácticas higiénicas (Castañeda & Jiménez, 2017; Castañeda & Jiménez, 2020).

El monitoreo microbiológico es una herramienta fundamental para garantizar la inocuidad de los alimentos e identificar los peligros existentes (Mainardi & Bidoia, 2024). Esto requiere complementarse con modelos de análisis cuantitativo del riesgo microbiológico que permiten de forma integral describir la importancia de un peligro y alertar sobre el riesgo para la salud pública. El análisis cuantitativo del riesgo

microbiológico es modelos matemáticos probabilísticos que permiten inferir sobre la proporción de personas que enfermarían o morirían por exposición a un peligro particular basado en la identificación del peligro, la evaluación de la exposición, el modelo dosis-reacción y la caracterización del riesgo (Giaccone & Ferri, 2005). El análisis cuantitativo del riesgo microbiológico ha sido ampliamente utilizado, logrando mejorar la seguridad alimentaria, desarrollar políticas útiles en materia de inocuidad y establecer medidas de mitigación (Koutsoumanis *et al.*, 2021).

En México, los alimentos principales de los cuales está conformado el almuerzo o refrigerio en los comedores escolares son comidas corridas y listas para el consumo (Sánchez, 2015), los cuales han sido previamente vinculados a ETA's (Castañeda & Jiménez, 2020; Castañeda & Jiménez, 2024). En este sentido, el consumo de emparedados provenientes de servicios de alimentación universitarios puede advertir el riesgo de infecciones entre los consumidores. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue explorar las condiciones higiénicas y el análisis de la calidad microbiológica y el riesgo de infección por consumo de emparedados preparados en servicios de alimentación universitarios en Culiacán, Sinaloa, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

DISEÑO DEL ESTUDIO

Se realizó un estudio transversal en cinco servicios de alimentación ubicados en la ciudad universitaria de Culiacán, Sinaloa, México, de mayo a junio de 2024. Para la realización del estudio, los servicios de alimentación fueron identificados con una letra mayúscula (A, D, O, P y Q) con la finalidad de resguardar el nombre y la ubicación. Los servicios de alimentación se caracterizaban por tener infraestructura y operación similar, incluyendo instalaciones semiabiertas con cocinas adaptadas en los espacios de los planteles escolares, preparación de los emparedados y exposición del alimento durante su venta. Los emparedados estaban compuestos de insumos perecederos incluyendo pan, jamón, queso, mayonesa y diversas verduras (lechuga, tomate, cebolla y aguacate). El diseño del estudio incluyó tres evaluaciones: (1) descripción de las prácticas de venta de los emparedados en los servicios de alimentación, (2) evaluación de la calidad microbiológica de los emparedados, y (3) estimación del riesgo de infección por consumo de emparedados contaminados.

Tabla 1. Descripción de las condiciones de venta de los emparedados en los servicios de alimentación universitarios evaluados en Culiacán, Sinaloa, México

Reactivo	%Si	%No	P	D	Q	A	O
Adecuación de instalaciones para una cocina fija.	100	0	■	■	■	■	■
Posee estaciones de lavado de manos.	100	0	■	■	■	■	■
Mantenimiento de limpieza visual aparente.	100	0	■	■	■	■	■
Posee contenedores de basura.	100	0	■	■	■	■	■
Presenta personal con uniformes e higiene aparente.	60	40	■	■	■	■	■
Refrigeración de las materias primas perecederas.	0	100	■	■	■	■	■
Preparación del emparedado en el momento.	60	40	■	■	■	■	■
Presencia de empaque en el emparedado.	60	40	■	■	■	■	■
Exhibición del emparedado en refrigeración.	0	100	■	■	■	■	■

La leyenda de color indica el cumplimiento (■) o no cumplimiento (■) del reactivo por parte del servicio de alimentación. Las letras mayúsculas (P, D, Q, A, O) identifican a los servicios de alimentación.

DESCRIPCIÓN DE LA VENTA DE EMPAREDADOS ESCOLARES

Se realizaron evaluaciones in situ por personal capacitado para registrar las condiciones y prácticas de venta de los emparedados en los servicios de alimentación de los planteles escolares seleccionados en la ciudad universitaria de Culiacán, Sinaloa, México. En la Tabla 1 se describen los principales elementos evaluados. Cada elemento se evaluó por observación directa y se registró su cumplimiento (“sí” o “no”) con base en la evidencia. La inspección del lugar y la recolección de las muestras se realizaron sin informar al personal del servicio de alimentación para evitar sesgos en los resultados.

RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE EMPAREDADOS

Se recolectaron un total de 40 muestras de emparedados obtenidas de cinco servicios de alimentación seleccionados (n = 8) pertenecientes a cinco diferentes planteles escolares de la ciudad universitaria de Culiacán, Sinaloa, México. La recolección de las muestras se realizó de manera aleatoria y en condiciones asépticas. Los emparedados completos se adquirieron después de su preparación y durante su exhibición de la misma manera que un consumidor los compraría, y se colocaron en bolsas de plástico estériles previamente identificadas. Todas las muestras se transportaron en neveras portátiles inmediatamente al laboratorio para su análisis microbiano dentro de las 2 h posteriores a la recolección.

CUANTIFICACIÓN DE INDICADORES

Para la cuantificación de *S. aureus* (SA), *E. coli* (EC), coliformes totales (CT), mesófilos aerobios (MA), hongos y levaduras (HL) se utilizó el método de recuento en placa con agar selectivo. Brevemente, se homogeneizaron manualmente 10 g de cada muestra con 90 mL de agua peptona (AP) al 0.1 % durante 2 min. Posteriormente, se realizaron diluciones decimales en serie en AP 0.1 %, y se sembraron por triplicado mediante goteo (SA, EC y CT) y duplicado por extensión (MA y HL) en placa según el microorganismo. Para la cuantificación de SA, EC, CT, MA y HL se utilizaron agar Baird Parker suplementado con emulsión de telurito de yema de huevo, agar Eosina Azul Metileno de Levin, agar Rojo Violeta Bilis Lactosa, agar Cuenta Total y agar Papa Dextrosa Acidificado, respectivamente. Según el microorganismo, las placas se incubaron a 37 °C por 24 h para SA, o 48 h para EC, CT y MA, y 25 °C por 5 días para HL. Después de la incubación, las colonias se contaron de acuerdo con la morfología colonial típica y la concentración se expresó como Log UFC/g.

DETECCIÓN DE *SALMONELLA* Y *L. MONOCYTOGENES*

Para el aislamiento de *Salmonella enterica* (SE), las muestras se enriquecieron con AP 1.0 % en una proporción de 1:10 y se incubaron durante 24 h a 37 °C. Se tomaron alícuotas de 0.1 mL y 1.0 mL y se homogeneizaron con 10 mL de caldo Rappaport-Vassiliadis y 9.0 mL de

caldo de selenito cistina, y se incubaron a 42 °C y 37 °C durante 24 h, respectivamente. Los cultivos se sembraron en agar Hektoen y agar XLD y se incubaron durante 24 h a 37 °C (Andrews *et al.*, 2018). Para *L. monocytogenes* (LM) se siguió el protocolo descrito por el USDA-FSIS (2017). Las muestras se enriquecieron con caldo UVM (Universidad de Vermont) en una proporción de 1:10 y se incubaron durante 24 h a 30 °C. De este cultivo se homogeneizaron 0.1 mL con 10 mL de caldo Fraser y se incubaron a 37 °C durante 48 h. Los cultivos positivos (coloración negra) se sembraron por duplicado en agar Oxford modificado y se incubaron durante 48 h a 37 °C. Las colonias presuntivas de SE y LM fueron confirmadas por pruebas bioquímicas.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL RIESGO MICROBIOLÓGICO

El estudio asume la exposición a SA o EC por el consumo de emparedados preparados en servicios de alimentación universitarios en Culiacán, Sinaloa, México. Para abordar la exposición, la concentración (UFC/g) de EC y SA fueron determinadas mediante el método de cuantificación descrito previamente. El tamaño de la porción de consumo por evento de emparedado se definió de 165 g, asumiendo pesos del pan (80 g/ 2 rebanadas), jamón (30 g), queso (25 g) y verduras diversas (30 g). La dosis (D) infectiva de EC y SA ingerida se estimó considerando las concentraciones (UFC/mL) de las bacterias en las muestras de emparedados (C), la cantidad (g) de emparedado consumida (E), y la tasa de hospitalización de EC (0.8 %) y SA (6.4 %) (Scallan *et al.*, 2011) como indicador de la capacidad infectiva (F). Por lo tanto, la D se calculó siguiendo la siguiente fórmula (1):

$$D = C \times E \times F \quad (1)$$

La probabilidad de infección (P_i) por consumo de una dosis (D) de emparedado contaminado con EC y SA se ajustó en un modelo de dosis-respuesta Beta-Poisson (Ecuación 2) (Pepper *et al.*, 2014) y exponencial (Ecuación 3) (Rose & Haas, 1999), respectivamente.

$$P_i = 1 - (1 + D/\beta)^{-\alpha} \quad (2)$$

$$P_i = 1 - e^{(-k \times D)} \quad (3)$$

Los valores de los coeficientes para los modelos son: $\alpha = 0.1705$ y $\beta = 1.613106$ (Pepper *et al.*, 2014) y $k = 7.64 \times 10^{-8}$ (Rose & Haas, 1999).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente utilizando el programa estadístico Minitab versión 17.0 y Excel versión 16.75.2. Para la calidad microbiológica de los emparedados se realizó una ANOVA de

una vía (servicios de alimentación universitario) seguida de la prueba de Tukey para determinar las diferencias entre las medias con un nivel de significación de $P < 0.05$. Un análisis multivariado de conglomerado de observaciones se empleó para determinar la similitud de las tasas de detección de los microorganismos en los servicios de alimentación universitarios evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DE VENTA DE EMPAREDADOS EN LOS SERVICIOS DE ALIMENTACIÓN UNIVERSITARIOS

En la Tabla 1 se describen las condiciones de venta de los emparedados en los servicios de alimentación universitarios en Culiacán, Sinaloa, México. Los factores de riesgo para la inocuidad principalmente identificados fueron la pérdida de la cadena de frío durante el almacenamiento de los insumos perecederos y la exhibición del emparedado a la intemperie con presencia o ausencia de algún empaque (plástico, aluminio, y/o papel).

Los hallazgos de esta investigación pretenden describir las condiciones de los servicios de alimentación universitarios y señalar las oportunidades de mejora en términos de inocuidad alimentaria. Los servicios de alimentación evaluados se caracterizaron por instalar establecimientos de preparación y venta de alimentos, y han incorporado a personal diverso para realizar las funciones pertinentes (Tabla 1). Desde esta perspectiva, es crucial garantizar que las instalaciones sean un entorno adecuado y el personal tenga la competencia para ejercer prácticas higiénicas para la preparación de los alimentos.

La capacitación continua y la adherencia a las buenas prácticas higiénicas son la base para asegurar la salubridad de los alimentos y la prevención de enfermedades asociadas (Todd *et al.*, 2008; Bucher *et al.*, 2010). Así mismo, el uso de las temperaturas seguras para el manejo de las materias primas y los alimentos preparados es una disposición sanitaria (DOF, 2009), y un factor que ejerce un control sobre los microorganismos deteriorantes y patógenos alimentarios (Mainardi & Bidoia, 2024), lo cual debe implementarse en los servicios de alimentación evaluados.

El uso de empaques es una estrategia recomendada para la garantía de la inocuidad de los alimentos (DOF, 2009; Mainardi & Bidoia, 2024), lo cual se observa como una práctica en la mayoría de los servicios de alimentación. El uso de empaques inocuos permite actuar como una barrera protectora contra peligros contaminantes y mantiene la calidad de los alimentos (Salgado *et al.*, 2021). Dado que los servicios de

alimentos están expuestos a la intemperie, la calidad del entorno en las instalaciones debe vigilarse e implementar programas de limpieza y desinfección oportunos para prevenir y minimizar el riesgo de infecciones (Agüeria *et al.*, 2021). Así mismo, el mantenimiento de los alimentos en temperaturas idóneas es una práctica higiénica recomendada para reducir el riesgo microbiológico y mejorar la calidad (DOF, 2009; Mainardi & Bidoia, 2024).

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Todas las muestras de emparedados fueron positivas para al menos un microorganismo evaluado, y las incidencias en las 40 muestras recolectadas fueron 98 % MA, 98 % SA, 95 % EC, 88 % CT y 95 % HL. La

presencia de SE y LM se descartó en el total de las muestras. En la Figura 1 se muestra la tasa de detección de cada microorganismo según el servicio de alimentación, exhibiendo tasas de detección similares para los microorganismos descomponedores (MA y HL) y tasas variables para los indicadores de la manipulación higiénica (SA), contaminación fecal (EC) y saneamiento deficiente (CT). Las prácticas higiénicas de los servicios de alimentación universitarios determinan los límites microbianos presentes en las muestras de emparedados ($P < 0.05$) (Tabla 2). Los niveles de contaminación microbiana se registraron mayores a 3.0 Log UFC/g ($> 1,000$ UFC/g) en las muestras de emparedados (Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de contaminación de los emparedados comercializados en los servicios de alimentación universitarios evaluados en Culiacán, Sinaloa, México.

Servicio	Concentración microbiana (Log UFC/g)				
	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	Coliformes totales	Mesófilos aerobios	Hongos & Levaduras
P	4.2 ± 0.4 ^a	6.2 ± 0.4 ^a	6.1 ± 0.6 ^a	6.3 ± 0.4 ^a	6.2 ± 0.6 ^a
D	4.1 ± 0.7 ^{ab}	5.1 ± 0.9 ^b	4.7 ± 2.2 ^b	5.7 ± 0.9 ^{ab}	5.8 ± 0.7 ^b
Q	3.4 ± 1.5 ^{bc}	3.3 ± 2.1 ^c	3.5 ± 1.6 ^b	5.9 ± 1.0 ^{ab}	6.7 ± 1.4 ^a
A	3.2 ± 0.5 ^c	3.2 ± 0.9 ^c	3.5 ± 1.7 ^b	5.5 ± 0.8 ^{ab}	5.3 ± 1.3 ^b
O	3.4 ± 0.4 ^c	4.6 ± 0.4 ^b	4.1 ± 1.7 ^b	5.1 ± 2.0 ^b	4.5 ± 2.8 ^c
Promedio	3.6 ± 0.9	4.5 ± 1.6	4.3 ± 1.9	5.7 ± 1.2	5.7 ± 1.7

Las letras mayúsculas (P, D, Q, A, O) identifican a los servicios de alimentación.

Las concentraciones microbianas (Log UFC/g) de los emparedados se expresaron como el promedio ± desviación estándar de tres (*S. aureus*, *E. coli* y Coliformes totales) o dos (Mesófilos aerobios y Hongos y levaduras) observaciones determinadas.

Los valores promedios dentro de cada columna que no comparten letra son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

Actualmente en México, la Norma Oficial Mexicana “NOM-251-SSA1-2009” establece los requisitos mínimos de buenas prácticas de higiene que deben observarse en el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y sus materias primas a fin de evitar su contaminación a lo largo de su proceso y garantizar la inocuidad. Esta norma es de observancia obligatoria para personas físicas y morales dedicadas a la preparación de los alimentos en el territorio nacional (DOF, 2009). Cabe señalar, la ausencia de normas o disposiciones específicas que dicten los límites microbianos que deben cumplir los alimentos preparados en establecimientos, como son los emparedados.

La calidad microbiológica de los emparedados ha sido exhibida previamente, siendo *Staphylococcus aureus*, *Salmonella*, *E. coli*, coliformes totales, *Listeria* spp., *Bacillus cereus*, mesófilos, hongos y

levaduras los principales peligros identificados en este alimento (Büyükyörük *et al.*, 2014; Kokkinakis *et al.*, 2020; Al-Busaidi *et al.*, 2023). Estos estudios reportan altos niveles de los indicadores microbiológicos, y la nula o baja detección de *Salmonella* y *L. monocytogenes* (< 1.0 %). Particularmente, Büyükyörük *et al.* (2014) exhibe la deficiente calidad microbiológica de emparedados en puestos callejeros debidos a los niveles de *S. aureus* (2.0 – 5.7 Log UFC/g), *E. coli* (1.0 – < 3.0 Log UFC/g), coliformes totales (1.0 – < 3.0 Log UFC/g), mesófilos (3.0 – 7.0 Log UFC/g), hongos (2.0 – 3.7 Log UFC/g) y levaduras (2.0 – 3.8 Log UFC/g) cuantificados. Estos valores son similares a los observados en las muestras (Tabla 2).

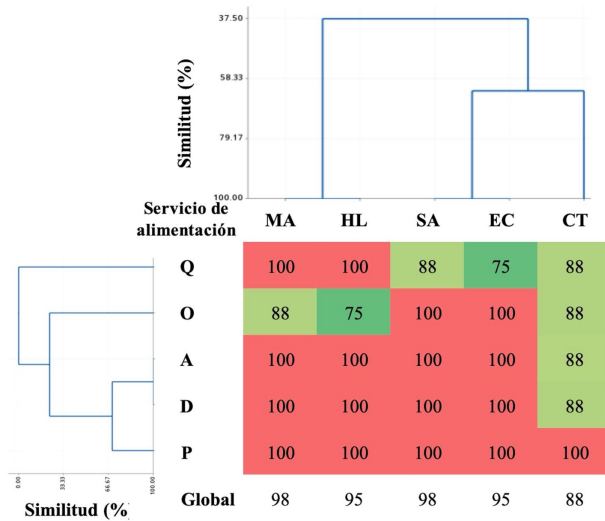


Figura 1. Perfiles microbiológicos de los servicios de alimentación universitarios en Culiacán, Sinaloa, México. Las columnas indican la tasa (%) de detección microbiana de los emparedados para cada comedor. La escala de colores está representada por gamas de colores que van del rojo (100 %) al verde (0 %). Los árboles de la figura muestran una agrupación jerárquica de enlace completo de los perfiles en función de la distancia euclidiana.

La materia prima, el personal, las superficies, el agua y el aire se han identificado como fuentes de microorganismos de descomposición y

patógenos que contribuyen al reto de garantizar la inocuidad del alimento (Castañeda & Jiménez, 2017; Castañeda & Jiménez, 2020; Mainardi & Bidoia, 2024). Las altas tasas de detección y los niveles de contaminación microbiológica sugieren cuestiones relacionadas con la higiene, los procesos de producción o condiciones de almacenamiento (Kokkinakis *et al.*, 2020), como se observa en el estudio (Tabla 1). Se ha descrito que, los altos niveles de MA contribuyen al deterioro organoléptico del alimento (textura y sabor). Así mismo, los niveles de HL se asocian con la calidad del entorno de preparación del alimento, y con la producción potencial de micotoxinas que puede ser perjudicial si se ingieren (Ali *et al.*, 2023). Por su parte, la presencia de SA, EC y CT indica las prácticas inadecuadas de manipulación de los alimentos (Kadariya *et al.*, 2014), la contaminación fecal o la deficiencia de saneamiento (Büyükyörük *et al.*, 2014; Castañeda & Jiménez, 2017), respectivamente.

Este panorama advierte que existen diversas fuentes de contaminación que amenazan la calidad microbiológica de los emparedados preparados en las condiciones de los servicios de alimentación universitarios, y señala un riesgo latente para el desarrollo de ETA. Previamente en México, se han reportado brotes por el consumo de alimentos preparados en los comedores escolares (Castañeda & Jiménez, 2024).

Tabla 3. Probabilidad de infección por exposición a *E. coli* (modelo β -Poisson) y *S. aureus* (modelo exponencial) mediante el consumo de emparedados comercializados en los servicios de alimentación universitarios en Culiacán, Sinaloa, México.

Variable	<i>S. aureus</i>		<i>E. coli</i>	
	Probabilidad	Casos	Probabilidad	Casos
Media	1.36×10^{-2}	13.60	4.84×10^{-2}	48.40
Mínimo	8.00×10^{-5}	0.08	1.40×10^{-5}	0.014
Q1	8.10×10^{-4}	0.81	1.39×10^{-3}	1.39
Mediana	4.02×10^{-3}	4.02	6.81×10^{-3}	6.81
Q3	1.32×10^{-2}	13.20	8.98×10^{-2}	89.80
Máximo	2.28×10^{-1}	228	3.50×10^{-1}	350
IC95	8.57×10^{-3} - 1.86×10^{-2}	8.6 - 18.6	3.42×10^{-2} - 6.25×10^{-2}	34.2 - 62.5

*Casos de infección estimados por 1,000 consumidores.

Q1 (primer cuartil o percentil 25); Q3 (tercer cuartil o percentil 75); IC95 (intervalo de confianza del 95 %).

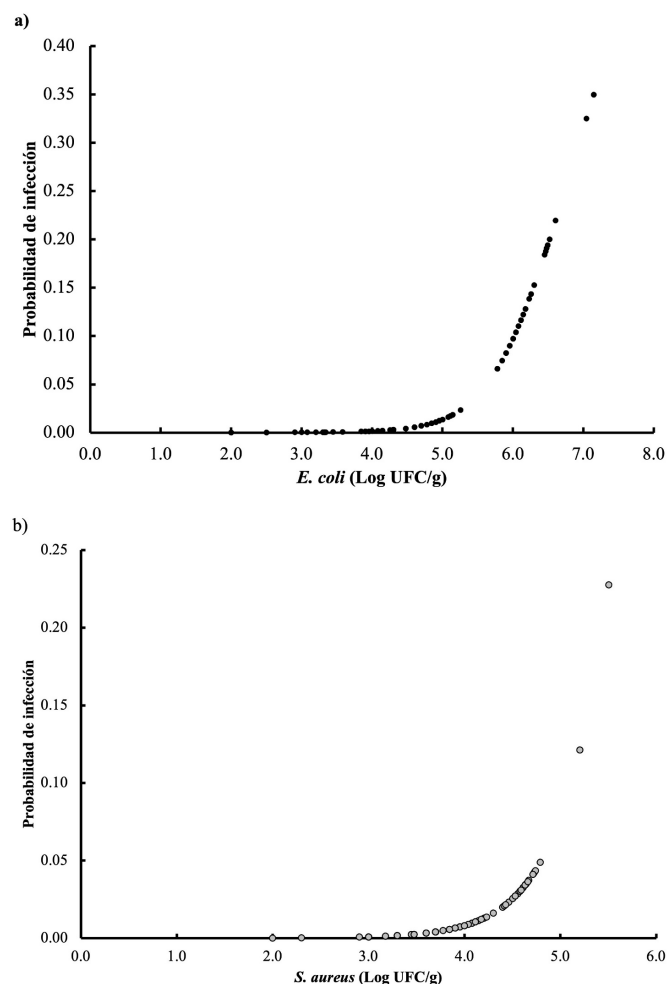


Figura 2. Relación de la dosis de *E. coli* (a) y *S. aureus* (b) cuantificadas (Log UFC/g) en las muestras de emparedado y la probabilidad de infección.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL RIESGO MICROBIOLÓGICO

El modelo dosis-respuesta estimó que la probabilidad de infección por el consumo de una porción de emparedado contaminado con EC o SA osciló de 1.40×10^{-5} a 3.50×10^{-1} y de 8.00×10^{-5} a 2.28×10^{-1} , respectivamente. La probabilidad de infección promedio para SA (1.36×10^{-2}) y EC (4.84×10^{-2}) estiman potencialmente la ocurrencia de 13.6 o 48.4 casos de ETA por 1,000 consumidores en el plantel escolar, respectivamente (Tabla 3). El intervalo de confianza de la probabilidad de infección por la exposición a las diferentes concentraciones de EC y SA cuantificadas en los emparedados preparados en servicios de alimentación universitarios se muestra en la Figura 2, cuyo riesgo de infección aumenta en congruencia con los niveles de contaminación.

El escenario del consumo de emparedados (165 g por porción) contaminados con EC y SA que son elaborados en los servicios de

alimentación (Figura 2), señalan un potencial vehículo de peligros biológicos en la población y un riesgo de infección de bajo a moderado según el nivel de contaminación de EC (0.0014 - 35.0 %) y SA (0.008 - 22.8 %) (Tabla 3). En la literatura se refiere a un estudio previo sobre el riesgo de infección por consumo de emparedados contaminados con *L. monocytogenes* que oscila de 0.002 hasta 52 casos según la susceptibilidad del hospedero y modelo utilizado (Tirioni *et al.*, 2018). Nuestro estudio ofrece una primera aproximación del riesgo de enfermedades infecciosas asociadas a EC y SA por consumo de emparedados en servicios de alimentación escolares.

La DGE declara a las infecciones intestinales como la tercera causa de morbilidad en Sinaloa, las cuales representaron 85,922 casos anuales en la entidad en 2023 (DGE, 2025). En este sentido, los resultados obtenidos justifican el consumo pertinente de estos alimentos y proponen la implementación de campañas educativas para la manipulación, preparación y venta higiénica de los alimentos en estos servicios de alimentación con base en las guías existentes (DOF, 2009), con el fin de mejorar la salubridad de los alimentos y disminuir los riesgos de ETA.

CONCLUSIONES

Estos resultados proporcionan un panorama inicial de la calidad microbiológica de los emparedados preparados y comercializados en los servicios de alimentación universitarios de la localidad, lo que expone un riesgo latente del desarrollo de enfermedades infecciosas. El nivel de adherencia en la aplicación de las buenas prácticas higiénicas en los servicios de alimentación universitarios es el reflejo de la contaminación microbiana del alimento, la cual se ve influenciada por la pérdida de control de temperatura. Los hallazgos observados permiten identificar una oportunidad para mejorar la preparación segura de los emparedados y la implementación de estrategias educativas con respecto a las pautas de buenas prácticas higiénicas para minimizar el riesgo de infecciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico del personal del Laboratorio de Investigación y Diagnóstico Microbiológico (LiDIM) de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

APROBACIÓN DE COMITÉ DE INVESTIGACIÓN Y DE ÉTICA

No aplica.

REFERENCIAS

- Agüeria, D. A., Libonatti, C., & Civit, D. (2021). Cleaning and disinfection programmes in food establishments: a literature review on verification procedures. *Journal of Applied Microbiology*, 131, 23–35. <https://doi.org/10.1111/jam.14962>
- Al-Busaidi, A. K., Al-Bulushi, I. M., & Al-Subhi, L. K. (2023). Evaluation the safety and quality of ready-to-eat sandwiches: short communication. *Advances in Clinical Toxicology*, 8(2), 1-4. <https://doi.10.23880/act-16000263>
- Ali, A. H., Kilima, B. M., & Wenaty, A. (2023). Assessment of food safety knowledge, hygienic practices and microbiological quality of halwa produced in urban west region, Zanzibar". *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 15, 117-29. <https://doi.org/10.9734/ejnf/2023/v15i121372>
- Andrews, W., Jacobs, A., & Hammack, T. (2018). *Salmonella*. Disponible en: <http://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/LaboratoryMethods/ucm070149.html>. Fecha de consulta: junio 25, 2025.
- Bucheri, C., Mammina, C., Giammanco, S., Giammanco, M., La Guardia, M., & Casucci, A. (2010). Knowledge, attitudes and self-reported practices of food service staff in nursing homes and long-term care facilities. *Food Control*, 21, 1367–1373. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.04.010>
- Büyükyörük, S., Beyaz, D., Göksoy, E.O., Kök, F., & Koçak, P. (2014). Microbiological evaluation of ready-to-eat sandwiches served near hospitals and schools. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi* 61, 193-198. https://doi.org/10.1501/Vetfak_0000002628
- Campos, J., Rodríguez, C., Sierra, A., & Arias, A. (2003). Estudio microbiológico de las comidas servidas en los comedores escolares de la isla de Tenerife. *Revista Española de Salud Pública*, 77, 749-760.
- Castañeda-Ruelas, G., & Jiménez-Edeza, M. (2024). Impacto de la inocuidad alimentaria en comedores escolares de México. In: *tópicos en biomedicina y biotecnología*, (J. Milán, N. García & O. Argüelles, eds.), pp. 33-41. Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Castañeda-Ruelas, G. M., & Jiménez-Edeza, M. (2017). Participación del personal de cocina en la diseminación de microorganismos en comedores de escuelas de tiempo completo. *Salud Publica de México*, 59, 212-213. <https://doi.org/10.21149/8388>
- Castañeda-Ruelas, G. M., & Jiménez-Edeza, M. (2020). Exploring food safety risk factors in selected school's foodservice establishments in Mexico. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 15, 73-82. <https://doi.org/10.1007/s00003-019-01241-5>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2009). NOM-251-SSA1-2009-Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimentarios. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5133449&fecha=01/03/2010. Fecha de consulta 19 Sept 2018.
- Dirección General de Epidemiología. (DGE). (2025). Anuario de morbilidad 1984-2023 Disponible en: https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/morbilidad_nacional.html. Fecha de consulta: junio 25, 2025.
- Giaccone, V., & Ferri, M. (2005). Microbiological quantitative risk assessment and food safety: an update. *Veterinary Research Communication*, 29, 101–106. <https://doi.org/10.1007/s11259-005-0020-6>
- Kadariya, J., Smith T. C., & Thapaliya, D. (2014). *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcal* food-borne disease: An ongoing challenge in public health. *BioMed Research International*, 2014, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/827965>
- Kokkinakis, M. N., Fragkiadakis, G. A., Lapidakis, N. E., & Kokkinaki, A. N. (2020). Assessing microbiological quality of ready-to-eat prepacked sandwiches, in Crete, Greece. *Journal of Food Science Technology*, 57, 4220-4227. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04460-z>
- Koutsoumanis, K., Tsaloumi, S., Aspidou, Z., Tassou, C., & Gougouli, M. (2021). Application of quantitative microbiological risk assessment (qmra) to food spoilage: principles and methodology. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.011>
- Mainardi, P. H., & Bidoia, E. D. (2024). Food safety management: preventive strategies and control of pathogenic microorganisms in food. *European Journal of Biological Research*, 14, 13-32. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10724672>

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2025). Inocuidad de los alimentos. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>. Fecha de consulta: junio 25, 2025.
- Pepper, I. L., Gerba, C. P., Gentry, T. J. (2014). Environmental microbiology. Publisher, Academic Press. Estados Unidos de América.
- Rose, J. B. & Haas, C. N. (1999). A risk assessment framework for the evaluation of skin infections and the potential 23imples23f antibacterial soap washing. *American Journal of Infection Control*, 27, S26-S33. [http://dx.doi.org/10.1016/s0196-6553\(99\)70039-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0196-6553(99)70039-8)
- Salgado, P.R., Di Giorgio, L., Musso, Y.S., Mauri, A.N. (2021). Recent developments in smart food packaging focused on biobased and biodegradable polymers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5:630393. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.630393>
- Sánchez, A. (2015). Preferencias de consumo en el comedor del CUALTOS de la Universidad de Guadalajara. *Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración*, 5, 1-16.
- Scallan, E., Hoekstra, R. M., Angulo, F. J., Tauxe, R. V., Widdowson, M. A., Roy, S. L., Jones, J. L., & Griffin, P. M. (2011). Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens. *Emerging Infection Disease*, 17, 7–22. <https://doi.org/10.3201/eid1701.P21101>
- Tirloni, E., Stella, S., de Knecht, L., Gandolfi, G., Bernardi, C., & Nauta, M. (2018). A quantitative microbial risk assessment model for *Listeria monocytogenes* in RTE sandwiches. *Microbial Risk Analysis*, 9, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2018.04.003>
- Todd, E. C. D., Greig, J. D., Bartleson, C. A., & Michaels, B. S. (2008). Outbreaks where food workers have been implicated in the spread of foodborne disease. Part 5. Sources of contamination and pathogen excretion from infected persons. *Journal of Food Protection*, 71, 2582–2595. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-71.11.2339>
- United States Department of Agriculture-Food Safety and Inspection Services. (2017). MLG8:9 Isolation and identification of *Listeria monocytogenes* from red meat, poultry, egg, and environmental samples. Disponible en: <http://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/1710bee8-76b9-4e6c-92fc-fdc290dbfa92/MLG-8.pdf?MOD=AJPERES>. Fecha de consulta: junio 25, 202

Diseño responsable de un proceso de destilación extractiva para bioetanol: evaluación económica, ambiental y de seguridad con integración energética

Responsible design of an extractive distillation process for bioethanol: economic, environmental, and safety assessment with energy integration

Salazar-Melendres, J.A., Hernández-Calderón, O.M., González-Llanes, M.D., Moraila-Anchondo, M.A., Cervantes-Gaxiola, M.E., Laguna-Martínez, M.G.*

Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Calzada de las Américas, Nte. 2771, Ciudad Universitaria, Burócrata, 80030, Culiacán Rosales, Sinaloa, México.

RESUMEN

El bioetanol producido a partir de residuos lignocelulósicos es un biocombustible de segunda generación cuyo proceso de purificación enfrenta retos técnicos debido a la formación de azeótropos y al alto consumo energético. Esta investigación propone un diseño para la purificación de bioetanol mediante destilación extractiva, integrando criterios económicos, ambientales y de seguridad inherente, en consonancia con los principios del enfoque Investigación e Innovación Responsables (RRI). Se simuló tres configuraciones de proceso en Aspen Plus® V14, vinculadas con evaluaciones técnico-económicas y de sostenibilidad desarrolladas en MATLAB®. Se analizó la influencia de la pureza y recuperación del bioetanol, así como la implementación de estrategias de integración energética mediante intercambiadores de calor. La evaluación económica se realizó mediante la metodología de Guthrie; la seguridad inherente fue estimada con el índice de Seguridad Inherente para Columnas de Destilación (DCISI) e Índice por Daño de Fuego y Explosión (FEDI), y el impacto ambiental fue valorado con base en la metodología IMPACT World+. Finalmente, se aplicó el método de jerarquización analítica (AHP) para integrar los tres criterios en un índice compuesto de sostenibilidad. Los resultados identificaron que la configuración con 91.0 % de pureza y 99.96 % de recuperación en la torre concentradora, con dos intercambiadores de calor, presentó el mejor desempeño global. Esta opción permite reducir el consumo energético, minimizar el impacto ambiental y mejorar la seguridad del proceso, demostrando que la integración sistemática de indicadores técnicos, económicos y ambientales resulta clave para el diseño de procesos químicos más sostenibles, seguros y éticamente fundamentados.

Palabras clave: Bioetanol, Destilación extractiva, Integración energética, Evaluación económica, Evaluación ambiental, Seguridad inherente.

ABSTRACT

Bioethanol derived from lignocellulosic residues is a second-generation biofuel with substantial potential, yet its purification is challenged by azeotrope formation and high energy demand. This study proposes a purification design based on extractive distillation, integrating economic, environmental, and inherent safety considerations as a practice of anticipatory responsibility, consistent with the principles of anticipation and reflexivity within the Responsible Research and Innovation (RRI) framework. Three process configurations were simulated using Aspen Plus® V14, linked to techno-economic and sustainability assessments developed in MATLAB®. The influence of bioethanol purity and recovery, together with the implementation of energy integration strategies via heat exchangers, was analyzed. The economic assessment was performed using the Guthrie method, while inherent safety was evaluated through the Distillation Column Inherent Safety Index (DCISI) and the Fire and Explosion Damage Index (FEDI); and environmental impact was evaluated using the IMPACT World+ methodology. Finally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to integrate the three criteria into a composite sustainability index. The results identified that the configuration with 91.0% purity and 99.96% recovery in the concentrating column, with two heat exchangers, showed the best overall performance. This option reduces energy consumption, minimizes environmental impact, and enhances process safety. The study demonstrates that the systematic integration of technical, economic, and environmental indicators is key to designing chemical processes that are more sustainable, safer, and ethically grounded.

Keywords: Bioethanol, Extractive distillation, Energy integration, Economic evaluation, Environmental impact, Inherent safety.

*Autor de correspondencia: María Guadalupe Laguna Martínez

Email: mglaguna@uas.edu.mx

ORCID ID: [0000-0002-7070-9336](https://orcid.org/0000-0002-7070-9336)

Registro ORCID Autores: SM: [0009-0009-6228-3855](https://orcid.org/0009-0009-6228-3855); HC: [0000-0002-4216-2409](https://orcid.org/0000-0002-4216-2409); GL: [0000-0003-4015-383X](https://orcid.org/0000-0003-4015-383X);

MA: [0009-0007-5466-1495](https://orcid.org/0009-0007-5466-1495); CG: [0000-0002-5915-0703](https://orcid.org/0000-0002-5915-0703);

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

Enviado: Julio 2025

Aceptado: Septiembre 2025

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética a nivel mundial ha conducido a un incremento sostenido en el consumo de combustibles fósiles, con consecuencias directas en el aumento de emisiones contaminantes, el deterioro ambiental y la volatilidad en los precios energéticos. Frente a este escenario, las energías renovables han adquirido un papel estratégico en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, al reducir la dependencia de fuentes no renovables y mitigar los efectos del cambio climático (Pérez-Fernández *et al.*, 2017).

Dentro del conjunto de energías alternativas, los biocombustibles se destacan por su origen orgánico y renovable. Estos combustibles derivan de la transformación de materiales biológicos —como residuos agrícolas, forestales o agroindustriales— en productos energéticos líquidos, sólidos o gaseosos (Núñez García y García Triñanes, 2006). El bioetanol, en particular, ha sido objeto de amplio interés debido a su viabilidad técnica y su compatibilidad con motores de combustión interna. Su producción puede realizarse a partir de cultivos ricos en azúcares o almidones, aunque el enfoque contemporáneo busca emplear biomasa lignocelulósica para evitar conflictos con la seguridad alimentaria (FAO, 2016; Velasco Cristancho, 2020).

La biomasa lignocelulósica está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya estructura compleja impone retos técnicos significativos para su conversión en bioetanol. Por ello, el proceso productivo involucra múltiples etapas, que incluyen el pretratamiento para romper la matriz vegetal, la hidrólisis para liberar azúcares fermentables, la fermentación alcohólica, y finalmente, la purificación del etanol obtenido (Scilipoti, 2014; Velasco Cristancho, 2020). Esta última etapa es crítica, ya que el bioetanol producido vía fermentativa se presenta como una mezcla azeotrópica con agua, lo cual limita su separación mediante métodos convencionales de destilación (Valdeón, 2018).

Ante esta limitación, la destilación extractiva se ha establecido como una alternativa eficaz para romper el azeótropo etanol-agua. Este proceso incorpora un agente extractivo, como el etilenglicol, que modifica el comportamiento de la mezcla y permite alcanzar purezas cercanas al 99.8 % en masa, requeridas para su uso como biocombustible (Kiss e Ignat, 2013; Seader *et al.*, 2016). No obstante, este esquema implica un alto consumo energético, especialmente en las etapas de concentración y deshidratación del etanol (Hbaki *et al.*, 2010).

Por ello, la presente investigación se enfoca en la optimización del proceso de purificación de bioetanol de segunda generación mediante destilación extractiva, evaluando estrategias de integración energética y selección de solventes. Asimismo, se incorporan criterios de seguridad inherente, empleando índices como índice de Seguridad Inherente para Columnas de Destilación (DCISI) e Índice por Daño de Fuego y Explosión (FEDI). Estos principios encuentran mejor aplicación en etapas tempranas de diseño, debido a que los cambios son fáciles de hacer, aunado a la reducción de oportunidades de aplicación conforme el diseño detallado avanza (Ortiz Espinoza, 2020); y una evaluación de sostenibilidad basada en la triple línea de fondo (TLF), que considera dimensiones económicas, ambientales y sociales (Khan y Amyotte, 2005; Argoti *et al.*, 2019; Ortiz-Espinoza, 2021).

Desde una perspectiva metodológica, se implementaron simulaciones avanzadas en Aspen Plus® V14 para modelar los balances de materia y energía, complementadas con herramientas de análisis y optimización en MATLAB®. La estructura del estudio permite abordar el diseño de procesos químicos desde un enfoque holístico, integrando no sólo criterios técnicos, sino también valores sociales y éticos bajo el paradigma de la Investigación e Innovación Responsable (RRI) (Madita Amoneit *et al.*, 2024; Gianni *et al.*, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

LOCALIZACIÓN Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Simulación de Procesos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Las simulaciones se realizaron en Aspen Plus® V14 bajo condiciones estacionarias, expresando composiciones en fracción másica y energía en kW. El modelo termodinámico seleccionado fue el de Dos Líquidos No Aleatorios acoplado a Redlich-Kwong (NRTL-RK), con parámetros binarios dependientes de la temperatura obtenidos de la literatura (Lei *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2015). Este modelo, ampliamente validado para sistemas no ideales con formación de azeótropos como agua-etanol-agente extractivo (Al-Malah, 2022; Green, 2008; Lei *et al.*, 2003), combina la ecuación de estado de Redlich-Kwong para la fase vapor con NRTL para la fase líquida, permitiendo predicciones confiables del equilibrio líquido-vapor. Las constantes de equilibrio “K” fueron determinadas automáticamente por el simulador a partir del cociente de fugacidades.

La evaluación económica, ambiental y de seguridad se implementó en MATLAB® R2015 mediante rutinas desarrolladas ad hoc, interconectadas con Aspen Plus para procesar automáticamente los datos de salida. El análisis ambiental se efectuó en OpenLCA® con la base de datos Ecoinvent v3.7.1 y el método IMPACT World+, considerando emisiones directas e indirectas (Bulle *et al.*, 2019). Las simulaciones se ejecutaron en una laptop HP Pavilion 15-cw1xxx con procesador AMD Ryzen™ de tercera generación (2.1 GHz), GPU Radeon™ Vega Mobile Gfx y 12 GB de RAM.

MODELADO DEL PROCESO DE DESTILACIÓN EXTRACTIVA

El proceso de purificación de bioetanol se modeló como una secuencia de tres columnas: concentradora (CONC), extractiva (EXTRACT) y de recuperación de solvente (RECOVERY). La columna CONC preconcentra la mezcla etanol-agua hasta el punto azeotrópico; en la EXTRACT se alimenta etilenglicol para romper el azeótropo y producir bioetanol anhidro; y en la RECOVERY se regenera el solvente para su recirculación. El diseño siguió el procedimiento de Kiss & Ignat (2013), partiendo de una pureza inicial del 91 % en masa en la salida de la CONC y evaluando, mediante simulaciones a 1 bar e isotérmicas, el efecto de la pureza y la recuperación de bioetanol a nivel de columna y de sistema.

La recuperación de bioetanol y etilenglicol, así como la pureza del destilado, se controlaron mediante especificaciones de diseño en cada columna. La configuración con menor carga térmica en el rehedidor de la columna EXTRACT se adoptó como base para el análisis de integración energética.

INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO

Se aplicó la metodología de integración térmica propuesta por Gil *et al.* (2013) para reducir la demanda energética del sistema mediante el precalentamiento de corrientes de alimentación a partir de los fondos de las columnas de destilación. La estrategia consistió en identificar, para la configuración óptima, las corrientes candidatas a ceder o recibir calor, determinar sus capacidades térmicas y establecer la ubicación óptima de los intercambiadores. Esta integración permitió disminuir el requerimiento de energía externa, favoreciendo la eficiencia del sistema y reduciendo el impacto ambiental asociado.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

La estimación del Costo Total de Inversión Permanente (CTPI) se realizó mediante el método de Guthrie obtenido de Seider *et al.* (2009), el cual descompone el sistema en módulos de equipo y aplica factores de corrección por presión, material de construcción y diseño. Este procedimiento fue implementado en MATLAB® e integrado con Aspen Plus para automatizar la recuperación de datos operativos y geométricos. El cálculo considera el costo base de los equipos, ajustes por condiciones operativas y costos asociados a instalación, obra civil, servicios externos y contingencias. Se utilizó el índice CEPCI actualizado al año 2024 como factor de corrección temporal.

El Capital Total de Inversión (CTI) se obtuvo sumando el CTPI y el capital de trabajo, conforme a metodologías de estimación preliminar presentadas por Seider *et al.* (2009). A partir de la producción anual y el precio unitario actualizado, se estimaron los ingresos por ventas (S), mientras que el costo total de producción (C) se calculó sumando el costo de manufactura (COM) y los gastos generales (GE). Las correlaciones y ecuaciones utilizadas para estas estimaciones fueron adaptadas desde fuentes especializadas y se documentan en los apéndices correspondientes.

EVALUACIÓN DE SEGURIDAD INHERENTE

La seguridad inherente del proceso se evaluó mediante dos índices complementarios: el Índice de Seguridad Inherente para Columnas de Destilación (DCISI) y el Índice por Daño de Fuego y Explosión (FEDI). Estos permiten integrar propiedades físico-químicas, condiciones operativas y características de diseño en etapas preliminares, priorizando alternativas más seguras. El DCISI, propuesto por Shariff *et al.* (2018), cuantifica la seguridad inherente de columnas de destilación mediante tres categorías: propiedades químicas, condiciones de operación y diseño del equipo, valoradas con parámetros como temperatura de autoignición, inflamabilidad, explosividad, presión de operación, relación de reflujo y volatilidad relativa; menores valores indican configuraciones más seguras. El FEDI, por su parte, estima el potencial de daño por fuego y explosión en equipos individuales como intercambiadores, hervidores y condensadores.

Ambos índices son útiles para la evaluación comparativa en etapas tempranas de diseño, aunque presentan limitaciones metodológicas que deben considerarse: la ponderación de categorías en el DCISI se basa en valores tabulados que pueden no reflejar procesos con agentes

extractivos y se calculan con parámetros nominales sujetos a cambio; el FEDI está enfocado en equipos individuales, por lo que su extrapolación a sistemas integrados debe asumirse con cautela. En ambos casos, la ausencia de datos experimentales específicos y la simplificación de propiedades físico-químicas pueden introducir incertidumbre en los valores absolutos, por lo que se emplean aquí como herramientas relativas de priorización más que como métricas absolutas de riesgo. El cálculo de ambos índices se implementó en MATLAB® con base en datos de simulación obtenidos en Aspen Plus®.

Este enfoque permitió comparar configuraciones de columna bajo distintos escenarios de separación, identificando aquellas con menores riesgos asociados al manejo térmico y a la estabilidad química de las mezclas. La evaluación se centró en las condiciones de operación realistas para la separación extractiva de etanol, integrando criterios de diseño y propiedades críticas de los componentes involucrados.

El índice FEDI (Fire-Explosion Damage Index), desarrollado a partir de la metodología descrita por [Ortiz Espinoza \(2020\)](#), se empleó para caracterizar el potencial de daño de unidades del proceso distintas a columnas, en particular intercambiadores de calor, hervidores y condensadores. Este índice considera cuatro factores de energía: energía química, presión interna, presión relativa y energía de reacción, los cuales se ponderan mediante penalidades asociadas a propiedades fisicoquímicas, condiciones operativas y características de diseño.

Las unidades fueron clasificadas en grupos funcionales y evaluadas en función de su peligrosidad potencial. Para el caso de estudio, se analizaron principalmente equipos del Grupo II (operaciones físicas) y Grupo V (otros equipos), estableciendo niveles de riesgo basados en las penalidades pertinentes. Penalidades no aplicables por encontrarse fuera del alcance del diseño preliminar fueron neutralizadas según lo establecido por la metodología.

Ambos índices fueron integrados a la estrategia de diseño responsable, permitiendo que la selección de configuraciones no sólo optimizara el rendimiento energético y económico, sino también la seguridad inherente del sistema. La implementación computacional automatizada de ambos indicadores permitió realizar comparaciones sistemáticas y reproducibles entre alternativas de diseño ([Ortiz Espinoza, 2020](#)).

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación ambiental se realizó mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV), utilizando la metodología IMPACT World+ ([Bulle et al., 2019](#)),

reconocida por su enfoque regionalizado y su cobertura amplia de categorías de impacto. El estudio se centró en la fase de purificación del bioetanol, considerando únicamente las emisiones y consumos derivados del proceso de separación, sin incluir impactos asociados a etapas previas (producción de bioetanol crudo) o posteriores (uso del producto), ni a la construcción de los equipos.

El inventario del ciclo de vida fue elaborado con base en los datos generados en Aspen Plus®, que incluyeron consumos energéticos, composición de corrientes, pérdidas y residuos. El análisis fue ejecutado en OpenLCA® empleando la base de datos Ecoinvent v3.6 integrada con IMPACT World+ v2.0.1. Las etapas metodológicas incluyeron: i) clasificación de flujos a categorías de impacto, ii) caracterización a nivel de punto medio (se consideraron las siguientes categorías: disponibilidad del agua, cambio climático, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de partículas, toxicidad humana no cancerígena, cancerígena, impactos sobre agua fresca, disponibilidad del agua, agua contaminada térmicamente, cambio climático, acidificación marina y de agua dulce, eutrofización marina, eco-toxicidad en agua y finalmente, el impacto asociado a la extracción de gas natural), y iii) caracterización del daño a nivel de áreas de protección (salud humana, calidad de ecosistemas y área de recursos y servicios de ecosistemas). Los factores de caracterización se tomaron de [Joliet et al. \(2016\)](#), y se expresaron en unidades normalizadas (como CO₂ eq, DALY o MJ eq) para permitir la comparación entre alternativas de diseño.

Se prestó especial atención a dos indicadores clave: el impacto climático (emisiones de gases de efecto invernadero por kg de bioetanol destilado) y el impacto al agua por derrames potenciales de etanol y etilenglicol en la corriente de recuperación. Estos indicadores permitieron discriminar entre configuraciones similares desde el punto de vista energético, pero divergentes en términos ambientales.

SELECCIÓN DEL DISEÑO RESPONSABLE

La identificación del diseño más sustentable se realizó mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), técnica multicriterio que permite estructurar problemas complejos y asignar ponderaciones relativas a indicadores heterogéneos ([bin Othman, 2011](#)). La jerarquía incluyó cuatro niveles: meta general (diseño responsable), criterios principales (económico, ambiental, seguridad), subcriterios específicos (por ejemplo, costo operativo, impacto climático, índice FEDI) y alternativas de configuración.

La comparación por pares se llevó a cabo mediante matrices de juicio experto, asignando pesos relativos a cada subcriterio según su importancia dentro del criterio padre. Posteriormente, se calcularon las prioridades mediante descomposición espectral (eigenvectores) y se verificó la consistencia de los juicios emitidos (bin Othman, 2011).

Para la evaluación final, se normalizaron los valores de todos los indicadores bajo dos categorías: "más-alto-mejor" (como ganancias) y "más-bajo-mejor" (como emisiones o índices de riesgo), y se transformaron a una escala común de 1 a 10. La combinación ponderada de estos puntajes permitió calcular un índice global para cada alternativa (bin Othman, 2011). Aquella con el mayor valor fue seleccionada como el diseño óptimo desde una perspectiva de sostenibilidad integrada, considerando simultáneamente eficiencia económica, menor impacto ambiental y mayor seguridad inherente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SIMULACIÓN DE PROCESO DE PURIFICACIÓN

Después de simular los distintos esquemas definidos por la matriz de pureza y recuperación (RC) de la columna concentradora, junto con la recuperación total del proceso (RP), se procedió al cálculo de la carga térmica total requerida por los tres rehervidores del sistema. La carga térmica obtenida en kilowatts se transformó a kW/kg de bioetanol y fueron comparados con valores reportados por Kiss & Ignat (2013), mostrando comportamientos análogos (Figura 1A).

Se identificó una tendencia parabólica en la carga térmica en función de la pureza del destilado. En particular, se observó que para valores de pureza inferiores a 91.0 % y valores cercanos o superiores al punto azeotrópico: 95.6 % de etanol en fracción másica a una temperatura de 78.2 °C y 1 atm de presión (Seider et al., 2009), la carga térmica aumentó considerablemente.

Este comportamiento se explica principalmente por dos factores: la variación en la relación de reflujo y el volumen de agua procesado en los rehervidores. A menor pureza, la torre CONC opera con menor reflujo, pero las torres EXTRACT y RECOVERY deben remover más agua, lo que incrementa la demanda energética. En cambio, al acercarse al punto azeotrópico, la torre CONC requiere mayor reflujo y energía para separar el agua, mientras que las otras dos torres manejan menores volúmenes, reduciendo sus cargas térmicas.

Adicionalmente, el carácter no ideal de la mezcla etanol-agua y su comportamiento de tipo azeotrópico contribuyen a una resistencia

adicional a la separación, lo que limita la reducción de la carga térmica mediante estrategias convencionales. Con base a los resultados observados en la Figura 1A y los reportados por Kiss & Ignat (2013) (Figura 1B), se determinó que una pureza objetivo de 91.0 % permite minimizar el consumo energético por kg de bioetanol purificado, siendo esta condición adoptada como base para la implementación de los criterios de integración energética en las siguientes etapas del diseño.

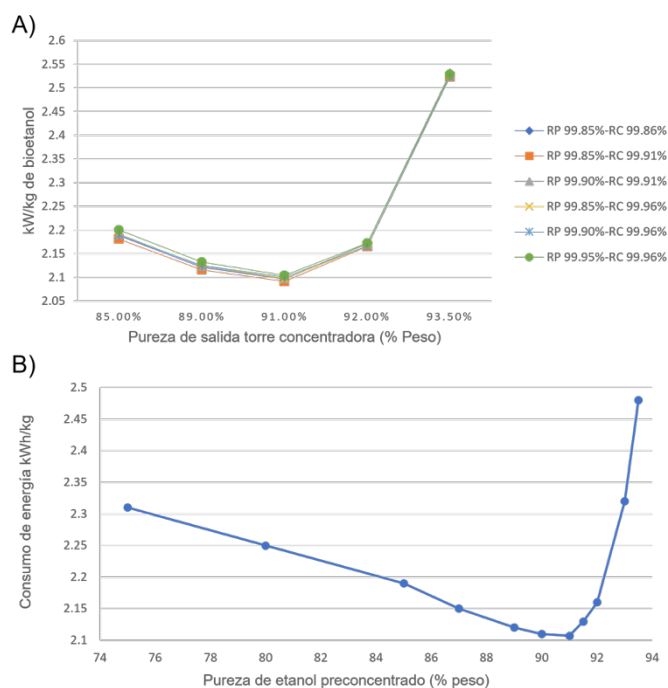


Figura 1. A) Carga térmica del rehervidor en kW/kg de bioetanol a una combinación recuperaciones y purezas; B) Uso de energía kWh/kg de etanol en función de composición de la corriente preconcentrada. RP = Recuperación del Proceso; RC = Recuperación de la torre Concentradora.

INTEGRACIÓN ENERGÉTICA

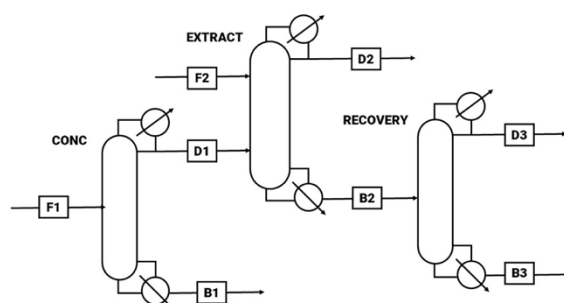
Seis diseños con una pureza objetivo de 91.0 % de etanol fueron seleccionados para su análisis energético (Tabla 1). El estudio de corrientes internas reveló que los fondos de las columnas concentradora y recuperadora eran las mejores fuentes de calor para precalentar sus respectivas alimentaciones, por su alto caudal y temperatura. En cambio, se descartó el precalentamiento de la alimentación a la torre recuperadora, al estar ya por encima del punto de burbuja del agua.

Tabla 1. Configuraciones de diseño a pureza objetivo de etanol y recuperaciones de proceso y torre CONC.

Diseño	% RP	% RC
1	99.85	99.86
2	99.85	99.91
3	99.85	99.96
4	99.90	99.91
5	99.90	99.96
6	99.95	99.96

RP = Recuperación del Proceso; RC = Recuperación de la torre CONC; CONC = Torre concentradora.

La alimentación a la torre concentradora se precalentó con sus propios fondos, debido a su similitud térmica y composicional. La torre extractora, en cambio, utilizó los fondos de la recuperadora, cuya alta temperatura y caudal permitieron acercar la mezcla azeotrópica a su punto de burbuja. Estos efectos se muestran en la Figura 2.



	F1	F2	D1	B1	D2	B2	D3	B3
Temperatura °C	30.00	30.00	77.94	100.00	78.00	152.00	100.00	197.00
Flujo kg/h	125 000.00	20 793.00	13 730.00	111 264.00	12 519.38	22 003.62	1 233.40	20 770.22

Figura 2. Análisis de corrientes internas para integración de energía. F1 = Alimentación 1; F2 = Alimentación 2; D1 = Destilado 1; B1 = Fondos 1; D2 = Destilado 2; B2 = Fondos 2; D3 = Destilado 3; B3 = Fondos 3.

Se evaluaron tres esquemas de integración térmica basados en la configuración de la pureza objetivo de 91.0 %: precalentamiento individual de la torre concentradora (IC-1), precalentamiento individual de la torre extractora (IC-2), y precalentamiento combinado de ambas alimentaciones mediante dos intercambiadores de calor (IC-1/IC-2).

La implementación de los intercambiadores resultó en una disminución significativa de la carga térmica requerida por los rehervidores, tal como

se aprecia en la Figura 3A. Por su parte, la Figura 3B muestra datos reportados por Gil *et al.* (2013), quienes también observaron que el precalentamiento de las corrientes de alimentación reducía la carga térmica del sistema. La coincidencia en los resultados respalda cualitativamente los efectos observados en el presente estudio, destacando la consistencia entre ambos enfoques.

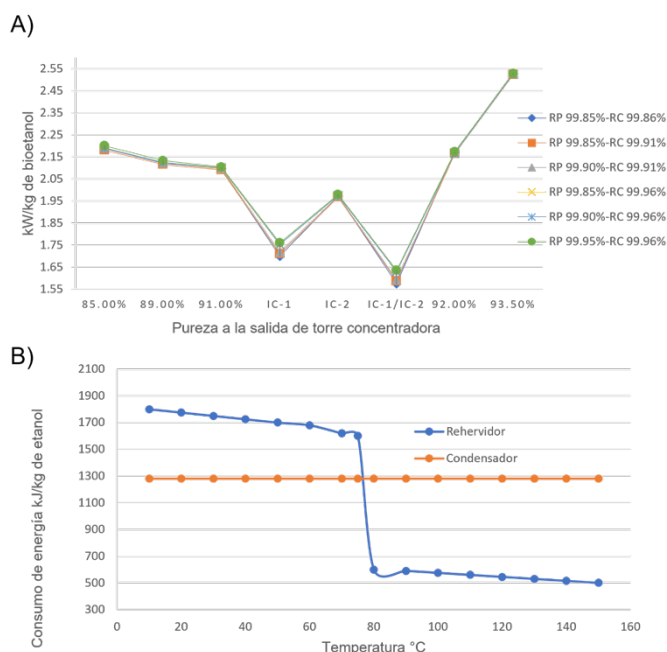


Figura 3. A) Carga térmica del rehervidor en kW/kg de bioetanol con y sin integración energética; B) Efecto de la temperatura en alimentación de mezcla azeotrópica; consumo de energía por kg de etanol. IC-1 = Intercambiadores de Calor 1; IC-2 = Intercambiadores de Calor 2; IC-1/IC-2 = doble Intercambiadores de Calor.

En el presente estudio, la mayor eficiencia energética se obtuvo al implementar dos intercambiadores de calor, con una reducción del consumo térmico que osciló entre 22.3 % y 24.1 % en comparación con las configuraciones originales a 91.0 % de pureza. Le siguieron las configuraciones con precalentamiento individual a la torre concentradora (IC-1), con ahorros entre 16.3 % y 18.2 %, y finalmente las configuraciones con precalentamiento a la torre extractora (IC-2), con reducciones de entre 5.8 % y 5.9 %.

EVALUACIÓN DE COSTOS

El comportamiento observado en la evaluación de costos de los diferentes diseños fue congruente con el patrón identificado previamente en el análisis de carga térmica. En general, los esquemas que incluyeron integración energética —particularmente aquellos con intercambiador en la torre concentradora y los diseños con doble integración— presentaron los menores costos en comparación con el diseño base correspondiente a una pureza del 91.0 %. En contraste, los esquemas con sólo un intercambiador en la torre extractora mostraron incrementos en los

costos de inversión, tanto permanentes como totales, siendo los costos operacionales la única excepción favorable.

En la Tabla 2 se aprecia que los diseños con integración térmica en la torre concentradora ofrecieron una reducción en el costo permanente de inversión (CTPI) del orden de 4.60 % a 5.16 %, mientras que los diseños con doble integración presentaron reducciones entre 3.53 % y 4.08 %. Por el contrario, los diseños con intercambiador en la torre extractora generaron incrementos en el CTPI que oscilaron entre 1.056 % y 1.065 %, incluso superiores a los diseños sin integración energética a pureza de 91.0 %

Tabla 2. Resultados de la evaluación de costos por diseño de recuperaciones, pureza objetivo e integración energética.

\$ (Dolares)		91.0 %	91.0 %/IC-1	91.0 %/IC-2	91 %IC-1/IC-2
Diseño 1	CTPI	6,284,01	5,944,911	6,350,664	6,011,701
	CTI	14,129,058	13,789,763	14,195,600	13,856,548
	C	32,899,221	28,491,378	31,513,051	27,107,374
Diseño 2	CTPI	6,284,369	5,952,481	6,344,086	6,027,593
	CTI	14,121,383	13,797,351	14,200,029	13,865,067
	C	32,841,361	28,617,743	31,475,677	27,254,094
Diseño 3	CTPI	6,284,369	5,989,193	6,351,261	6,027,593
	CTI	14,123,146	13,809,313	14,191,019	13,876,369
	C	32,925,384	28,704,150	31,542,096	27,321,943
Diseño 4	CTPI	6,278,277	5,989,193	6,346,150	6,057,224
	CTI	14,123,146	13,834,076	14,191,019	13,906,037
	C	32,913,188	29,105,515	31,554,076	27,744,759
Diseño 5	CTPI	6,278,597	5,989,097	6,346,363	6,064,629
	CTI	14,139,319	13,850,308	14,195,128	13,917,323
	C	32,930,975	29,115,564	31,565,980	27,757,544
Diseño 6	CTPI	6,286,643	5,997,611	6,353,750	6,064,629
	CTI	14,139,319	13,850,308	14,206,440	13,917,323
	C	33,015,444	29,208,123	31,635,316	27,825,340

CTPI = Costo Total de Inversión Permanente; CTI = Capital Total de Inversión; C = Costo de operación; RP = Recuperación del proceso; RC = Recuperación en CONC; Diseño 1 = RP 99.85 %-RC 99.86 %; Diseño 2 = RP 99.85 %-RC 99.91 %; Diseño 3 = RP 99.85 %-RC 99.96 %; Diseño 4 = RP 99.90 %-RC 99.91 %; Diseño 5 = RP 99.90 %-RC 99.96 %; Diseño 6 = RP 99.95 %-RC 99.96 %.

Dado que el capital total de inversión (CTI) está altamente influenciado por el CTPI, se observó un comportamiento congruente. En la Tabla 2 se observa que las configuraciones con doble intercambiador y aquellas con intercambiador en la torre concentradora reflejaron reducciones en el CTI entre 1.57 % y 1.82 %, y entre 2.04 % y 2.29 %, respectivamente. Por otro lado, las configuraciones con intercambiador en la torre extractora

presentaron incrementos entre 0.472 % y 0.476 %, respecto al diseño base.

Este patrón puede explicarse por la influencia de parámetros de diseño como la relación de reflujo y el dimensionamiento de los equipos. En los esquemas con intercambiador en la torre extractora, las dimensiones de la torre concentradora —la más grande del sistema debido al caudal de

procesamiento— no fueron modificadas, lo que redujo la eficiencia del intercambio térmico. Además, la necesidad de incrementar la relación de reflujo en la torre extractora, como consecuencia del aumento en la temperatura de la alimentación, implicó un mayor requerimiento de energía, impactando negativamente en los costos de inversión.

Aunque las configuraciones con integración en la torre concentradora presentaron reducciones superiores en los costos de inversión, esta ventaja no resulta determinante frente a los beneficios acumulativos derivados de los menores costos operacionales que ofrecen las configuraciones con doble integración. Dado el horizonte de operación de este tipo de procesos, los ahorros sostenidos en el tiempo tienen un mayor peso que la inversión inicial.

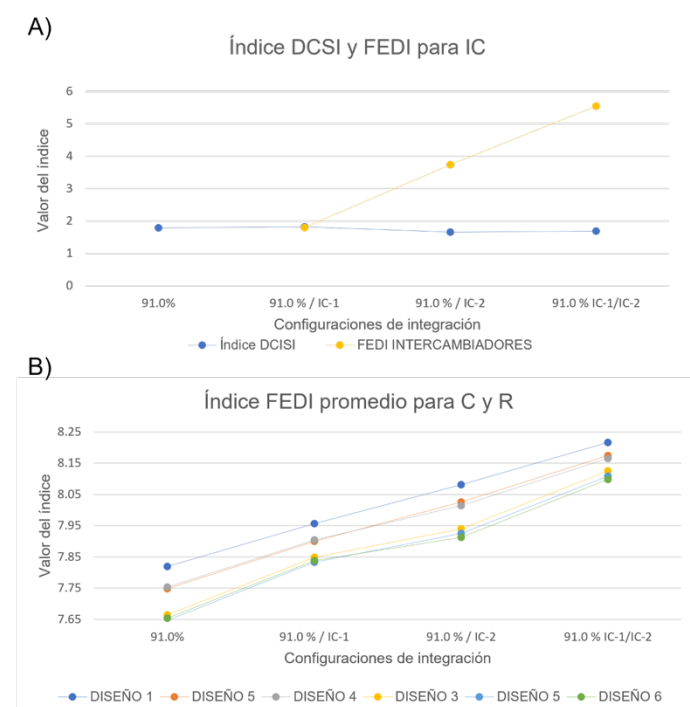


Figura 4. (A) Resultados para los índices DCISI y FEDI para intercambiadores; (B) Resultados promedio del índice FEDI para intercambiadores y condensadores; IC-1 = Intercambiadores de Calor 1; IC-2 = Intercambiadores de Calor 2; IC-1/IC-2 = doble Intercambiadores de Calor; C = Condensadores; R = Rehervidores; Diseño 1 = RP 99.85 %-RC 99.86 %; Diseño 2 = RP 99.85 %-RC 99.91 %; Diseño 3 = RP 99.85 %-RC 99.96 %; Diseño 4 = RP 99.90 %-RC 99.91 %; Diseño 5 = RP 99.90 %-RC 99.96 %; Diseño 6 = RP 99.95 %-RC 99.96 %.

En cuanto a los costos operacionales (C), se observó el mayor impacto positivo de la integración energética. En la Tabla 2 se puede notar que las configuraciones con doble intercambiador mostraron los mayores ahorros, con reducciones entre 15.72 % y 17.60 % en comparación con el diseño de referencia. Les siguieron las configuraciones con un intercambiador en la torre concentradora, con ahorros entre 11.53 % y 13.40 %. Finalmente, las configuraciones con un intercambiador en la torre extractora presentaron los menores ahorros operacionales, entre 4.18 % y 4.21 %.

EVALUACIÓN DE SEGURIDAD INHERENTE

Los resultados obtenidos a partir de los índices de seguridad inherente indicaron un comportamiento global favorable para todas las configuraciones evaluadas. El índice DCISI presentó valores dentro de los rangos considerados aceptables en la práctica común de ingeniería, mientras que el índice FEDI se mantuvo en el rango de “no peligrosidad” en todos los casos analizados.

En el caso del índice DCISI, se observó un comportamiento constante frente a las combinaciones de recuperación del proceso y la columna concentradora, siendo la pureza de salida y la presencia de integración energética los factores determinantes en su variación. En la Figura 4A se muestra que las configuraciones IC-2 y IC-1/IC-2 fueron las que presentaron los valores más bajos del índice, en un intervalo de 1.6555 a 1.6889. Aunque el valor de referencia óptimo es igual o menor a 1, un valor cercano a este umbral sigue representando una condición de proceso aceptable desde el punto de vista de seguridad.

El comportamiento homogéneo de las configuraciones respecto al DCISI se explicó principalmente por el efecto de la pureza final del bioetanol. A medida que esta pureza se incrementa, también lo hace la peligrosidad asociada a la operación de la columna, dado el aumento en la volatilidad del producto y en la relación de reflujo necesaria. Por otro lado, el índice FEDI mostró una respuesta distinta. En la Figura 4B se observa que las configuraciones con integración energética tendieron a incrementar ligeramente su valor numérico, aunque sin abandonar el rango de no peligrosidad. En este caso, las combinaciones con mayor recuperación total del proceso resultaron en valores FEDI más bajos, lo cual se interpretó como una influencia positiva sobre la seguridad del sistema. La variación del índice FEDI en el rehervidor y el condensador se atribuye al aumento en la temperatura de operación, por el precalentamiento de las alimentaciones, y a los cambios en la cantidad de bioetanol procesado según la pureza y recuperación objetivo. Como las demás condiciones se mantuvieron constantes, los cambios en FEDI reflejan el

efecto conjunto de una menor carga térmica en el rehervidor y un mayor volumen en los condensadores (Ortiz Espinoza, 2020).

En cuanto a los intercambiadores de calor, en la Figura 4A se puede apreciar que como los valores para todas las configuraciones se mantuvieron dentro del rango de no peligrosidad establecido por el índice FEDI. No obstante, las configuraciones con doble integración presentaron los valores numéricos más altos dentro de esta categoría, atribuibles al aumento en el número de equipos requeridos.

Aunque los valores del índice FEDI fueron más elevados en configuraciones integradas, ello no implica que dichos esquemas sean menos seguros. Todos los diseños se mantuvieron dentro del mismo rango cualitativo ("no peligroso"), y las diferencias en valores absolutos no justifican una interpretación de mayor riesgo, ya que no superaron ningún umbral crítico.

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

La suma total en términos económicos de los impactos generados en todas las categorías de impacto se presenta en la Figura 5. En general, las configuraciones con integración energética generaron un menor impacto ambiental, al combinar mejoras en eficiencia con reducción en el consumo de servicios externos. Las configuraciones con doble integración (IC-1/IC-2) mostraron los mejores resultados, con reducciones de impacto entre 22.25 % y 24.94 %, respecto al diseño óptimo sin integración a 91.0 % de pureza. Les siguieron las configuraciones con un solo intercambiador en IC-1 (reducción de 16.37 % a 18.98 %) y luego las configuraciones con intercambiador en IC-2 (reducción de 5.88 % a 6.02 %).

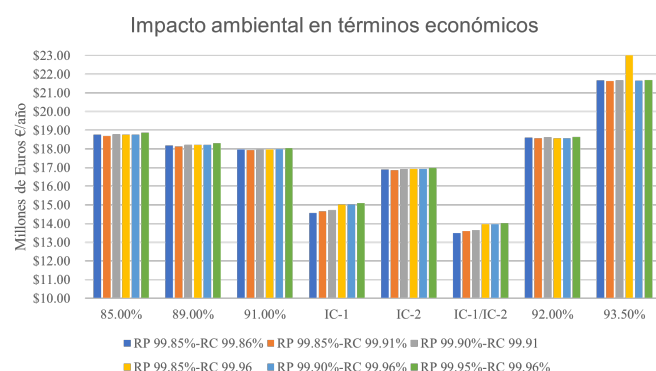


Figura 5. Suma total de impactos ambientales ocasionados por categorías de impacto en términos económicos.

La recuperación del proceso también influyó de manera importante en los resultados. Las configuraciones con recuperación total de 99.96 % generaron un impacto ambiental mayor en todas las áreas, mientras que aquellas con recuperaciones de 99.91 % y 99.85 % mostraron una disminución escalonada. Este comportamiento se atribuyó al incremento en el consumo de recursos necesario para lograr mayores recuperaciones, lo cual incrementa proporcionalmente el uso de energía y la generación de emisiones asociadas.

Dado el enfoque del presente estudio en sostenibilidad e integración energética, se analizaron en mayor detalle las áreas de protección de las configuraciones más prometedoras (IC-1/IC-2) y los resultados se presentan en la Tabla 3. El impacto sobre salud humana (SH) representó el mayor aporte al impacto ambiental total, seguido por la calidad de ecosistemas (CE) y, finalmente, el uso de recursos y servicios del ecosistema (RSE). Este comportamiento también fue dominado por el nivel de recuperación: a mayores valores de recuperación, mayores impactos se observaron, aunque no de forma lineal.

Tabla 3. Impacto ambiental en términos económicos por área de protección.

	Recursos y servicios de ecosistemas	Calidad de ecosistema	Salud Humana
Diseño 1	€ 676,123	€ 4,109,852	€ 8,715,220
Diseño 2	€ 681,582	€ 4,143,031	€ 8,785,571
Diseño 3	€ 683,992	€ 4,157,671	€ 8,816,529
Diseño 4	€ 699,927	€ 4,254,543	€ 9,022,029
Diseño 5	€ 902,637	€ 4,256,632	€ 9,026,368
Diseño 6	€ 702,682	€ 4,271,263	€ 9,057,306

Diseño 1 = RP 99.85 %-RC 99.86 %; Diseño 2 = RP 99.85 %-RC 99.91 %; Diseño 3 = RP 99.85 %-RC 99.96 %; Diseño 4 = RP 99.90 %-RC 99.91 %; Diseño 5 = RP 99.90 %-RC 99.96 %; Diseño 6 = RP 99.95 %-RC 99.96 %;

No obstante, se observó que las configuraciones con recuperación elevada no siempre coincidieron con los diseños más contaminantes. Por ejemplo, el mayor impacto ambiental no correspondió al diseño con la mayor pureza, sino a una configuración con RP 99.90 % y RC 99.96 %, lo cual confirma que la recuperación es una variable crítica en la evaluación del impacto global del proceso.

Tabla 4. Comparación por pares de categorías y subcategorías, más ponderación por prioridades (PV).

2do nivel						
Categoría	Economía	Social	Ambiental			PV
Economía	1	1	1			0.333
Social	1	1	1			0.333
Ambiente	1	1	1			0.333
3er Nivel						
Economía	DCISI	FEDI R/C	FEDI IC			PV
C	1	2	2			0.500
CTI	0.500	1	1			0.250
CTPI	0.500	1	1			0.250
Social	DCISI	FEDI RH/C	FEDI IC			PV
DCISI	1	0.250	0.500			0.150
FEDI RH/C	4	1	0.500			0.470
FEDI IC	2	2	1			0.380
Ambiente	SH	CE	RSE	FWE	GEI	PV
SH	1	1	1	5	3	0.260
CE	1	1	1	5	3	0.260
RSE	1	1	1	5	3	0.260
FWE	0.200	0.200	0.200	4.500	4	0.095
GEI	0.333	0.333	0.333	1.125	1	0.125

C = Costo de producción; CTI = Costo Total de Inversión; CTPI = Costo Total Permanente de Inversión; DCISI = Distillation Column Inherent Safety Index; FEDI = Fire and Explosion Damage Index; RH = Rehervidores; Cd = Condensadores; IC = Intercambiadores de calor; SH = Salud Humana; CE = Calidad del ecosistema; RSE = Recursos y Servicios de ecosistemas; FWE = Eco Toxicidad del Agua Fresca; GEI = Gases de Efecto Invernadero; PV = Ponderación por Prioridades

Asimismo, se identificaron comportamientos opuestos entre categorías. El impacto sobre el agua, derivado de las emisiones de bioetanol y etilenglicol, tendió a disminuir conforme aumentaba la recuperación. Por el contrario, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) aumentaron con la recuperación, como resultado del mayor uso de servicios energéticos. Aunque los diseños con menor recuperación mostraron menores impactos en áreas como salud humana, ecosistemas y uso de recursos, presentaron mayores niveles de toxicidad acuática, indicando que no existe una única configuración óptima desde todos los frentes ambientales.

SELECCIÓN DE DISEÑO RESPONSABLE HACIA LA SOSTENIBILIDAD

Con base en los resultados obtenidos en las evaluaciones energética, económica, ambiental y de seguridad inherente, se procedió a la

selección del diseño más responsable dentro del conjunto de seis configuraciones con doble integración térmica a una pureza de salida del 91.0 % en la torre concentradora. Estas configuraciones presentaron los valores más bajos de consumo energético (kW/kg de etanol), menores costos operacionales anuales, el segundo mejor desempeño en seguridad inherente para columnas de destilación y el menor impacto ambiental total considerando las cinco áreas de protección definidas por la metodología LCA.

Aunque estas configuraciones no fueron las más favorables en términos de inversión de capital ni en la seguridad específica de los condensadores, rehervidores e intercambiadores, los beneficios acumulados en los demás aspectos superaron estas desventajas. Si bien el índice FEDI fue más elevado en estas configuraciones, todos los valores se mantuvieron dentro del rango de no peligrosidad. Asimismo,

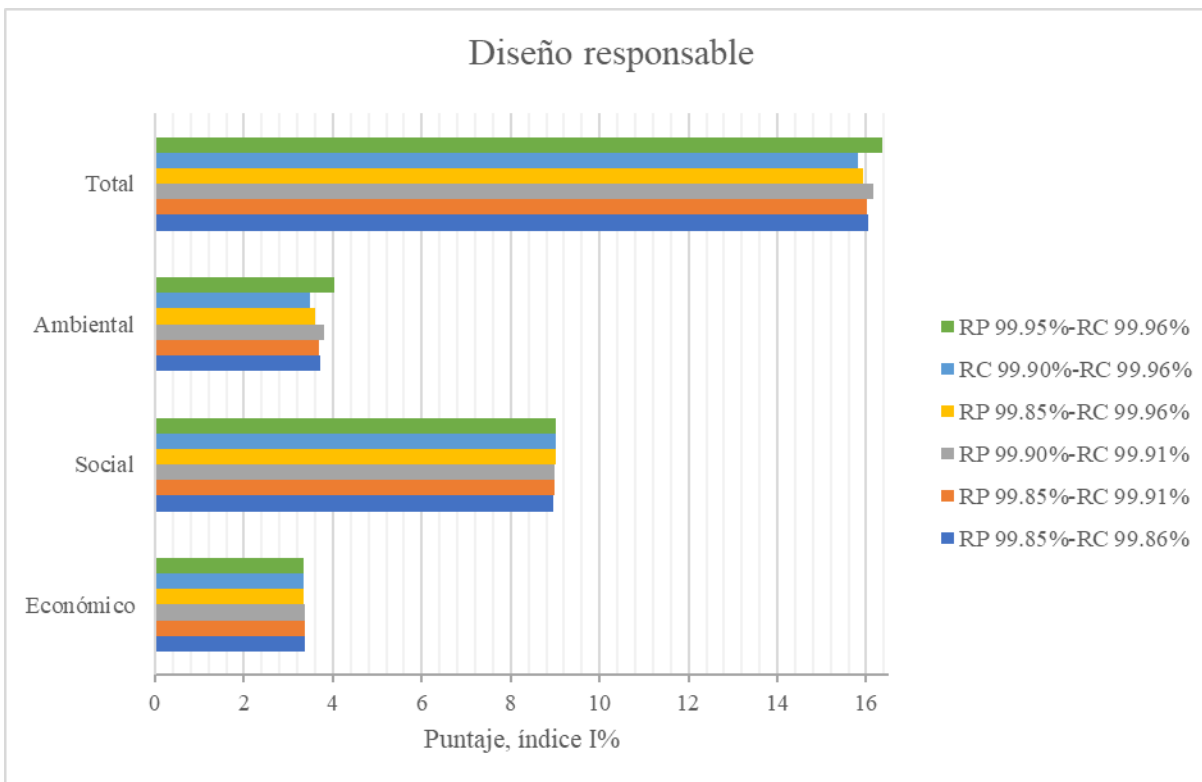


Figura 6. Evaluación de diseños para selección de diseño sostenible en base a índice I.

aunque los costos de inversión fueron mayores, estos siguieron siendo inferiores a los alcanzados en otros diseños a igual pureza sin integración.

Para llevar a cabo una comparación integral entre las diferentes configuraciones, se estableció una evaluación multicriterio considerando tres dimensiones principales: económica, ambiental y social, con pesos iguales asignados a cada una de ellas. Dentro de cada dimensión, se jerarquizaron las subcategorías mediante comparación por pares. En el aspecto económico, el costo operacional recibió la mayor ponderación, mientras que los costos de inversión (CTPI y CTI) fueron considerados de forma secundaria. En el aspecto ambiental, se dio mayor importancia a las tres áreas de protección principales (salud humana, calidad de ecosistemas y uso de recursos), asignando menor peso a indicadores secundarios como GEI (Gases de Efecto Invernadero) y FWE (toxicidad de agua fresca) ya contemplados en las áreas mayores. En el aspecto social, se priorizó el promedio del índice FEDI en rehervidores y

condensadores, seguido de la seguridad de los intercambiadores y, en última instancia, el índice DCISI, que mostró poca variabilidad entre configuraciones.

Los valores asignados a cada subcategoría se presentan en la Tabla 4 y los valores obtenidos mediante la metodología LVHD se presentan en la Tabla 5, respectivamente. Todos los indicadores fueron previamente normalizados con base en la producción anual de bioetanol. Los vectores de evaluación ponderada se normalizaron posteriormente a una misma escala, obteniéndose así los vectores de evaluación ponderada normalizados, a partir de los cuales se calcularon los índices finales (*I*), cuyos resultados se presentan en la Figura 6.

Del análisis integral, se desprende que las configuraciones con menor recuperación fueron más favorables en el aspecto económico, mientras que aquellas con mayor recuperación presentaron mejores resultados en el aspecto social (seguridad). Ambientalmente, las configuraciones con recuperaciones de 99.90 % y 99.95 % fueron las más sostenibles. La

combinación de estos tres componentes determinó como mejor alternativa al diseño que opera con una pureza de salida del 91.0 %, recuperaciones de RP 99.95 % y RC 99.96 %, y doble integración térmica. Este diseño responsable mostró un ahorro energético del 22.30 % respecto al diseño de referencia, equivalente a 51 millones de kWh por año. El costo operacional se redujo en 15.72 %, lo que representa 5.2 millones de dólares anuales. En términos de inversión, se obtuvo un ahorro del 3.53 % en inversión permanente y del 1.57 % en inversión total, correspondientes aproximadamente a 221 mil dólares. En cuanto a la seguridad inherente, las torres de destilación se estimaron un 7.88 % más seguras, mientras que rehervidores y condensadores mostraron un incremento del 5.49 % en su índice FEDI, aunque sin salir del rango de no peligrosidad.

Respecto al impacto ambiental, el diseño seleccionado redujo las emisiones de gases de efecto invernadero en 22.29 %, equivalente a una disminución de 11.15 toneladas de CO₂ eq anuales. En términos económicos, el impacto ambiental total también disminuyó en 22.25 %, lo que equivale a una reducción aproximada de 4.01 millones de euros al año, considerando las tres áreas de protección principales.

Si bien este diseño presentó los mejores resultados globales, se observó que la configuración con recuperaciones de RP 99.90 % y RC 99.91 % obtuvo un índice de sostenibilidad solo 1.34 % inferior. Esta cercanía evidencia la necesidad de incorporar métricas complementarias, como el retorno de inversión (ROI) o indicadores que integren sostenibilidad de forma estructural en su metodología, para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones. No obstante, debido a que el presente trabajo se centró exclusivamente en la etapa de purificación, no fue factible aplicar métricas de análisis económico a nivel de proceso completo. A pesar de esta limitación, los resultados obtenidos permiten concluir que la pureza, la recuperación y la integración energética tienen un efecto positivo integral en el diseño de un proceso de purificación de bioetanol, impactando favorablemente en los aspectos económico, social y ambiental.

CONCLUSIONES

La evaluación integral del proceso de destilación extractiva para bioetanol mostró que la combinación de pureza al 91.0%, recuperaciones de 99.95% y 99.96% en la torre concentradora y en el proceso total, junto con la doble integración energética, representa la alternativa más equilibrada. Este diseño permitió reducir el consumo específico de

energía en más de 22%, disminuir costos operacionales hasta en 17.6%, y lograr reducciones de impacto ambiental cercanas al 25%, manteniendo condiciones aceptables de seguridad inherente. Los resultados confirman que la integración sistemática de criterios técnicos, económicos, ambientales y de seguridad fortalece el diseño responsable y sostenible de procesos químicos.

Asimismo, la metodología basada en simulación, optimización y análisis multicriterio demostró ser una herramienta sólida y reproducible, capaz de orientar decisiones de diseño en etapas tempranas con base en indicadores cuantitativos. El estudio refuerza el potencial industrial de la configuración propuesta, que combina eficiencia energética, menores emisiones y competitividad económica, y sienta bases para trabajos futuros que incluyan análisis de retorno de inversión, evaluación con otros solventes y extensión al proceso productivo completo. En conjunto, se confirma que la integración de enfoques de sustentabilidad y responsabilidad anticipatoria es clave para consolidar alternativas viables de purificación de bioetanol en el contexto industrial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de tesis de licenciatura para la obtención del título de Ingeniero Químico. Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa por las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación, así como por el acompañamiento académico brindado durante todas las etapas del estudio.

Se expresa un agradecimiento especial al personal docente y asesor que participó activamente en la orientación metodológica, técnica y científica del proyecto, así como a los comités evaluadores que contribuyeron con observaciones constructivas para el fortalecimiento del trabajo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con la publicación de este artículo. No existe ninguna relación financiera, personal, institucional o profesional que pudiera influir de manera inapropiada en los resultados o la interpretación del presente trabajo de investigación.

APROBACIÓN DE COMITÉ DE INVESTIGACIÓN Y ÉTICA

No aplica.

REFERENCIAS

- Al-Malah, K. I. (2022). *Aspen Plus: Chemical engineering applications*. John Wiley & Sons.
- Argoti, A., Orjuela, A., & Narváez, P. C. (2019). Challenges and opportunities in assessing sustainability during chemical process design. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 26, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.003>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., & Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-01901583-0>
- FAO. (2025). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2024: Transformación de los sistemas agroalimentarios orientada hacia el valor. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd2616es>
- Gianni, R., Pearson, J., & Reber, B. (2019). RRI: A critical-constructive approach. En *Responsible research and innovation: From concepts to practices* (pp. 1–9). Routledge Taylor & Francis Group.
- Gil, I. D., García, L. C., & Rodríguez, G. (2014). Simulation of ethanol extractive distillation with mixed glycols as separating agent. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(1), 259–270. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322014000100024>
- Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (7th ed., Secs. 5–12). McGraw-Hill.
- Hbaki, H., Tabata, O., Kawasaki, J., & Egashira, R. (2010). Extraction equilibrium of ethanol for bioethanol production—Solvent selection and liquid–liquid equilibrium measurement. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 53(3), 135–143. <https://doi.org/10.1627/jpi.53.135>
- Jolliet, O., Saadé-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., & Crettaz, P. (2016). Life cycle impact assessment. En O. Jolliet, S. Shaked, M. Saadé-Sbeih, C. Bulle, A. Jolliet & P. Crettaz (Eds.), *Environmental life cycle assessment* (pp. 105–144). CRC Press.
- Khan, F. I., & Amyotte, P. R. (2005). I2SI: A comprehensive quantitative tool for inherent safety and cost evaluation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 310–326. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.06.022>
- Kiss, A. A., & Ignat, R. M. (2013). Optimal economic design of an extractive distillation process for bioethanol dehydration. *Energy Technology*, 1, 166–170. <https://doi.org/10.1002/ente.201200053>
- Lei, Z., Li, C., & Chen, B. (2003). Extractive distillation: A review. *Separation & Purification Reviews*, 32(2), 121–213.
- Amoneit, M., Weckowska, D., Sphar, S., Wagner, O., Adeli, M., Mai, I., & Haag, R. (2024). Green chemistry and responsible research and innovation: Moving beyond the 12 principles. *Journal of Cleaner Production*, 484, 144011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144011>
- Núñez García, M. J., & García Triñanes, P. (2006, noviembre). Biocombustibles: Bioetanol y biodiesel. En *Actas del XIX Congreso ENCIGA. Asociación dos Ensinantes de Ciencias de Galicia*.
- Ortiz Espinoza, A. P. (2020). *Inclusión de seguridad inherente en el diseño y evaluación de procesos químicos* [Tesis doctoral, Instituto Tecnológico de Celaya].
- Ortiz-Espinoza, A. P., Jiménez-Gutiérrez, A., El-Halwagi, M. M., Kazantzis, N. K., & Kazantzi, V. (2021). Comparison of safety indexes for chemical processes under uncertainty. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.069>
- Othman, M. R. bin. (2011). *Sustainability assessment and decision making in chemical process design* [Tesis doctoral en Ingeniería, Universidad Técnica de Berlín].
- Pérez Fernández, A., Rivas Martínez, M. L., Caamal Cauich, I., & Martínez Luis, D. (2017). Production of bioethanol and its impact on the price of agricultural products in Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 597–602. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.977>
- Scilipoti, J. A. (2014). *Diseño molecular y otras estrategias para la selección de solventes y co-solventes en procesos de separación* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Sur].

- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2016). Enhanced distillation and supercritical extraction. En L. Ratts & M. O'Sullivan (Eds.), Separation process principles with applications using process simulators (4ª ed., pp. 320–369). Wiley.
- Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., & Widago, S. (2009). Cost accounting and capital cost estimation. En J. Welter & S. Dumas (Eds.), Product and process design principles: Synthesis, analysis and evaluation (3ª ed., pp. 602–641). Wiley.
- Shariff, A. M., Athar, M., Buang, A., Khan, M. I., & Hermansyah, H. (2018). Distillation column inherent safety index at preliminary. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 458(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/458/1/012047>
- Valdeón, D. H. (2018). Tecnologías de deshidratación de bioetanol [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica Nacional].
- Velasco Cristancho, A. P. (2020). Una revisión general de los procesos para la producción de bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica [Tesis de licenciatura, Universidad Santo Tomás].
- Zhang, L., Yang, B., & Zhang, W. (2015). Vapor–liquid equilibrium of water ethanol + glycerol: Experimental measurement and modeling for ethanol dehydration by extractive distillation. Journal of Chemical & Engineering Data, 60(6), 1892–1899.

Detección del gen de virulencia fimH en aislados clínicos de *Klebsiella pneumoniae* mediante PCR-RFLP

PCR-RFLP detection of the fimH virulence gene in clinical isolates of *Klebsiella pneumoniae*

Gómez-García, A. K.¹, Vega-Castillo, U.¹, Hernández-Sánchez, N. F.¹, Beltrán-López, E.¹, Sosa-Sillas, E. C.¹, Bueno-González, E.¹, Contreras-Méndez, J. A.¹, León-Sicaños, C. R.² y López-Moreno, H. S.^{1*}

¹Laboratorio de Biomedicina Molecular, CA-UAS-264, Posgrado en Ciencias Biomédicas y Posgrado en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, CP 80010, Sinaloa, México.²Laboratorio 19 Infectómica y Patogénesis Molecular, CA-UAS-264, Posgrado en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, CP 80010, Sinaloa, México

RESUMEN

En 2024, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó su lista de patógenos bacterianos prioritarios para la salud pública, en la cual *Klebsiella pneumoniae* fue clasificada en el primer lugar dentro de la categoría de prioridad crítica por su resistencia antimicrobiana. Esta clasificación refleja la creciente detección de cepas resistentes a carbapenémicos, asociadas con tasas de mortalidad intrahospitalaria superiores al 30 %, junto con la presencia de múltiples genes de virulencia codificados tanto en el cromosoma como en plásmidos. En este contexto, nuestro grupo de investigación inició el estudio de diversos genes relacionados con la virulencia y la resistencia a antimicrobianos. El objetivo del presente estudio fue detectar el gen que codifica la adhesina fimH, componente de la fimbria tipo 1 e implicado en la formación de biopelículas, en aislados clínicos de *K. pneumoniae*. Se analizaron diez aislados clínicos (Kp1–Kp10) y la cepa de referencia ATCC 13883, esta última incluida como control positivo, mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), con confirmación mediante digestión de restricción con BamHI (análisis RFLP, Polimorfismo de Longitud de Fragmentos de Restricción). Los resultados mostraron la presencia del gen fimH en el 80% de los aislados clínicos evaluados (8/10) y su ausencia en las dos cepas restantes (Kp1 y Kp7). En conclusión, se identificó una alta frecuencia del gen fimH en los aislados clínicos analizadas, lo que proporciona un avance molecular para el inicio de la caracterización integral de los factores de virulencia en esta bacteria de importancia crítica a nivel global.

Palabras clave: *Klebsiella pneumoniae*, fimH, Virulencia bacteriana

ABSTRACT

In 2024, the World Health Organization (WHO) published its list of priority bacterial pathogens for public health, ranking *Klebsiella pneumoniae* first in the critical-priority category due to its antimicrobial resistance. This classification reflects the increasing detection of carbapenem-resistant isolates associated with in-hospital mortality rates exceeding 30%, together with the presence of multiple virulence genes encoded on both chromosomal and plasmid DNA. In this context, our research group initiated the study of several genes associated with virulence and antimicrobial resistance. The aim of the present study was to detect the gene encoding the FimH adhesin, a component of type 1 fimbriae implicated in biofilm formation, in clinical isolates of *K. pneumoniae*. Ten clinical isolates (Kp1–Kp10) and the reference strain ATCC 13883 (used as a positive control) were analysed by polymerase chain reaction (PCR), with confirmation by BamHI restriction digestion (restriction fragment length polymorphism, RFLP, analysis). The results showed the presence of the fimH gene in 80% of the clinical isolates (8/10) and its absence in two isolates (Kp1 and Kp7). In conclusion, a high frequency of the fimH gene was identified among the evaluated clinical isolates, providing a molecular basis for the broader characterisation of virulence factors in this bacterium of global public health concern.

Keywords: *Klebsiella pneumoniae*, fimH, Bacterial virulence

*Autor de correspondencia: Héctor Samuel López Moreno

Email: hslmoreno@ms.uas.edu.mx

ORCID ID: [0000-0001-7391-205X](https://orcid.org/0000-0001-7391-205X)

Registro ORCID Autores: VC: [0009-0006-1796-8845](https://orcid.org/0009-0006-1796-8845); GC: [0009-0008-9222-8171](https://orcid.org/0009-0008-9222-8171); HS: [0009-0002-9578-9464](https://orcid.org/0009-0002-9578-9464);

BL: [0000-0002-8604-2847](https://orcid.org/0000-0002-8604-2847); SS: [0009-0005-0869-4777](https://orcid.org/0009-0005-0869-4777);

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

INTRODUCCIÓN

El género *Klebsiella* comprende bacilos Gram-negativos, encapsulados, no móviles y anaerobios facultativos, pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae (Asokan et al., 2025; Huang et al., 2025). En los seres humanos, *Klebsiella* puede comportarse como comensal del tracto gastrointestinal, cavidad bucal y la nasofaringe, aunque bajo determinadas condiciones se convierte en un patógeno oportunista causante de infecciones sistémicas y localizadas (Asokan et al., 2025; Huang et al., 2025; Zhu et al., 2021). *Klebsiella pneumoniae* es la especie clínicamente más relevante del género, debido a su capacidad para causar infecciones adquiridas en la comunidad y nosocomiales, incluyendo abscesos hepáticos, neumonía, endoftalmitis, meningitis, infecciones urinarias y bacteriemia (Asokan et al., 2025; Bengoechea & Sa Pessoa, 2019; Gołębiewska et al., 2019; Huang et al., 2025). La susceptibilidad a las infecciones por *K. pneumoniae* es multifactorial, resultante de la interacción entre factores del hospedero (edad, estado inmunitario y comorbilidades), factores ambientales (exposición a antibióticos, condiciones hospitalarias) y factores del propio microorganismo, entre las que destacan mecanismos de virulencia y resistencia antimicrobiana (Asokan et al., 2025; Huang et al., 2025; Schembri et al., 2005; Zhu et al., 2021).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica a *K. pneumoniae* entre las bacterias de prioridad crítica debido a la frecuente identificación de aislados resistentes a carbapenémicos como imipenem y ertapenem y a otros antimicrobianos de última línea como cefepima. En México, esta bacteria se encuentra entre los principales agentes etiológicos de infecciones hospitalarias multiresistentes, asociándose con una elevada morbilidad, mortalidad y costos sanitarios (Calderon-Gonzalez et al., 2023). El surgimiento de cepas hipervirulentas y multiresistentes, que combinan altos niveles de factores de virulencia con resistencia antimicrobiana amplia, complica el tratamiento y aumenta el riesgo de brotes nosocomiales (Asokan et al., 2025; J. Chen et al., 2023; Huang et al., 2025; Zhu et al., 2021). *Klebsiella pneumoniae* evade la respuesta inmune mediante varios mecanismos: producción de cápsula, modulación de la respuesta inflamatoria y formación de biopelículas, lo que favorece su persistencia y diseminación en entornos clínicos (Chang et al., 2021; Wang et al., 2020). Estas estrategias incrementan la capacidad de colonización y la resistencia a la eliminación por el hospedero (Asokan et al., 2025; T. Chen et al., 2020; Li et al., 2024; Martin & Bachman, 2018).

Los factores de virulencia de *Klebsiella pneumoniae* incluyen la cápsula polisacárida, lipopolisacáridos (LPS), fimbrias (tipo 1 y tipo 3), sideróforos y plásmidos portadores de genes de virulencia; estas estructuras participan en la evasión inmune, la persistencia, adhesión y adquisición de nutrientes, y están asociadas con y la patogenidad en el hospedero (T. Chen et al., 2020; Li et al., 2024). En específico, las fimbrias facilitan la fijación a superficies epiteliales del hospedero y a la formación de biopelículas, procesos críticos para el establecimiento de infecciones, o bien para su permanencia en las superficies de dispositivos médicos (Asokan et al., 2025; Huang et al., 2025; Schembri et al., 2005; Zhu et al., 2021).

El operón de la fimbrias tipo 1 incluye genes funcionales como fimA (subunidad mayor), fimF/fimG (subunidades accesorias), y genes de ensamblaje y regulación (fimC, fimD, fimI, fimK) (Schembri et al., 2000; Stahlhut et al., 2009). Entre ellos, fimH codifica la adhesina de tipo lectina FimH, que reconoce residuos de manosa en glicoproteínas del hospedero y promueve la adhesión, la colonización y la formación de biopelículas; estos procesos son particularmente relevantes en infecciones del tracto urinario y en la persistencia en superficies bióticas y no-bióticas (Sarshar et al., 2020; Schembri et al., 2000; Stahlhut et al., 2009). Sustituciones en la secuencia de fimH pueden alterar la afinidad por manosa, la densidad y morfología fimbrial, y por tanto modular la adhesión, el tropismo y la virulencia. Por ello, el análisis genético de fimH contribuye a explicar diferencias de patogenidad entre aislados clínicos y ambientales (Lopatto et al., 2024a; Sarshar et al., 2020; Schembri et al., 2000; Stahlhut et al., 2009).

La caracterización molecular mediante PCR y posterior análisis de polimorfismos en la longitud de fragmentos tras digestión con enzimas de restricción (PCR-RFLP) constituye una herramienta rápida y de bajo costo para la detección de genes como fimH y para la identificación de patrones polimórficos que facilitan la diferenciación entre aislados y el seguimiento de brotes (Chang et al., 2021; Rohit et al., 2016). No obstante, el poder de resolución de PCR-RFLP depende de la presencia de sitios de restricción discriminatorios y puede requerir confirmación por secuenciación para caracterizar mutaciones puntuales no detectables por RFLP.

La integración de datos genéticos con perfiles fenotípicos (resistencia antimicrobiana, características de virulencia) permite correlacionar genotipos con comportamiento clínico, información útil para el control y la prevención hospitalaria (Lopatto, et al., 2024b). El análisis de fimH permite profundizar en los mecanismos de adhesión e invasión que

subyacen a la persistencia de *K. pneumoniae*, y puede orientar el desarrollo de estrategias anti-adhesinas complementarias a las terapias antimicrobianas convencionales (Lopatto et al., 2024b; Sarshar et al., 2020). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la presencia del gen fimH en aislados clínicos de *K. pneumoniae* aisladas en un entorno hospitalario, mediante análisis in silico (alineamientos, predicción de sitios de restricción) e in vitro (PCR específica seguida de confirmación por digestión enzimática RFLP).

MATERIALES Y MÉTODOS

PCR-RFLP IN SILICO DEL GEN fimH

Se utilizó la secuencia nucleotídica del gen fimH de *K. pneumoniae* (número de acceso GenBank: FJ483600.1) como referencia para el diseño de la estrategia de amplificación. Los iniciadores F-fimH (5'-TGCTGCTGGGCTGGTCGATG-3') y R-fimH (5'-GGGAGGGTGACGGTGACATC-3'), previamente descritos por Yu et al. (2006), fueron evaluados mediante el programa OligoAnalyzer (IDT, Integrated DNA Technologies) para determinar sus características fisicoquímicas. La amplificación por Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) in silico se simuló con software Serial Cloner v2.6.1, y el análisis de los sitios de restricción se realizó con el software SnapGene Viewer, empleando la herramienta bioinformática Virtual Cutter para predecir patrones de digestión diferenciales con diversas enzimas de restricción (Hernández-Sánchez & López-Moreno, 2024).

EXTRACCIÓN DEL gDNA DE K. PNEUMONIAE

Se utilizaron diez aislados clínicos de *K. pneumoniae*, así como la cepa de referencia ATCC 13883 (como control positivo), las diez aislados clínicos fueron denominadas "Kp" (Kp1-Kp10); 6 fueron aisladas de urocultivo (Kp2, Kp6-Kp9), 3 de herida postoperatoria (Kp3, Kp4 y Kp5) y 1 de expectoración (Kp10), todas obtenidas de muestras de pacientes del Hospital General de Culiacán, Sinaloa, México, quienes en esa institución firmaron una carta de consentimiento informado para el uso anónimo y con fines educativos y de investigación de sus derivados biológicos, estas cepas fueron donadas a nuestro grupo de investigación por el Dr. Salvador Velarde. Las cepas Kp, se cultivaron en medio Brain Heart Infusion (BHI, BD Difco®) a 37 °C hasta alcanzar fase exponencial, siguiendo protocolos estándar, considerando un valor de 0.5 a 600 nm. Las biomásas se recuperaron por centrifugación a 10,000 × g durante 15 min y el gDNA se extrajo empleando el método estándar de Aljanabi y Martínez (1997), con ligeras modificaciones. Brevemente, las pastillas

celulares se resuspendieron en 400 µL de solución homogeneizadora (NaCl 400 mM, Tris-HCl 10 mM pH 8.0, EDTA 2 mM pH 8.0), seguido de la adición de 40 µL de SDS al 20% (p/v) y 8 µL de proteinasa K (20 mg/mL). La mezcla se incubó a 60 °C durante 1 h. Posteriormente, se adicionaron 300 µL de NaCl 6 M, se mezcló vigorosamente en vórtex durante 30 s y se centrifugó a 10,000 × g durante 30 min. El sobrenadante se transfirió a un tubo cónico estéril tipo Eppendorf, se precipitó el DNA con un volumen equivalente de isopropanol y se incubó a 20 °C durante 1 h. El precipitado obtenido tras centrifugación se lavó con etanol al 70% v/v, se dejó secar a 60 °C en un minitermobloque (Joanlab) y se resuspendió en amortiguador TE (Tris-HCl 10 mM, EDTA 1 mM, pH 8.0). Las muestras se almacenaron a -20 °C hasta su uso.

AMPLIFICACIÓN DEL GEN fimH MEDIANTE PCR

Las amplificaciones por PCR del gen fimH con los gDNA de la cepa de referencia ATCC 13883 y los Kps, se llevaron a cabo en un termociclador MiniAmp Thermal Cycler (Applied Biosystems, Thermo Fisher Scientific) utilizando los iniciadores F-fimH y R-fimH previamente descritos. Las condiciones de amplificación fueron: desnaturalización inicial a 95 °C durante 5 min; 35 ciclos de 95 °C por 30 s, 55 °C por 30 s y 72 °C por 1 min; seguido de una extensión final a 72 °C durante 10 min. Cada reacción se preparó en un volumen final de 25 µL, compuesto por: 8.75 µL de Máster Mix (Sigma-Aldrich), 2 µL de cada iniciador (2.5 µM), 5 µL (12 ng/µL) de gDNA como molde y 7.25 µL de agua estéril. Se incluyó un control negativo con agua en lugar de DNA molde. Los productos amplificados se separaron mediante electroforesis en gel de agarosa al 1% (p/v), teñido con SYBRGold (Sigma-Aldrich), aplicando un voltaje de 80 V durante 40 min, y se documentaron bajo luz UV, utilizando la cámara de 12 Mp integrada en un iPhone 11 (Apple).

ANÁLISIS RFLP DEL GEN fimH

Con base en el análisis in silico del producto amplificado por la PCR simulada, se seleccionó la enzima BamHI (Jena Biosciences) para confirmar la presencia del gen fimH mediante la observación de los patrones de restricción de tamaño molecular definido. Las digestiones enzimáticas se prepararon en un volumen final de 23 µL, conteniendo 10 µL del producto de PCR, 0.3 µL de BamHI (6 UI), 3 µL de amortiguador 10X Universal (Jena Biosciences) y agua inyectable estéril (Pisa). Las reacciones se incubaron a 37 °C durante 2 h, al término de las cuales, se inactivó a la enzima, sometiéndola a una temperatura de 80 °C por 5 min, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Los fragmentos

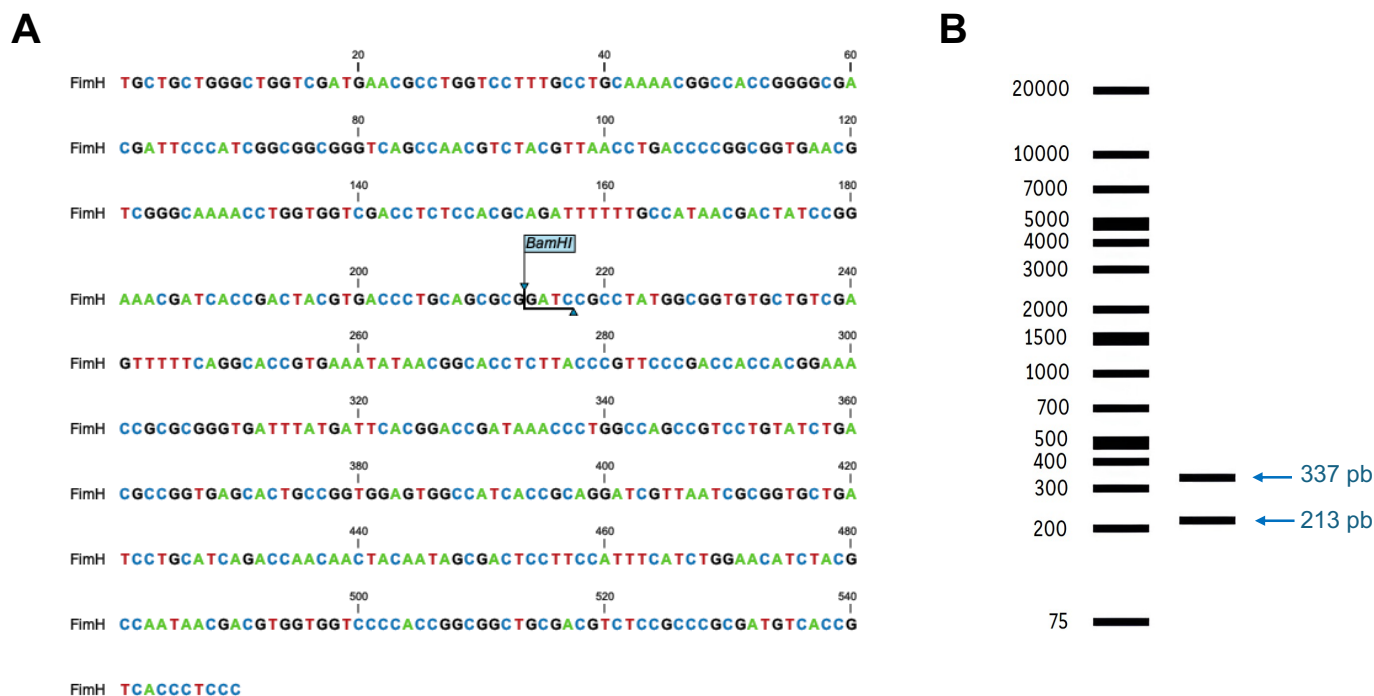


Figura 1. PCR-RFLP in silico del gen fimH de *K. pneumoniae*. En A), Secuencia del gen fimH de *K. pneumoniae* obtenida mediante una PCR simulada empleando los iniciadores específicos reportados por (Hernández-Sánchez & López-Moreno, 2024; Yu et al., 2006), donde se muestran los 550 nucleótidos que la componen, consistentes a los 550 pb esperados en un gel de agarosa. El sitio de restricción de la enzima BamHI se señala con una bandera azul en la posición 213 (Imagen obtenida con el software CLC Sequence Viewer 8). En B), Patrón de restricción simulado del gen fimH amplificado en A, digerido con la enzima BamHI. Se muestra un gel de agarosa simulado, donde se observa la longitud de dos fragmentos de restricción correspondientes a 337 y 213 pb (señalados con flechas azules) generados por el corte con la enzima BamHI sobre el producto del gen fimH obtenido en la PCR in silico.

resultantes se analizaron en geles de agarosa al 2% (p/v), teñidos con SYBRGold a una concentración 2 X diluido del vial original a 10000X (Invitrogen), empleando un marcador de tamaño molecular de 100 pb. Los perfiles de restricción se compararon con los patrones in silico reportados previamente (Hernández-Sánchez & López-Moreno, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS IN SILICO DEL GEN fimH MEDIANTE PCR-RFLP

La simulación computacional de la PCR in silico constituye una estrategia preliminar fundamental para la validación del diseño experimental de técnicas de tipificación molecular (Velázquez-Escobar, 2025). En este estudio se emplearon iniciadores específicos dirigidos a regiones conservadas del gen que codifica para la adhesina FimH, proteína localizada en la punta de la fimbria tipo 1 de *K. pneumoniae*, cuya función está asociada con la adhesión dependiente de manosa a células

epiteliales y, por ende, al establecimiento de biopelículas en superficies tanto biológicas como abióticas.

Los resultados del análisis in silico indicaron la amplificación de un fragmento de aproximadamente 550 pb correspondiente a fimH (Figura 1A), en concordancia con los tamaños moleculares previamente reportados para esta diana molecular en aislados clínicos y ambientales de *K. pneumoniae* (Swedan & Aldakhily, 2024; Yu et al., 2006). En paralelo, se realizó el análisis de sitios de restricción en el fragmento amplificado mediante un panel de enzimas disponibles en bases de datos bioinformáticas (<https://nc3.neb.com/NEBcutter/>; <https://www.genscript.com/tools/restriction-enzyme-map-analysis>). Al analizar el patrón de digestión de la secuencia del gen fimH, se eligió a la enzima BamHI dado que realiza un corte único dentro del producto amplificado en la PCR simulada para fimH (Figura 1A), generando dos productos de diferentes longitudes entre sí, uno de 213 pb y otro de 337

pb respectivamente, tras su digestión virtual (Figura 1B). La diferencia de longitud o tamaño entre ambos fragmentos (124 pb) resulta suficiente para garantizar una resolución adecuada mediante electroforesis en geles de agarosa al 2%, lo que avala su utilización como herramienta de tipificación molecular por polimorfismos de longitud en fragmentos de restricción (RFLP).

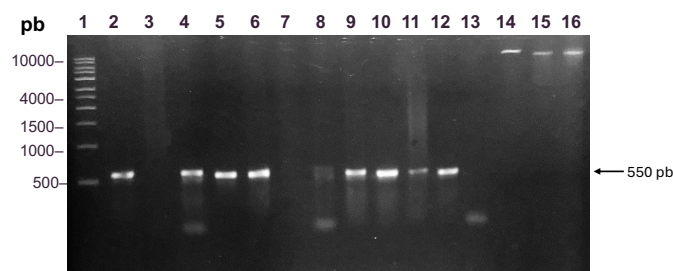


Figura 2. Presencia del gen de fimH en los aislados clínicos de *K. pneumoniae*. Ocho de las 10 muestras clínicas analizadas presentan un producto (amplicón) de 550 pb (indicado con la flecha negra) en un gel de agarosa al 2% p/v, consistente con el amplicón de la PCR in silico. La distribución de las muestras fue: 1. Marcador (Sigma-Aldrich 1 kb), 2. Kp ATCC 13884, 3. Kp1, 4. Kp3, 5. Kp4, 6. Kp5, 7. Kp7, 8. Kp8, 9. Kp9, 10. Kp10, 11. Kp2, 12. Kp6, 13. Control negativo, 14. gDNA ATCC 13884, en 15 y 16 se incluyen alícuotas equivalentes de gDNA (al de la cepa de referencia ATCC 13884) de los dos aislados clínicos que resultaron negativos a la presencia del gen fimH en la PCR, correspondientes a Kp1 (15) y Kp7 (16). Resultado representativo de 3 experimentos independientes (Yu et al., 2006).

Este enfoque resulta particularmente útil para la caracterización de genes asociados con virulencia en patógenos multirresistentes, dado que integra herramientas bioinformáticas con estrategias moleculares experimentales que permiten generar predicciones confiables antes de la ejecución de ensayos in vitro, disminuyendo costos y tiempo de optimización metodológica (Asokan et al., 2025; J. Chen et al., 2023; Lopatto et al., 2024a; Schembri et al., 2005; World Health Organization, 2024; Zhu et al., 2021). En este sentido, la integración de herramientas bioinformáticas y metodologías moleculares experimentales fortalece la caracterización de genes asociados a factores de virulencia en *K. pneumoniae*, como la adhesina de la fimbria tipo 1, analizada en este trabajo.

DETECCIÓN EXPERIMENTAL DEL GEN fimH MEDIANTE PCR

Una vez establecida la validez computacional, la PCR se implementó experimentalmente en un total de 10 aislados clínicos de *K. pneumoniae* (Kp1–Kp10) aisladas de contexto hospitalario, además se incluyó a la cepa de referencia ATCC 13883 como control positivo, para mayor certidumbre en nuestros análisis. Los resultados confirmaron la

amplificación exitosa del fragmento de 550 pb en 8 de las 10 cepas Kp evaluadas, lo que representa una prevalencia de 80% del gen fimH en la colección microbiana evaluada (Figura 2). En contraste, Kp1 y Kp7 se identificaron como negativas para la presencia de este determinante genético, lo cual refleja un porcentaje minoritario (20%) de aislados potencialmente portadores de variantes no fimbriales de adhesión o mecanismos alternativos de colonización (Gerlach et al., 1989; Lopatto et al., 2024a; Pourmohammad-Hosseini et al., 2023; Sarshar et al., 2020; Stahlhut et al., 2009; World Health Organization, 2024). Estos hallazgos concuerdan con estudios recientes que resaltan la alta frecuencia de fimH en aislados clínicos. Swedan & Aldakhily (2024) reportaron una prevalencia del 88.6% en aislados de *K. pneumoniae* provenientes de hospitales en Jordania, incluso dentro de subpoblaciones con perfiles de resistencia crítica (Swedan & Aldakhily, 2024). La elevada prevalencia de este gen se explica por su participación estructural y funcional en la biología del patógeno, favoreciendo la supervivencia bacteriana frente al aclaramiento mecánico en tejidos mucosos.

En consecuencia, fimH se ha consolidado como un biomarcador molecular robusto, cuya detección permite la identificación de cepas potencialmente virulentas en estudios de vigilancia epidemiológica y diagnóstico temprano, particularmente en regiones geográficas con alta carga de infecciones asociadas a la atención en salud (Lopatto et al., 2024a; Pourmohammad-Hosseini et al., 2023; Schembri et al., 2000, 2005; Swedan & Aldakhily, 2024). La presencia predominante del gen en las cepas locales analizadas en este trabajo ofrece indicios sobre patrones conservados de virulencia en nuestra área de estudio y refuerza

la necesidad de implementar análisis rutinarios de este biomarcador en los hospitales del país.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL GEN fimH

Los productos obtenidos in vitro mediante la PCR correspondientes al gen fimH fueron digeridos con la enzima BamHI seleccionada del análisis in silico, obteniéndose en 7 de los aislados clínicos positivos un patrón de restricción consistente de dos fragmentos (213 y 337 pb) resultantes de la digestión enzimática simulada empleando la misma enzima (Figura 3). Dicho patrón fue uniforme tanto para la cepa de referencia de *K. pneumoniae* ATCC 13883, así como para como todos los aislados clínicos que resultaron positivos (Kp2, Kp3, Kp4, Kp5, Kp6, Kp9 y Kp10), inesperadamente la cepa Kp8 presentó un patrón ligeramente diferente con la banda de 213 pb y una de unos 150 pb probablemente debido a un polimorfismo de fimH en esta cepa clínica, que podría poseer más de un

sitio para BamHI que deberá verificarse por secuenciación. La ausencia de variaciones en el patrón de fragmentación indica que el gen fimH presenta un alto grado de conservación genética en las cepas evaluadas, sin polimorfismos detectables por esta técnica. Se observaron diferencias en la intensidad de bandas entre las cepas (ej. mayor intensidad en Kp3, Kp8 y Kp9 respecto a Kp2, Kp6 y Kp10), lo que probablemente se deba a variaciones en la concentración inicial de gDNA o en la eficiencia de la amplificación posiblemente inherente a la variación entre cepas, sin afectar la interpretación de los patrones de restricción en general. Estos resultados coinciden con estudios recientes que destacan la prevalencia y conservación de fimH en *K. pneumoniae*, como lo publicado por Pourmohammad-Hosseini et al. (2023), quienes reportaron una prevalencia del 95% del gen fimH detectado en cepas de *K. pneumoniae* resistentes a carbapenémicos, asociando a fimH con la colonización de tracto urinario y respiratorio (Pourmohammad-Hosseini et al., 2023). Asimismo, se ha observado una correlación entre fimH, la capacidad de formación de biofilms y fenotipos multirresistentes (Li et al., 2024). Estas evidencias apoyan la relevancia de fimH como biomarcador de virulencia y como factor implicado en la persistencia hospitalaria de *K. pneumoniae*.

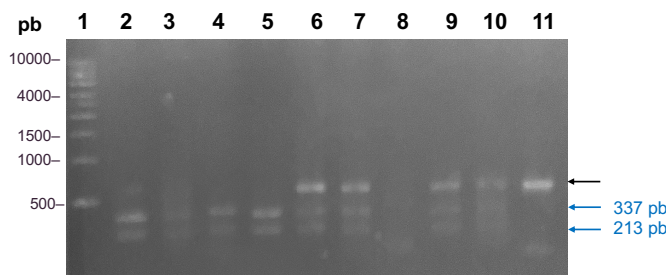


Figura 3. RFLP del gen fimH en aislados clínicos de *K. pneumoniae* mediante digestión con BamHI. Patrón de restricción in vitro del gen fimH tratado con la enzima BamHI correspondientes a los amplicones de PCR de cada una de los aislados clínicos de *K. pneumoniae* analizadas in vitro, consistentes con la PCR-RFLP simulada (in silico) de la figura 1, visualizado en un gel de agarosa al 2%, teñido con SYBRGold (Sigma-Aldrich), donde se observa la longitud de dos fragmentos de restricción (RFLP) correspondientes a 337 y 213 pb (señalados con flechas azules). En 1. Marcador molecular 1 kb (Sigma-Aldrich), 2. Kp ATCC 13883, 3. Kp2, 4. Kp3, 5. Kp4, 6. Kp5, 7. Kp6, 8. Kp8, 9. Kp9, 10. Kp10, 11. Control negativo (producto de PCR de fimH Kp ATCC 13883 sin enzima de digestión, flecha negra). Resultado representativo de 3 experimentos independientes.

Estudios genómicos a gran escala también muestran la diversidad estructural del gen, Lopatto et al. (2024a) reportaron que >70% de los genomas analizados compartían un alelo idéntico de fimH, mientras que

variantes específicas exhibían mayor afinidad de unión a manosa, favoreciendo la colonización en contextos clínicos como infecciones asociadas a catéteres (Lopatto et al., 2024a). Para verificar si esos hallazgos mediados por FimH se desarrollan en nuestras cepas Kp en estudio y analizar la posible virulencia diferencial entre ellas, se requieren evaluaciones de estructura y función, iniciando con su participación en la adherencia e invasión in vitro e in vivo.

En conjunto, los resultados obtenidos en este trabajo confirman que fimH es un gen altamente prevalente (80%) y conservado entre aislados clínicos locales, con patrones de restricción homogéneos que concuerdan con la predicción in silico. Esta aproximación metodológica demuestra que la combinación de PCR y RFLP constituye una herramienta accesible y confiable para la caracterización molecular de fimH. Futuras investigaciones que integren un mayor número de aislados clínicos y análisis de expresión génica permitirán profundizar en la participación de este gen y de otros, en la adhesión, la resistencia antimicrobiana y la hipervirulencia de *K. pneumoniae*.

CONCLUSIONES

El abordaje combinado de análisis in silico y PCR-RFLP experimental empleando la enzima de restricción BamHI permitió detectar el gen fimH en 8 de 10 aislados clínicos (80%) y en la cepa de referencia *K. pneumoniae* ATCC 13883. La digestión con BamHI generó patrones de restricción concordantes in silico e in vitro (fragmentos ~213 y ~337 pb), lo que respalda la idoneidad de la estrategia PCR-RFLP para la detección y caracterización preliminar de fimH en colecciones clínicas. No obstante, la uniformidad del patrón de RFLP observado únicamente indica conservación de los sitios de restricción evaluados y no excluye la presencia de variaciones nucleotídicas fuera de dichos sitios, ni de mutaciones sin efecto sobre el reconocimiento de BamHI. Por tanto, si bien los resultados sugieren un alto grado de conservación del locus fimH entre los aislados clínicos analizadas, esta conclusión debe interpretarse con cautela dado el tamaño de la muestra. Por su sencillez y bajo costo, la PCR-RFLP con BamHI constituye una herramienta útil como cribado inicial y apoyo en estudios epidemiológicos de *K. pneumoniae*, especialmente en contextos con recursos limitados. Sin embargo, para una caracterización exhaustiva y para la identificación de variantes alélicas con posible repercusión funcional o epidemiológica se recomienda complementar el análisis con (i) secuenciación directa de amplicones representativos, (ii) ampliación de la cohorte de aislados y (iii) estudios de correlación genotipo-fenotipo (por ejemplo, perfiles de

resistencia antimicrobiana, pruebas de formación de biofilm y análisis de expresión génica). Estas acciones permitirán validar la aplicabilidad de fimH como marcador de vigilancia y clarificar su relación con fenómenos de hipervirulencia y multirresistencia.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen al Dr. Salvador Velarde por el donativo de los aislados clínicos de *Klebsiella pneumoniae*.

APROBACIÓN DE COMITÉ DE INVESTIGACIÓN Y ÉTICA

El proyecto DCB 2023-7: Caracterización inmunobiotecnológica de aislados clínicos de *Klebsiella pneumoniae* con selección de antígenos para su expresión recombinante del cual derivó este trabajo fue avalado por el H. Comité de Investigación y Ética del Posgrado en Ciencias Biomédicas, UAS.

FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue financiado con recursos propios del Laboratorio de Biomedicina Molecular de La Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, CP. 80010, Sinaloa, México.

REFERENCIAS

- Aljanabi, S. M., & Martinez, I. (1997). Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. In *Nucleic Acids Research* (Vol. 25, Issue 22). Oxford University Press. <http://doi: 10.1093/nar/25.22.4692>
- Asokan, S., Jacob, T., Jacob, J., AlSosowaa, A. A., Cherian, T., Peijnenburg, W. J. G. M., & Vijayan, S. (2025). *Klebsiella pneumoniae*: A growing threat in the era of antimicrobial resistance. In *Microbe (Netherlands)* (Vol. 7). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100333>
- Bengoechea, J. A., & Sa Pessoa, J. (2019). *Klebsiella pneumoniae* infection biology: Living to counteract host defences. In *FEMS Microbiology Reviews* (Vol. 43, Issue 2, pp. 123–144). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy043>
- Calderon-Gonzalez, R., Lee, A., Lopez-Campos, G., Hancock, S. J., Sa-Pessoa, J., Dumigan, A., McMullan, R., Campbell, E. L., & Bengoechea, J. A. (2023). Modelling the Gastrointestinal Carriage

- of *Klebsiella pneumoniae* Infections. *MBio*, 14(1). <https://doi.org/10.1128/mbio.03121-22>
- Chen, T., Dong, G., Zhang, S., Zhang, X., Zhao, Y., Cao, J., Zhou, T., & Wu, Q. (2020). Effects of iron on the growth, biofilm formation and virulence of *Klebsiella pneumoniae* causing liver abscess. *BMC Microbiology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01727-5>
- Chen, J., Zhang, H., & Liao, X. (2023). Hypervirulent *Klebsiella pneumoniae*. In *Infection and Drug Resistance* (Vol. 16, pp. 5243–5249). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/IDR.S418523>
- Gerlach, G.-F., Clegg, S., & Allen, B. L. (1989). Identification and Characterization of the Genes Encoding the Type 3 and Type 1 Fimbrial Adhesins of *Klebsiella pneumoniae*. In *JOURNAL OF BACTERIOLOGY* (Vol. 171, Issue 3). <http://doi:10.1128/jb.171.3.1262-1270.1989>
- Gołębiewska, J. E., Krawczyk, B., Wysocka, M., Ewiak, A., Komarnicka, J., Bronk, M., Rutkowski, B., & Dębska-Ślizień, A. (2019). Host and pathogen factors in *Klebsiella pneumoniae* upper urinary tract infections in renal transplant patients. *Journal of Medical Microbiology*, 68(3), 382–394. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.000942>
- Hernández-Sánchez, N., & López-Moreno, H. S. (2024). Estandarización de la técnica de PCR-RFLP del gen de virulencia fimH en aislados clínicos de *Klebsiella pneumoniae* [Tesis Licenciatura en Biotecnología Genómica]. Facultad de Ciencias Químico Biológicas, UAS.
- Huang, X., Yao, X., Hou, Y., Zhang, D., Xie, R., Shi, C., Shang, Y., Bi, H., Song, W., Hua, L., Li, C., Chen, H., Wu, B., & Peng, Z. (2025). Global trends of antimicrobial resistance and virulence of *Klebsiella pneumoniae* from different host sources. *Communications Medicine*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43856-025-01112-1>
- Li, L., Gao, X., Li, M., Liu, Y., Ma, J., Wang, X., Yu, Z., Cheng, W., Zhang, W., Sun, H., Song, X., & Wang, Z. (2024). Relationship between biofilm formation and antibiotic resistance of *Klebsiella pneumoniae* and updates on antibiofilm therapeutic strategies. In *Frontiers in*

- Cellular and Infection Microbiology (Vol. 14). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1324895>
- Lopatto, E. D. B., Pinkner, J. S., Sanick, D. A., Potter, R. F., Liu, L. X., Villicaña, J. B., Tamadonfar, K. O., Ye, Y., Zimmerman, M. I., Gualberto, N. C., Dodson, K. W., Janetka, J. W., Hunstad, D. A., & Hultgren, S. J. (2024a). Conformational ensembles in *Klebsiella pneumoniae* FimH impact uropathogenesis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121(39). <https://doi.org/10.1073/pnas.2409655121>
- Lopatto, E. D. B., Santiago-Borges, J. M., Sanick, D. A., Malladi, S. K., Azimzadeh, P. N., Timm, M. W., Fox, I. F., Schmitz, A. J., Turner, J. S., Ahmed, S. S., Ortinu, L., Gualberto, N. C., Pinkner, J. S., Dodson, K. W., Ellebedy, A. H., Kau, A. L., & Hultgren, S. J. (2024b). Monoclonal antibodies targeting the FimH adhesin protect against uropathogenic *E. coli* UTI. <https://doi.org/10.1101/2024.12.10.627638>
- Martin, R. M., & Bachman, M. A. (2018). Colonization, infection, and the accessory genome of *Klebsiella pneumoniae*. In Frontiers in Cellular and Infection Microbiology (Vol. 8, Issue JAN). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00004>
- Pourmohammad-Hosseini, G., Ghandehari, F., & Hoveida, L. (2023). The abundance of capsule (wabG) and fimbria (fimH) coding genes in multidrug-resistant (MDR) *Klebsiella pneumoniae* strains isolated from patients admitted to Isfahan hospitals. Microbiology, Metabolites and Biotechnology, 6, 27–34. <https://doi.org/10.22104/MMB.2023.6333.1111>
- Sarshar, M., Behzadi, P., Ambrosi, C., Zagaglia, C., Palamara, A. T., & Scribano, D. (2020). FimH and anti-adhesive therapeutics: A disarming strategy against uropathogens. In Antibiotics (Vol. 9, Issue 7, pp. 1–16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9070397>
- Schembri, M. A., Blom, J., Krogfelt, K. A., & Klemm, P. (2005). Capsule and fimbria interaction in *Klebsiella pneumoniae*. Infection and Immunity, 73(8), 4626–4633. <https://doi.org/10.1128/IAI.73.8.4626-4633.2005>
- Schembri, M. A., Hasman, H., & Klemm, P. (2000). Expression and purification of the mannose recognition domain of the FimH adhesin. FEMS Microbiology Letters, 188(2), 147–151. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09186.x>
- Stahlhut, S. G., Chattopadhyay, S., Struve, C., Weissman, S. J., Aprikian, P., Libby, S. J., Fang, F. C., Krogfelt, K. A., & Sokurenko, E. V. (2009). Population variability of the FimH type 1 fimbrial adhesin in *Klebsiella pneumoniae*. Journal of Bacteriology, 191(6), 1941–1950. <https://doi.org/10.1128/JB.00601-08>
- Swedan, S. F., & Aldakhily, D. B. (2024). Antimicrobial resistance, biofilm formation, and molecular detection of efflux pump and biofilm genes among *Klebsiella pneumoniae* clinical isolates from Northern Jordan. Heliyon, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34370>
- Velázquez-Escobar, F. M., B.-L. E., V.-C. U., L.-M. H. S. (2025). In silico design of a DNA vaccine against *Toxoplasma gondii* based on ROP35 antigen epitopes specific for murine B and CD4 + T lymphocytes. In Revista de Ciencias QuímicoQuímico BiológicasBiológicas.
- Wang, G., Zhao, G., Chao, X., Xie, L., & Wang, H. (2020). The characteristic of virulence, biofilm and antibiotic resistance of *Klebsiella pneumoniae*. In International Journal of Environmental Research and Public Health (Vol. 17, Issue 17, pp. 1–17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176278>
- World Health Organization. (2024). WHO Bacterial Priority Pathogens List, 2024. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>
- Yu, W. L., Ko, W. C., Cheng, K. C., Lee, H. C., Ke, D. S., Lee, C. C., Fung, C. P., & Chuang, Y. C. (2006). Association between *rmpA* and *magA* genes and clinical syndromes caused by *Klebsiella pneumoniae* in Taiwan. Clinical Infectious Diseases, 42(10), 1351–1358. <https://doi.org/10.1086/503420>
- Zhu, J., Wang, T., Chen, L., & Du, H. (2021). Virulence Factors in Hypervirulent *Klebsiella pneumoniae*. In Frontiers in Microbiology (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.642484>

Producción de películas comestibles a base de harina de almendra de mango mediante la optimización de variables de proceso de extrusión termoplástica

Production of edible films based on mango kernel flour through optimization of thermoplastic extrusion process variables

Aguilar-Palazuelos, E.¹, Sánchez-Chilero, M.A.¹, Fitch-Vargas, P.R.², Limón-Valenzuela, V.¹, Calderón-Castro, A.¹, Ruiz-Armenta, X.A.¹, Gutiérrez-Dorado, R.¹, López-Díaz, A.¹, Galán-Rodríguez, L.³, Gómez-Favela, M.A.^{1*}

¹Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México. ²Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México. ³Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México

RESUMEN

La semilla de mango es un subproducto con alto contenido de almidón de limitado aprovechamiento en la industria de jugos y conservas, generando un incremento en residuos orgánicos que puede ser empleado en la elaboración de biopolímeros. El objetivo del trabajo fue determinar la combinación óptima de porcentaje de glicerol (%G) y velocidad de tornillo (VT) para obtener un material termoplástico adecuado en la elaboración de una película comestible (PC) con buenas propiedades mecánicas y de barrera. Como materia prima se utilizó harina de almendra de mango. Se empleó un diseño central compuesto rotatable con dos factores: %G=15–25 % y VT=120–220 rpm, con cinco niveles, obteniendo 13 tratamientos, para la obtención de material termoplástico. Las PC's se elaboraron mediante casting y se les evaluaron índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), permeabilidad al vapor de agua (PVA), fuerza de ruptura (FR) y permeabilidad al dióxido de carbono (PCO₂). La optimización se realizó mediante el método numérico de deseabilidad usando metodología de superficie de respuesta. El análisis de regresión y varianza mostró que la mejor combinación de proceso fue %G=19 % y VT=150 rpm. Con estos parámetros se predijeron valores de IAA: 4.17 g gel/g muestra, ISA: 17.99 %, PVA: 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR: 14.13 N y PCO₂: 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. La PC obtenida presenta potencial para su aplicación en frutos, lo cual contribuiría al mantenimiento de la calidad postcosecha y extensión de vida de anaquel.

Palabras clave: Almendra de mango, Optimización, Películas, PVA, PCO₂, Deseabilidad

ABSTRACT

Mango seed is a starch-rich by-product with limited utilization in the juice and canning industries, leading to increased organic waste generation; however, it can be exploited for the production of biopolymers. The objective of this study was to determine the optimal combination of glycerol concentration (%G) and screw speed (SS) to obtain a suitable thermoplastic material for the development of an edible film (EF) with favorable mechanical and barrier properties. Mango kernel flour was used as the raw material. A rotatable central composite design with two factors was applied: %G=15–25 % and SS=120–220 rpm, at five levels, resulting in 13 treatments for thermoplastic material production. The EF were produced by the casting method and evaluated for water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), water vapor permeability (WVP), breaking strength (BS), and carbon dioxide permeability (CO₂P). The optimization was carried out using the numerical desirability method employing response surface methodology. Regression and analysis of variance indicated that the optimal processing conditions were %G=19 % and SS=150 rpm. Under these conditions, the predicted values were: WAI: 4.17 g gel/g sample, WSI: 17.99 %, WVP: 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, BS: 14.13 N, and CO₂P: 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. The resulting edible film shows potential for application on fruits, contributing to the maintenance of postharvest quality and the extension of shelf life.

KEYWORDS: Mango kernel, Optimization, Films, WVP, CO₂P, Desirability

*Autor de correspondencia: Mario Armando Gómez Favela

Email: mario.gomez.fcqb@uas.edu.mx

ORCID ID: [0000-0002-5408-4129](https://orcid.org/0000-0002-5408-4129)

Registro ORCID Autores: LM: [0000-0003-3874-1448](https://orcid.org/0000-0003-3874-1448); RM: [0000-0002-0922-8082](https://orcid.org/0000-0002-0922-8082); CC: [0000-0001-6652-5705](https://orcid.org/0000-0001-6652-5705);

LD: [0009-0002-4135-6321](https://orcid.org/0009-0002-4135-6321); FM: [0000-0003-4097-4726](https://orcid.org/0000-0003-4097-4726); GD: [0000-0002-3192-1588](https://orcid.org/0000-0002-3192-1588); SC: [0000-0002-2192-2333](https://orcid.org/0000-0002-2192-2333);

AP: [0000-0002-3805-8422](https://orcid.org/0000-0002-3805-8422); GR: [0009-0000-1276-3070](https://orcid.org/0009-0000-1276-3070);

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

Enviado: Noviembre 2025

Aceptado: Enero 2026

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente demanda de alimentos que conserven en la mayor medida posible sus atributos sensoriales ha impulsado mejoras continuas en las tecnologías de procesamiento de alimentos, con el propósito de garantizar su conservación sin comprometer la calidad ni la vida útil. Esto ha favorecido una amplia investigación sobre películas y recubrimientos comestibles (Aguilar-Palazuelos *et al.*, 2025; Calderón-Castro *et al.*, 2024).

Una película comestible y biodegradable se define como una capa delgada de material comestible y biodegradable que puede formarse directamente sobre un producto alimenticio como recubrimiento, o bien preformarse como una película independiente, la cual puede colocarse entre componentes alimentarios o utilizarse como material de envoltura. Sus propiedades funcionales permiten controlar la migración de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aromas y lípidos; incorporar ingredientes funcionales (por ejemplo, antioxidantes, antimicrobianos y saborizantes) en el sistema; y/o mejorar la resistencia mecánica y las propiedades de manipulación del producto alimenticio (Jeevahan y Chandrasekaran, 2019).

Las películas comestibles pueden producirse mediante diferentes técnicas, tales como inmersión (dipping), aspersión (spraying), colado (casting) y extrusión. El método de inmersión consiste en sumergir el alimento en la solución formadora de película durante un periodo específico, seguido de una etapa de secado (Guzmán *et al.*, 2015). Las películas generadas por aspersión se aplican como capas más delgadas y uniformes en comparación con la inmersión, siendo este método más adecuado cuando se busca proteger el alimento o aplicar múltiples capas de recubrimiento (Solís-Rivera, 2016). El método de casting es el más empleado, y puede realizarse controlando el espesor de la película o simplemente vertiendo la solución formadora sobre una placa o molde; este procedimiento requiere colocar la solución en recipientes nivelados antes del secado (Borbolla-Jiménez *et al.*, 2023).

El proceso de extrusión, como método para la producción de películas comestibles, presenta la limitante del espesor relativamente elevado del material obtenido, lo que lo hace poco adecuado como película comestible tradicional y más apropiado como material de empaque; además, su manipulación puede resultar más compleja. Sin embargo, la extrusión puede utilizarse para modificar la matriz de almidón destinada a aplicaciones de recubrimiento, mejorando las propiedades filmógenas y el desempeño en su aplicación (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

La semilla de mango es un subproducto subutilizado generado por las industrias procesadoras de jugos y frutas en conserva; comúnmente se desecha, contribuyendo al incremento en el volumen de residuos orgánicos (Sánchez-Chilero *et al.*, 2025). La semilla de mango puede ser una fuente potencial de ingredientes funcionales debido a su contenido de grasas y proteínas de buena calidad. Aunque el contenido proteico es relativamente bajo, contiene la mayoría de los aminoácidos esenciales, destacando leucina, valina y lisina (Chaparro-Acuña *et al.*, 2015).

El componente principal de la semilla de mango es el almidón (aproximadamente 60 %), seguido de lípidos (9–13 %) y proteínas (6–9 %). Estos compuestos se encuentran entre los biopolímeros más utilizados para el desarrollo de películas comestibles debido a sus buenas propiedades de barrera; no obstante, presentan limitaciones bajo ciertas condiciones de humedad relativa. Para mejorar la hidrofobicidad, se han incorporado lípidos en algunas formulaciones, obteniendo resultados favorables (Gomez-Caturla *et al.*, 2022). El almidón de semilla de mango se ha utilizado para el desarrollo de películas comestibles tanto de forma aislada como combinado con gomas (Nawab *et al.*, 2016, 2017), así como reforzado con nanocristales de almidón (Silva *et al.*, 2019).

El objetivo de este estudio fue identificar la combinación óptima de porcentaje de glicerol y velocidad de tornillo para obtener un material termoplástico adecuado para el desarrollo de una película comestible con buenas propiedades mecánicas y de barrera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de mango fueron utilizadas como materia prima, obtenidas de la planta deshidratadora de mango DAMAYA ubicada en El Saladito, Elota, Sinaloa, México. Las semillas se lavaron para eliminar la pulpa residual, se abrieron manualmente con un cuchillo para extraer las almendras, y se sometieron a secado solar durante 24 h. Posteriormente, las almendras secas se molieron utilizando un molino de martillos para obtener harina de almendra de mango, la cual fue envasada en bolsas de polietileno y almacenada a 4 °C hasta su uso.

PREPARACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES

La elaboración de las películas comestibles se llevó a cabo en dos etapas. La primera consistió en la extrusión de la harina de almendra de mango para permitir la gelatinización del almidón y promover la formación de una red polimérica adecuada para la estructura de la película. La segunda etapa implicó el moldeo por vertido (casting).

EXTRUSIÓN DE LA HARINA DE ALMENDRA DE MANGO

Para el proceso de extrusión, 250 g de harina de almendra de mango se mezclaron con glicerol (%G=15–25 %) y agua para alcanzar un contenido final de humedad del 20 %. La mezcla se dejó en reposo durante 12 h a 4 °C para asegurar una distribución uniforme de humedad en toda la muestra. Posteriormente, el material fue temperado durante 1 h previo a la extrusión, con el fin de evitar la adherencia al barril del extrusor. La temperatura de extrusión se mantuvo constante en 89 °C, mientras que la velocidad del tornillo (VT) se varió de 120 a 220 rpm (Tabla 1). El extrudido obtenido de cada tratamiento fue colectado en recipientes cilíndricos con agua (relación 1:4) para evitar la retrogradación. Este material fue empleado posteriormente para la elaboración de las películas comestibles.

FORMACIÓN DE LAS PELÍCULAS

Las películas comestibles se produjeron mediante el método de moldeo por vertido. Una formulación compuesta por harina de almendra de mango extrudida y agua fue calentada en una placa

calefactora hasta alcanzar 70 °C. Luego, se vertieron 30 g de la formulación en cajas Petri y se secaron en una estufa a 45 °C durante 2 h. Una vez secas, las películas se retiraron del molde y se almacenaron en un desecador con una solución saturada de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (JT Baker®, Center Valley, EUA) para mantener una humedad relativa del 53 %. Posteriormente, las películas comestibles fueron sometidas a análisis fisicoquímicos, mecánicos y estructurales.

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) / ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA)

El IAA se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Ngobese *et al.* (2017). Una porción de 2 g de película comestible se pesó en un tubo de centrifuga de polipropileno (W_1). Se añadieron 10 mL de agua desionizada y se agitó la suspensión. La mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente durante 2 h y posteriormente se centrifugó a $3500 \times g$ durante 30 min. El sobrenadante fue decantado y el residuo remanente se pesó (W_2). El IAA se calculó utilizando la ecuación 1:

$$\text{IAA} = \frac{W_1 - W_2}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

El sobrenadante se decantó y se transfirió a una cápsula de aluminio previamente pesada, posteriormente se secó a 100 °C durante 4 horas y se pesó nuevamente (W_2). El ISA se calculó utilizando la ecuación 2:

$$\text{ISA} = \frac{W_2}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2)$$

Las pruebas se realizaron por triplicado tanto para el IAA como para el ISA.

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

La PVA se determinó gravimétricamente a 25 °C según la metodología descrita por Fitch-Vargas *et al.* (2016). Se utilizó cloruro de calcio granular como desecante. Se emplearon muestras de película con un espesor aproximado de 50 μm . Se registró el diámetro de los recipientes y se añadieron 15 g de

Tabla 1. Diseño experimental con los valores de las variables de proceso (%G y VT) y los resultados de las variables de respuesta evaluadas

Variables de proceso			Variables de respuesta				
Tratamiento	%G	VT	IAA	ISA	PVA	FR	PCO ₂
1	16.5	135	3.75	17.21	3.74E-11	10.83	8.86E-06
2	23.5	135	4.73	19.89	3.74E-11	8.22	6.03E-06
3	16.5	205	5.11	19.71	3.54E-11	9.73	7.76E-06
4	23.5	205	3.91	16.68	4.71E-11	6.69	2.06E-06
5	15	170	4.33	19.26	3.91E-11	14.66	1.05E-05
6	25	170	4.13	18.85	4.65E-11	8.66	5.85E-06
7	20	120	4.00	17.20	3.83E-11	7.94	6.27E-06
8	20	220	4.92	16.66	3.81E-11	7.59	4.48E-06
9	20	170	4.28	18.19	3.74E-11	14.35	2.72E-06
10	20	170	4.48	18.56	3.66E-11	15.23	3.95E-06
11	20	170	4.40	18.40	3.53E-11	15.08	3.39E-06
12	20	170	4.44	17.95	3.82E-11	14.71	3.526E-06
13	20	170	4.35	18.07	3.65E-11	14.59	3.15E-06

%G = Porcentaje de glicerol (%); VT = Velocidad de tornillo (rpm); IAA = Índice de absorción de agua (g gel/g muestra); ISA = Índice de solubilidad en agua (%); PVA = Permeabilidad al vapor de agua (g·m/Pa·s·m); FR = Fuerza de ruptura (N); PCO₂ = Permeabilidad al CO₂ (mL·cm/h·cm²·cmHg)

cloruro de calcio granular a cada uno. Las muestras de película se colocaron sobre el borde superior de cada recipiente, se sellaron con Parafilm®, y se registró el peso total.

Posteriormente, los recipientes con las películas montadas se colocaron en un desecador que contenía una solución saturada de cloruro de sodio, proporcionando una humedad relativa del 75 %. La ganancia de masa del cloruro de calcio se registró cada 12

horas durante 4 días, utilizando cinco réplicas. Con los datos obtenidos se construyó una gráfica de ganancia de peso en función del tiempo y de la masa, a partir de la cual se determinó la pendiente (Mp/t) (ASTM Estándar E96-95).

La PVA se determinó a partir del valor de la pendiente utilizando la ecuación 3:

$$PVA = \frac{(Mp)(E)}{(A)(t)(\Delta p)} \quad (3)$$

Donde: Mp: masa de humedad absorbida (g); E: espesor de la película (m); A: área de superficie expuesta de la película (m²); t: tiempo (s); Δp: diferencia de presión a través de la película (Pa). La prueba de la determinación de PVA fue realizada por triplicado.

FUERZA DE RUPTURA (FR)

La FR de las películas se evaluó siguiendo la metodología reportada por Calderón-Castro *et al.* (2018), utilizando un analizador universal de textura (INSTRON 3342, Norwood, MA, USA). Se registró la fuerza máxima requerida para romper las películas. Se analizaron veinte réplicas de cada muestra y los resultados se expresaron en newtons (N). La prueba fue realizada en 15 muestras y se reportó un promedio.

PERMEABILIDAD AL DIÓXIDO DE CARBONO (PCO₂)

Para determinar la permeabilidad al CO₂ se empleó el método reportado por Calderón-Castro (2019), utilizando cal sodada y cloruro de calcio como agentes desecantes, dispuestos en recipientes de vidrio que fueron sellados con las muestras de película y colocados en un desecador saturado con CO₂. Las muestras fueron pesadas cada 2 h durante 48 h, registrándose los valores de masa para construir una regresión lineal y obtener la pendiente. Ésta pendiente se utilizó para calcular la transmisión de CO₂ a través de la muestra de película dividiéndola entre el área expuesta. Finalmente, el valor de PCO₂ se determinó utilizando la ecuación 4:

$$PCO_2 = \frac{Tr}{p} \times E \quad (4)$$

Donde: PCO₂: permeabilidad al CO₂; Tr: transmisión de CO₂; p: presión del desecador (76 cm Hg); E: espesor medio de la película. La prueba de PCO₂ fue realizada por triplicado.

OPTIMIZACIÓN

La optimización de la formulación de la película comestible se llevó a cabo mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) utilizando el método numérico de deseabilidad. El objetivo fue determinar la mejor combinación de variables (%G y VT) para producir una película comestible a base de harina de almendra de mango con los valores más bajos posibles de IAA, ISA, PVA y PCO₂, junto con los valores más altos de FR.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE DATOS

Se aplicó un Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) con dos factores [porcentaje de glicerol (%G) = 15–25 %; velocidad de tornillo (VT) = 120–220 rpm]. Las variables de respuesta evaluadas fueron IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂. El objetivo fue obtener los valores más bajos posibles para IAA, ISA, PVA y PCO₂, maximizando al mismo tiempo FR.

Los datos experimentales de cada respuesta se sometieron a ANOVA y análisis de regresión lineal para obtener los modelos matemáticos y generar los gráficos de contorno y superficies de respuesta mediante el software Design-Expert versión 7.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta las diferentes combinaciones de variables de proceso para la producción de películas comestibles a partir de harina de almendra de mango, junto con los valores experimentales de las variables de respuesta obtenidos para cada combinación.

De manera similar, la Tabla 2 muestra el análisis de varianza y los modelos estadísticos para las respuestas IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂. Los datos revelaron un modelo de regresión significativo con valores de R² ajustado ≥ 0.8505, coeficiente de variación (CV) < 14.83 %, valores de p en la prueba F < 0.01 y sin falta de ajuste

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) y modelo estadístico de las variables evaluadas (IAA, ISA, PVA, FR, PCO₂) en películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango mediante el proceso de extrusión-moldeo (extrusion-casting)

Coefficiente	IAA	ISA	PVA	FR	PCO ₂
Intercepto					
β_0	4.37	18.23	3.8708x10 ⁻¹¹	14.79	3.348x10 ⁻⁶
Lineal					
β_1	-0.062 ^{NS}	-0.11 ^{NS}	2.766x10 ^{-12***}	-1.77***	-1.897x10 ^{-6***}
β_2	0.23***	-0.18**	9.299x10 ^{-13NS}	-0.39 ^{NS}	-9.493x10 ^{-7***}
Interacción					
$\beta_1\beta_2$	-0.55***	-1.43***	2.911x10 ^{-12***}	NS	NS
Cuadrático					
β_1^2	NS	0.51***	2.643x10 ^{-12***}	-1.78***	2.271x10 ^{-6***}
β_2^2	NS	-0.56***	NS	-3.72***	8.609x10 ^{-7**}
P_{modelo}	<0.0001	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0001
R^2	0.9140	0.9602	0.9003	0.9742	0.9381
R^2_{ajustada}	0.8853	0.9317	0.8505	0.9613	0.9071
CV(%)	0.44	2.51	3.74	5.85	14.83
Falta de ajuste	0.0927	0.3111	0.2087	0.0569	0.076

*Significativo (p = 0.05–0.10); **Significativo (p = 0.01–0.05); ***Significativo (p < 0.01); NS = No significativo. β_0 = Intercepto; Lineal: β_1 = Contenido de glicerol (%G), β_2 = Velocidad de tornillo (VT); Interacción: $\beta_1\beta_2$ = %G–VT; Cuadrático: β_1^2 = (%G)², β_2^2 = (VT)²

MODELOS DE PREDICCIÓN

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA)

La capacidad de absorción de agua se refiere a la cantidad de agua retenida por el almidón. Las propiedades de absorción de agua en películas comestibles a base de almidón son indeseables, ya que inducen cambios en las propiedades funcionales y estructurales del material (Calderón-Castro, 2019). La Figura 1A ilustra el efecto del %G y la VT sobre el IAA de las películas comestibles. En dicha figura, los valores más bajos de IAA se observaron con bajos %G combinados con bajas VT, así como con altos %G combinados con alta VT. Los valores oscilaron entre 3.75 y 5.11 %.

El modelo de regresión para el IAA de películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango fue (5):

$$IAA = +4.37 - 0.62 * \%G + 0.23 * VT - 0.55 * \%G * VT \quad (5)$$

El modelo de regresión explicó el 91.40 % de la variación total en los valores de IAA (p < 0.0001). Tanto el término lineal de VT como la interacción entre %G y VT (%G × VT) tuvieron un efecto significativo (p = 0.0008 y p < 0.0001, respectivamente) sobre el IAA de las películas comestibles. El modelo matemático no presentó falta de ajuste (p = 0.0927), obtuvo un R² mayor a 0.8 y un coeficiente de variación (CV) inferior al 10 %, lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

El glicerol es una molécula de bajo peso molecular y altamente higroscópica, lo que aumenta su efectividad como plastificante en comparación con otras moléculas como el sorbitol. En este

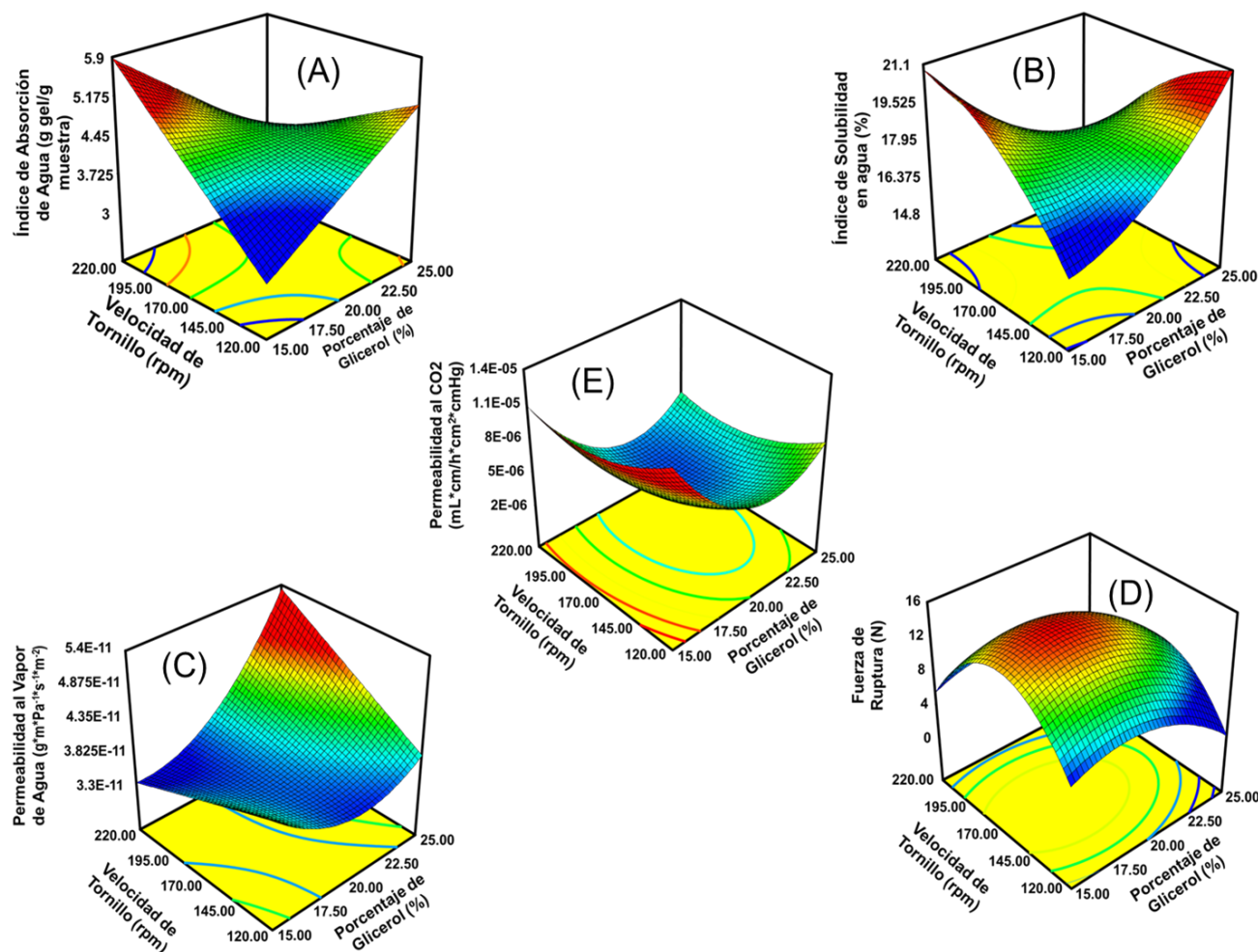


Figura 1. Gráficos de superficie de respuesta que muestran el efecto de los factores (%G y VT) sobre las variables de respuesta: (A) Índice de Absorción en Agua, (B) Índice de Solubilidad en Agua, (C) Permeabilidad al Vapor de Agua, (D) Fuerza de Ruptura y (E) Permeabilidad al CO₂ en películas comestibles elaboradas con harina de almendra de mango

estudio, se observó que incrementar el %G manteniendo una VT baja conllevó a valores más altos de IAA, al igual que mantener un %G bajo con una VT elevada. Este comportamiento puede atribuirse al esfuerzo mecánico y de corte ejercido por el tornillo del extrusor, que promueve la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, permitiendo la incorporación de agua al gránulo de almidón, favorecida por la afinidad del glicerol hacia el agua. No obstante, la zona de interés (valores bajos de IAA) se observó tanto con bajos valores de VT como de %G. Adicionalmente, altas concentraciones de glicerol actúan como lubricante, protegiendo al almidón de una degradación excesiva

por fuerzas de corte durante la extrusión (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA)

Se observó un efecto significativo de la interacción entre %G y VT (%G × VT) ($p < 0.0001$), así como de los términos cuadráticos de %G y VT ($p < 0.01$) sobre el ISA. El modelo de regresión para ISA fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (6):

$$ISA = +18.23 - 0.11 * \%G - 0.18 * VT - 1.43 * \%G * VT + 0.51 * \%G^2 - 0.56 * VT^2 \quad (6)$$

El modelo de regresión para el ISA de las películas comestibles explicó el 96.02% de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores obtenidos del ISA. La Figura 1B ilustra la relación entre el %G y la VT sobre el ISA de las películas comestibles. Se observó un comportamiento similar al encontrado para el IAA, con dos zonas de valores mínimos de ISA: una en bajo %G y baja VT, y otra en alto %G y alta VT. Los valores de ISA oscilaron entre 16.66 y 19.89 %. El modelo matemático para ISA no presentó falta de ajuste ($p = 0.3111$), con un R^2 ajustado de 0.9317 y un coeficiente de variación (CV) inferior al 10 % (CV = 1.53 %), lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

Se observa un efecto de interacción de la velocidad del tornillo con el contenido de glicerol; a bajos contenidos de glicerol se presentó un incremento del ISA al incrementar VT; sin embargo, a altos %G se observó una disminución del ISA al incrementar VT, un incremento en ISA en materiales extrudidos, elaborados a partir de almidón, se debe principalmente a un incremento en la modificación de la estructura del almidón provocada por procesos de gelatinización y/o dextrinización, lo cual en el presente trabajo se vio favorecido a altas VT y bajos %G, sin embargo, al incrementar el %G, suceden 2 cosas: primero un incremento en ISA debido a que el glicerol es soluble en agua, esto observado principalmente a bajos VT. Por otro lado, el exceso de glicerol no permite que haya una modificación del gránulo de almidón impidiendo ser gelatinizado disminuyendo así su solubilidad lo cual se ve favorecido al incrementar VT ya que esto reduce el tiempo de residencia y con ello la modificación del almidón (Wang et al., 2024).

La solubilidad en agua es un parámetro clave para materiales biodegradables elaborados a partir de biopolímeros sensibles al agua. Las aplicaciones potenciales de películas basadas en almidón pueden requerir insolubilidad en agua para mejorar la integridad del producto y la resistencia a la humedad en materiales de empaque biodegradables. El glicerol reduce las interacciones entre las moléculas del polímero e incrementa su solubilidad, otorgando a las cadenas poliméricas mayor afinidad por el agua. En este estudio, el aumento del %G condujo a

mayores valores de ISA, probablemente debido a la interacción del glicerol con la matriz polimérica, lo cual incrementa el espaciamiento entre cadenas y facilita la difusión de agua, elevando así los valores de ISA (Fitch-Vargas et al., 2016). Vázquez-Ontiveros (2021) reportó un incremento en la solubilidad con mayor contenido de glicerol en películas comestibles a base de almidón, atribuyendo este comportamiento a la naturaleza hidrofílica del glicerol y su interacción con el almidón. Saberi et al. (2016) señalaron que un mayor %G aumentó la solubilidad de películas comestibles elaboradas con almidón de chícharo y goma guar, debido a la disminución de la densidad de la red polimérica causada por la ruptura de puentes de hidrógeno.

El índice de solubilidad depende del origen del almidón y de la sustitución de grupos funcionales si el almidón es modificado (Basiak et al., 2017). Calderón-Castro et al. (2018) reportaron que mayores temperaturas de extrusión combinadas con bajo contenido de glicerol incrementaron la solubilidad de películas comestibles a base de almidón de maíz, observándose los valores más bajos de solubilidad con alto contenido de glicerol y bajas temperaturas de extrusión. Dichos autores atribuyeron el aumento de solubilidad a la gelatinización del almidón, lo cual interrumpe la estructura granular e incrementa la absorción y solubilidad; mientras que un alto contenido de glicerol actuó como lubricante, manteniendo la integridad de los gránulos y reduciendo la severidad del proceso. En el presente estudio se observó un efecto opuesto del contenido de glicerol: el ISA incrementó con mayor %G, pero cuando la VT también aumentó, el ISA disminuyó, probablemente debido al efecto lubricante y protector del glicerol frente al esfuerzo mecánico inducido por una alta VT.

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

El término lineal del %G tuvo un efecto significativo ($p < 0.01$) sobre la PVA de las películas comestibles. De manera similar, la interacción entre %G y VT ($\%G \times VT$), así como el término cuadrático del %G ($\%G^2$), mostraron efectos significativos ($p < 0.01$) sobre la PVA. El término lineal de VT no mostró un efecto

significativo ($p > 0.1$) sobre la PVA; sin embargo, se mantuvo en el modelo de regresión para mejorar el ajuste a los valores observados. El modelo de regresión para la PVA de las películas comestibles fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (7):

$$PVA = +3.708E - 011 + 2.766E - 012 * \%G + 9.299E - 013 * VT + 2.911E - 012 * \%G * VT + 2.643E - 012 * \%G^2 \quad (7)$$

El modelo de regresión para PVA de las películas comestibles explicó el 90.03 % de la variación total ($p = 0.0005$) en los valores de PVA. La Figura 1C muestra la relación entre el %G y la VT sobre la PVA de las películas comestibles. En dicha figura, los valores más bajos de PVA se observaron con un %G aproximadamente entre 17–22 %, independientemente de la VT dentro del intervalo evaluado (120–220 rpm). Los valores de PVA variaron de 3.53×10^{-11} a 4.71×10^{-11} g·m/Pa·s·m. El modelo matemático presentó un coeficiente de variación (CV) de 3.74 %, un R^2 ajustado de 0.8505 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.2087$), lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

La PVA mide la difusión de moléculas a través de la sección transversal de la película y proporciona una estimación de sus propiedades barrera. En productos alimentarios, la transferencia de humedad debe minimizarse para controlar la pérdida de agua hacia el entorno, de modo que valores bajos de PVA son deseables. Sin embargo, la PVA de las películas comestibles está influenciada por diversos factores, incluyendo la naturaleza del material formador de película, el tipo de plastificante, los aditivos y el proceso de elaboración de la película (Torres-León *et al.*, 2018). La Figura 1C muestra que un incremento en %G aumenta la PVA, comportamiento también reportado por Vázquez-Ontiveros (2021) y Calderón-Castro *et al.* (2018) en películas comestibles a base de almidón de maíz obtenidas por extrusión-moldeo, así como por Nawab *et al.* (2016) en películas elaboradas con almidón de semilla de mango. Este comportamiento puede explicarse debido a que el glicerol es una molécula de bajo peso molecular y altamente higroscópica, lo cual incrementa su

efectividad como plastificante en comparación con moléculas como el sorbitol. Por tanto, mayores contenidos de %G conducen a un incremento en el contenido de humedad de la película, y mediante el efecto plastificante, aumentan el volumen libre y la movilidad de las cadenas, reduciendo la rigidez y mejorando el movimiento molecular, permitiendo una mayor difusión de vapor de agua a través de la estructura de la película (Nawab *et al.*, 2016).

Por otro lado, en el presente estudio, los valores de PVA incrementaron al incrementar la VT cuando se utilizaron %G altos. Una velocidad de tornillo más alta mejora la interacción y la mezcla del almidón y el glicerol. Esto conduce a una matriz polimérica más homogénea y compacta, sin embargo, en el punto de mayor %G generó una plastificación excesiva provocando una red polimérica con espacios grandes y una gran cantidad de grupos [OH] expuestos lo cual provocó una mayor afinidad con el agua incrementando los valores de PVA. Mientras que a bajos %G y alta VT la PVA disminuyó pudiendo en este caso a que al presentar bajo %G este fue integrado de mejor manera y de forma homogénea en la matriz formando una red compacta entre el plastificante y los componentes de la película lo que hizo que hubiera menos espacios por donde pudiera permear el vapor de agua a través de la película (Huntrakul *et al.*, 2020).

FUERZA DE RUPTURA (FR)

El término lineal del %G tuvo un efecto significativo ($p < 0.0001$) sobre la FR de las películas comestibles. De manera similar, los términos cuadráticos de %G ($\%G^2$) y VT (VT^2) mostraron efectos significativos ($p < 0.01$) dentro del modelo. El término lineal de VT no presentó un efecto significativo ($p > 0.1$) sobre la FR; sin embargo, se mantuvo en el modelo matemático para mejorar el ajuste a los valores observados. El modelo de regresión para la FR de las películas comestibles elaboradas con harina de almendra de mango fue de tipo cuadrático y presentó las siguientes expresiones (8):

$$FR = +14.79 - 1.77 * \%G - 0.39 * VT - 1.78 * \%G^2 - 3.72 * VT^2 \quad (8)$$

El modelo de regresión para la FR de las películas comestibles explicó el 97.42 % de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores de FR. La Figura 1D ilustra la relación entre %G y VT sobre la FR de las películas comestibles. En dicha figura se observa que los valores más altos de FR se obtuvieron a bajos e intermedios contenidos de %G (15–21 %) y velocidades de tornillo intermedias (160–180 rpm). Los valores de FR oscilaron entre 6.69 y 15.23 N. Este modelo matemático se considera adecuado y reproducible, ya que presentó un coeficiente de variación (CV) de 5.85 %, un R^2 ajustado de 0.9613 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.0569$).

Fitch-Vargas *et al.* (2016) produjeron películas comestibles a base de almidón de maíz, variando la temperatura de extrusión, la proporción de plastificante (sorbitol:glicerol) y la velocidad de tornillo. Reportaron que la velocidad de tornillo no tuvo un efecto significativo sobre la FR; sin embargo, en el presente estudio la VT mostró un efecto significativo sobre los valores de FR. Esta diferencia podría atribuirse al intervalo de VT empleado, ya que la velocidad máxima utilizada en el estudio de Fitch-Vargas *et al.* (2016) fue menor que la mínima utilizada en el presente trabajo. Adicionalmente, las diferencias pueden deberse a la presencia de otros componentes en el material, ya que este estudio se realizó empleando harina integral de almendra de mango.

Calderón-Castro *et al.* (2018) prepararon películas comestibles a base de almidón de maíz y reportaron una disminución en la FR con el incremento del contenido de glicerol a una velocidad de tornillo intermedia de 170 rpm. Un comportamiento similar fue reportado por Farahnaky *et al.* (2013) para películas de almidón de trigo indicando que las películas se vuelven más frágiles a concentraciones elevadas de glicerol. En el presente estudio, la FR también disminuyó con el aumento de glicerol, probablemente debido al efecto plastificante del mismo sobre el almidón, ya que puede penetrar los gránulos de almidón y alterar los enlaces de hidrógeno internos bajo condiciones de alta temperatura, presión y cizalla, debido a su polaridad y reducido tamaño molecular (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

Al analizar el efecto de la VT sobre los valores de FR (Figura 1D) podemos observar que conforme se aumenta la VT también

aumenta el valor de FR; sin embargo, al llegar a VT altas la FR disminuye. Esto puede deberse a que, a mayor velocidad del tornillo, la energía de cizallamiento y la tasa de producción aumentan, pero el tiempo de residencia disminuye. Esto puede resultar en una menor gelatinización del almidón y una mezcla menos homogénea si el tiempo es insuficiente. Una mezcla heterogénea o una plastificación incompleta tienden a producir películas más frágiles, lo que se traduce en una menor fuerza de ruptura o resistencia a la tracción.

Una mayor velocidad de rotación del tornillo generalmente incrementa la fuerza de cizalla y la disipación de energía mecánica, lo que a su vez eleva la temperatura del material dentro del extrusor. Este aumento de temperatura y cizalla puede mejorar la gelatinización del almidón y la mezcla con el glicerol (plastificante), creando una matriz polimérica más homogénea y compacta. Como resultado, las películas pueden presentar una mayor fuerza de ruptura (resistencia a la tracción), ya que la estructura molecular está mejor interconectada. Sin embargo, velocidades excesivamente altas pueden degradar los componentes del material (especialmente proteínas y almidón) debido al exceso de calor y estrés mecánico, lo que podría llevar a una disminución de la fuerza de ruptura y otras propiedades mecánicas si la integridad de la cadena polimérica se ve comprometida. Por otro lado, velocidades de tornillo muy bajas pueden resultar en una mezcla incompleta, una gelatinización deficiente y una matriz heterogénea, lo que también afectaría negativamente a la fuerza de ruptura de la película final (Bangar *et al.*, 2021).

PERMEABILIDAD AL DIÓXIDO DE CARBONO (PCO_2)

Los términos lineales de %G y VT tuvieron efectos significativos ($p < 0.01$) sobre la PCO_2 de las películas comestibles. Asimismo, los términos cuadráticos de %G ($\%G^2$) y VT (VT^2) mostraron efectos significativos ($p < 0.0001$ y $p < 0.05$, respectivamente) sobre la PCO_2 . El modelo de regresión para la PCO_2 de las películas comestibles formuladas con harina de almendra de

mango fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (9):

$$PCO_2 = +3.348E - 006 - 1.897E - 006 * \%G - 9.493E - 007 * VT + 2.271E - 006 * \%G^2 + 8.609E007 * VT^2 \quad (9)$$

El modelo de regresión para la PCO_2 explicó el 93.81 % de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores de PCO_2 . La Figura 1E ilustra la relación entre %G y VT sobre la PCO_2 de las películas comestibles. En ella se observa que los valores más bajos de PCO_2 se presentan en un intervalo de %G aproximadamente entre 20–23 % y velocidades de tornillo intermedias a altas (160–220 rpm). Los valores de PCO_2 oscilaron entre 2.05×10^{-6} y 1.05×10^{-5} mL·cm/h·cm²·cmHg. El modelo matemático presentó un coeficiente de variación (CV) de 14.83 %, un R^2 ajustado de 0.9071 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.0761$). El valor de CV mayor al 10 % pudiera deberse a la metodología empleada y al número de muestra utilizada, así como a la naturaleza y la homogeneidad de los componentes de la película.

La naturaleza del polímero —como su estructura química, cristalinidad, longitud de cadena, densidad, peso molecular y grado de polimerización— son factores clave que afectan la difusión de gases. El desarrollo de películas biodegradables con permeabilidad selectiva a gases puede ser altamente prometedor para controlar el intercambio respiratorio y mejorar la conservación de alimentos frescos o mínimamente procesados susceptibles a la oxidación. La atmósfera modificada generada por el recubrimiento retiene físicamente CO_2 dentro del fruto o vegetal y sella parcialmente los poros, reduciendo la velocidad de intercambio y transferencia de gases (Calderón-Castro, 2019).

Calderón-Castro (2019) desarrolló películas comestibles basadas en almidón modificado mediante acetilación y succinatización, y reportó que el aumento en el contenido de glicerol en la formulación disminuyó la PCO_2 . Este efecto fue atribuido a que el glicerol incrementa el volumen libre dentro de la matriz polimérica al reducir las fuerzas intermoleculares, facilitando así la difusión del gas a través de la película, ya que la permeabilidad depende

en gran medida de la interacción entre el gas permeante y la matriz polimérica. En el presente estudio, los valores más bajos de PCO_2 se encontraron en valores intermedios de %G y VT.

OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN

El gráfico de deseabilidad global (D) (Figura 2) muestra los valores máximos predichos de D en la zona roja para cada respuesta (IAA, ISA, PVA, FR, PCO_2), de donde se seleccionó un valor óptimo ($D = 0.73$), correspondiente a las condiciones de %G y VT que resultaron en valores mínimos de IAA, ISA, PVA y PCO_2 , y valores máximos de FR. Los valores de deseabilidad individual para cada respuesta asociados con el D máximo seleccionado fueron: dIAA = 0.69, dISA = 0.59, dWVP = 0.90, dFR = 0.87, d PCO_2 = 0.67 (Figura 3). Las variables del proceso asociadas con la máxima deseabilidad global fueron: %G = 19 % y VT = 150 rpm. La deseabilidad global (D) obtenida en este estudio se encuentra dentro del rango aceptable ($0.6 < D < 0.8$), de acuerdo con De la Vara y Domínguez (2002).

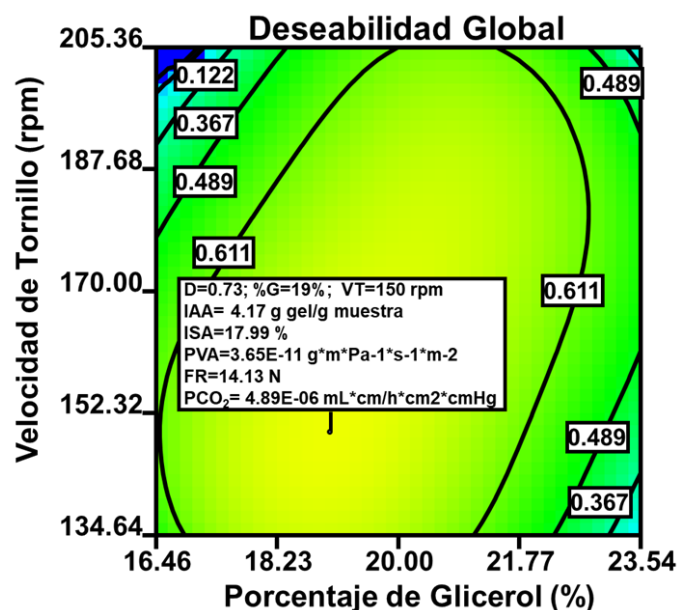


Figura 2. Gráfico de deseabilidad global ($D = 0.73$) para obtener la combinación óptima de las variables de procesamiento (%G = 19% / VT = 150 rpm) y los valores predichos para las variables de respuesta.

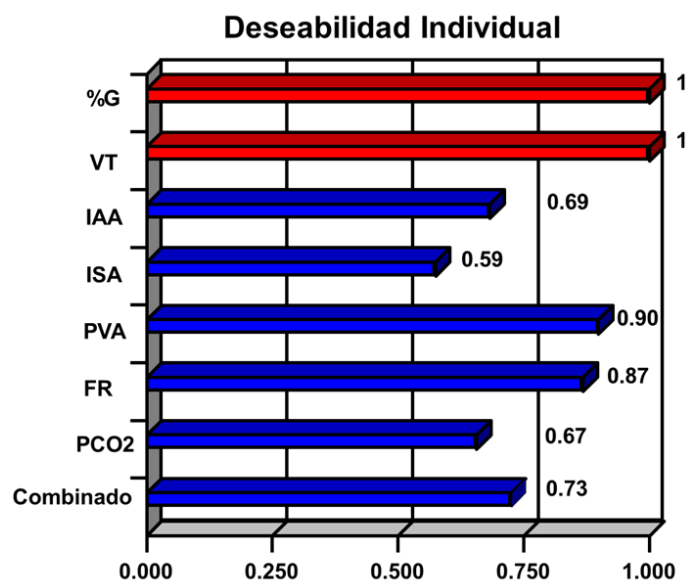


Figura 3. Valores de deseabilidad individual de las variables de respuesta IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂ para las películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango.

Los valores predichos, obtenidos de las variables de respuestas bajo las condiciones óptimas de %G y VT, calculados mediante los modelos de predicción para cada variable respuesta, fueron: IAA = 4.17 g gel/g muestra, ISA = 17.99 %, PVA = 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR = 14.13 N, PCO₂ = 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. Para validar los modelos empleados, la formulación de harina de almendra de mango se extruyó utilizando los valores óptimos de %G y VT determinados. Posteriormente, se prepararon y caracterizaron películas comestibles bajo estas condiciones óptimas para verificar los valores predichos. Los valores promedio obtenidos para las películas óptimas fueron: IAA = 4.15 g gel/g muestra, ISA = 17.82 %, PVA = 3.58×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR = 14.21 N, PCO₂ = 4.78×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg.

La comparación entre los valores experimentales y los predichos por los modelos matemáticos mostró que no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$). Por tanto, el modelo utilizado se confirmó experimentalmente como adecuado para determinar la concentración óptima de glicerol y la velocidad de tornillo en la producción de películas comestibles a base de harina de almendra de mango con buenas propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de barrera.

CONCLUSIONES

La almendra de mango es un material viable para la producción de películas y recubrimientos comestibles. La metodología de superficie de respuesta demostró ser una herramienta útil para obtener películas comestibles a base de harina de almendra de mango con buenas propiedades mecánicas y de barrera. Las películas producidas bajo condiciones óptimas podrían contribuir a mantener la calidad de los frutos y prolongar su vida útil, además de añadir valor a los subproductos derivados del mango. Sin embargo, es necesario realizar análisis adicionales para confirmar los beneficios de estas películas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la participación y el apoyo del IAI Javier Gutiérrez García en la elaboración y evaluación de las películas comestibles. Asimismo, se agradece a la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa por brindar las instalaciones necesarias para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Aguilar-Palazuelos, E., Fitch-Vargas, P. R., Delgado-Nieblas, C. I., López-Díaz, A., Gastélum-Ávila, A., Sánchez-Chilero, M. A., Limón-Valenzuela, V., Camacho-Hernández, I. L., Ruiz-Armenta, X. A., & Calderón-Castro, A. (2025). Edible films based on corn starch and gelatin obtained by the combination of extrusion and casting process: characterization and applications. *Food Biophysics*, 20, 2. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09891-1>
- Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V., & Rusu, A. V. (2021). Funcionalidad y aplicabilidad de las películas a base de almidón: un enfoque ecológico. *Foods*, 10 (9), 2181. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2017). Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98,

- 348–356.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.122>
- Borbolla-Jiménez, F. V., Peña-Coronado, S. I., Farah, S. J., Jiménez-Valdés, M. T., Pineda-Pérez, E., Romero-Montero, A., Del Prado-Audelo, M. L., Bernal-Chávez, S. A., Magaña, J. J., & Leyva-Gómez, G. (2023). Films for wound healing fabricated using a solvent casting technique. *Pharmaceutics*, 15(7), 1914. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071914>
- Calderón-Castro, A., Vega-García, M. O., Zazueta-Morales, J. J., Fitch-Vargas, P. R., Carrillo-López, A., Gutiérrez-Dorado, R., Limón-Valenzuela, V., & Aguilar-Palazuelos, E. (2018). Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 905-914. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2997-6>
- Calderón-Castro, A. (2019). Modificación química de almidón de maíz (*Zea mays* L.) por acetilación y succinación empleando el proceso de extrusión: Estudio del efecto de grado de sustitución, sobre las propiedades funcionales en películas comestibles. Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Calderón-Castro, A., Ahumada-Meza, J.A., Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Fitch-Vargas, P. R., Delgado-Nieblas, C. I., López-Díaz, A., Camacho-Hernández, I. L., Ruiz-Armenta, X. A., & Jacobo-Valenzuela, N. (2024). Desarrollo y optimización de películas comestibles de almidón de maíz incorporando aceite esencial de citronela y nanopartículas de calcio. *QUIBIOUAS Revista De Ciencias Químico Biológicas*, 2, 47-57. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/article/view/841>
- Chaparro-Acuña, S. P., Lara-Sandoval, A. E., Sandoval-Amador, A., Sosa-Saurique, S. J., Martínez-Zambrano, J. J., & González, J. H. (2015). Caracterización funcional de la almendra de las semillas de mango (*Mangifera indica* L.). *Ciencia en Desarrollo*, 6(1), 67-75. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v6n1/v6n1a09.pdf>
- De la Vara, S. R., & Domínguez, D. J. (2002). Métodos de superficie de respuesta; un estudio comparativo. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, 9(1), 47-65.
- Farahnaky, A., Saberi, B., & Majzoobi, M. (2013). Effect of glycerol on physical and mechanical properties of wheat starch edible films. *Journal of Texture Studies*, 44, 176–186. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12007>
- Fitch-Vargas, P. R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., Vega-García, M. O., Valdez-Morales, J.E., Martínez-Bustos, F., & Jacobo-Valenzuela, N. (2016). Physicochemical and microstructural characterization of corn starch edible films obtained by a combination of extrusion technology and casting technique. *Journal of Food Science*, 81(9), E2224-2232. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.13416>
- Gomez-Caturla, J., Ivorra-Martinez, J., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., Garcia-Garcia, D., Dominici, F., Puglia, D., & Torre, L. (2022). Improvement of the barrier and mechanical properties of environmentally friendly mango kernel flour/glycerol films by varying the particle size of mango kernel flour. *Industrial Crops & Products*, 188, 115668. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115668>
- Guzmán, L. E., Acevedo, D., Romero, L., & Estrada, J. (2015). Elaboración de una película comestible a base de colágeno incorporado con nisina como agente antimicrobiano. *Información Tecnológica*, 26(3), 17-24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300004>
- Huntrakul, K., Yoksan, R., Sane, A., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Effects of pea protein on properties of cassava starch edible films produced by blown-film extrusion for oil packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100480>

- Jeevahan, J., & Chandrasekaran, M. (2019). Nanoedible films for food packaging: a review. *Journal of Materials Science*, 54, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03742-y>
- Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., & Hasnain, A. (2016). Biodegradable film from mango kernel starch: Effect of plasticizers on physical, barrier, and mechanical properties. *Starch/Stärke*, 68, 919-928. <https://doi.org/10.1002/star.201500349>
- Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., Lufti, Z., & Hasnain, A. (2017). Mango kernel starch-gum composite films: Physical, mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 869-876. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.054>
- Ngobese, N. Z., Workneh, T. S., Alimi, B. A., & Tesfay, S. (2017). Nutrient composition and starch characteristics of eight European potato cultivars cultivated in South Africa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 55, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.11.002>
- Saberi, B., Thakur, R., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Optimization of physical and optical properties of biodegradable edible films based on pea starch and guar gum. *Industrial Crops and Products*, 86, 342-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.015>
- Sánchez-Chilero, M. A., Aguilar-Palazuelos, E., Gutiérrez-Dorado, R., Rodríguez-González, F.J., Gastélum-Ávila, A., Fitch-Vargas, P.R., Zazueta-Morales, J. J., Calderón-Castro, A., Camacho-Hernández, I. L., & Gómez-Favela, M. A. (2025). Optimization of cellulose extraction from mango seed tegument: a sustainable approach for biopolymer applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(24), 30963-30976. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06892-z>
- Silva, A. P. M., Oliveira, A. V., Pontes, S. M. A., Pereira, A. L. S., Souza-Filho, M. M., Rosa, M. F., & Azeredo, H. M. C. (2019). Mango kernel starch films as affected by starch nanocrystals and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 211, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.013>
- Solís-Rivera, S. I. (2016). Elaboración y caracterización de películas comestibles elaboradas con hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC). Tesis Licenciatura en Química de Alimentos. Universidad Autónoma del Estado de México, México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65172>
- Torres-León, C., Vicente, A. A., Flores-López, M. L., Rojas, R., Serna-Cock, L., Alvarez-Pérez, O. B., & Aguilar, C. N. (2018). Edible films and coating based on mango (var. Ataulfo) by-products to improve gas transfer rate of peach. *LWT-Food Science and Technology*, 97, 624-631. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.057>
- Vázquez-Ontiveros, M. E. (2021). Elaboración y caracterización de películas comestibles a base de almidón modificado por extrusión, adicionado con aceite esencial de orégano (*Origanum vulgare*) para el control de rancidez oxidativa en cacahuete (*Arachis hypogae*). Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Wang, K., Tan, C., Tao, H., Yuan, F., Guo, L., & Cui, B. (2024). Effect of different screw speeds on the structure and properties of starch straws. *Carbohydrate Polymers*, 328, 121701. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121701>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA