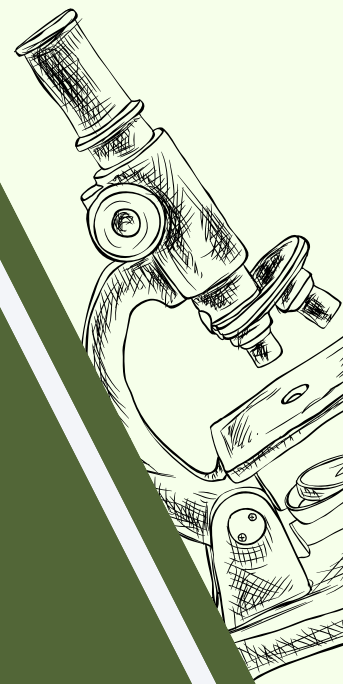
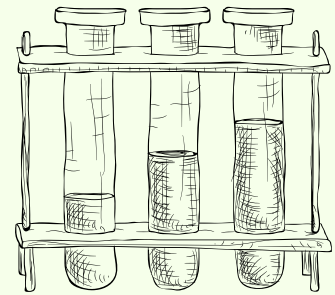
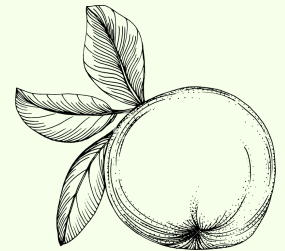
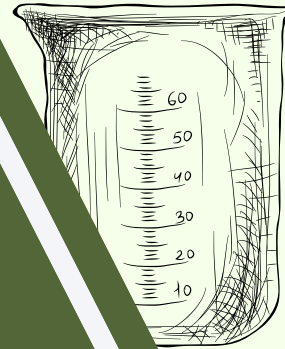
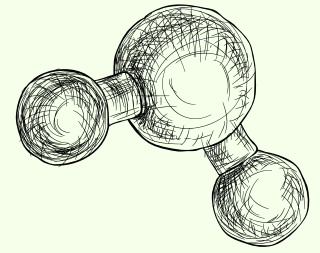
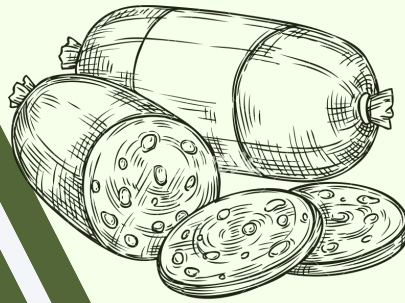
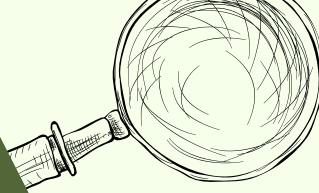


Vol. 11 No. 1

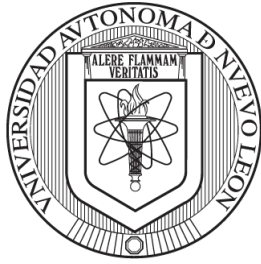
ISSN: 2448-7503

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos



Publicado en marzo de 2026

Publicación semestral



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®

**Una publicación de la
Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dr. En Med. Santos Guzmán López
Rector

Dr. Mario Alberto Garza Castillo
Secretario General

Dr. Jaime Arturo Castillo Elizondo
Secretario Académico

Mtro. Mario Emilio Gutiérrez Caballero
Abogado General de la UANL

Dr. José Javier Villarreal Álvarez Tostado
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas
Dirección de Editorial Universitaria

Dra. Diana Reséndez Pérez
Coordinadora de la Facultad de Ciencias Biológicas

Dr. Juan Gabriel Báez González
idcyta@uanl.mx
Editor responsable

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

Vol. 11 No. 1, marzo 2026, es una publicación semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Difusión vía red de cómputo <https://idcyta.uanl.mx/index.php/i>, idcyta@uanl.mx. Editor responsable: Dr. Juan Gabriel Báez González.

Número de reserva de derechos al uso exclusivo del título *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2024-011513431400-102, de fecha 15 de enero de 2024.

ISSN 2448-7503.

Fecha de la última modificación, marzo de 2026.

Las opiniones y contenidos expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Esta publicación en su integridad y los derechos contenidos en ella, están protegidos por la Ley Federal de Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial por lo que no podrá ser reproducida con fines comerciales sin autorización del editor. Asimismo, queda prohibido cualquier uso sobre esta publicación, sea total o parcialmente, con fines de entrenamiento de cualquier clase de inteligencia artificial, minería de datos y textos incluyendo, pero no limitado a la generación de publicación de obras derivadas o contenidos basados total o parcialmente en esta publicación y cualquiera de sus partes pertenecientes a la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas. Las violaciones a estas disposiciones constituyen una infracción en materia de comercio, derechos de autor y un delito.

Efecto del método de extracción y calidad de nuez pecanera en características fisicoquímicas y perfil lipídico del aceite para potencial aplicación clínica

Effect of the extraction method and pecan nut quality on the physicochemical characteristics and lipid profile of the oil for potential clinical application

Hilario Azuara A. S.¹, Castro García H.², de la Garza Hernández A. L. I.³, Ayala de la Cruz S.⁴, García Fajardo J. A.¹, Obregón Solís E. (†)¹, Morales Landa J. L.¹, Reyes Vázquez N. C.^{1*}

¹CIATEJ Noreste, Autopista Mty-Aeropuerto, Vía de la Innovación 404, Parque PIIT, 66628 Cdad. Apodaca, N.L.

*nreyes@ciatej.mx

² Facultad de Salud Pública y Nutrición. Centro de Investigación, Nutrición y Salud Pública.

Universidad Autónoma de Nuevo León., Dr. Eduardo Aguirre Pequeño 905, Mitras Centro, 64460 Monterrey, N.L., México.

³ Institute for Obesity Research, Tecnológico de Monterrey, Ave. Eugenio Garza Sada 2501, 64700, Monterrey, NL, Mexico

⁴ Departamento de Patología Clínica, Facultad de Medicina y Hospital Universitario "Dr. José E. González", Universidad Autónoma de Nuevo León., Av. Madero y Gonzalitos S/N, Mitras Centro, Monterrey, N.L., México

Resumen:

El sobrepeso está asociado con inflamación crónica de bajo grado y riesgo metabólico. En este contexto, el aceite de nuez pecanera constituye una alternativa nutracéutica por su contenido de ácidos grasos insaturados. Sin embargo, el proceso de obtención puede afectar su calidad y composición. Este estudio evaluó el efecto de dos métodos de extracción prensado en frío y utilizando hexano y tres tamaños Granzón (Gz) Granillo (Gr) y Pawnee (Pw) sobre el rendimiento, calidad fisicoquímica, color, inocuidad microbiológica y perfil de ácidos grasos de aceites obtenidos. Gz presentó el mayor rendimiento con hexano ($p < 0.05$) con 74.1%, mientras para prensado fue de 51%. En la calidad fisicoquímica para Pw, el índice de peroxidación y acidez fue de 2.3 meq O₂/kg, y 0.45 mg KOH/g; 4.6 meq O₂/kg y 0.91 mg KOH/g para el primero y segundo respectivamente. También mostró mayor luminosidad con 6.3 y tono verdoso con -0.8. Ambos métodos produjeron aceites con perfiles ricos en ácidos grasos insaturados superiores al 80%, con oleico, linoleico y linolénico de hasta 65.05, 35.85 y 1.98% respectivamente mediante prensado, sin crecimiento microbiano. Por lo anterior, el prensado favorece la calidad fisicoquímica, inocuidad y el potencial nutracéutico del aceite para aplicaciones clínicas.

Palabras clave: *aceite de nuez, nutracéutico, prensado en frío, ácidos grasos, intervención clínica.*

Abstract:

Overweight is associated with chronic low-grade inflammation and metabolic risk. In this context, pecan nut oil constitutes a nutraceutical alternative due to its unsaturated fatty acid content. However, the extraction process can affect its quality and composition. This study evaluated the effect of two extraction methods: cold pressing and hexane, and three sizes: Granzón (Gz), Granillo (Gr), and Pawnee (Pw), on the yield, physicochemical quality, color, microbiological safety, and fatty acid profile of the oils obtained. Gz presented the highest yield with hexane ($p < 0.05$) with 74.1%, while for pressed it was 51%. In the physicochemical quality for Pw, the peroxidation and acidity index were 2.3 meq O₂/kg, and 0.45 mg KOH/g, 4.6 meq O₂/kg and 0.91 mg KOH/g for the first and second, respectively. It also showed greater luminosity (6.3) and a greenish hue (-0.8). Both methods produced oils with profiles rich in unsaturated fatty acids exceeding 80%, with oleic, linoleic, and linolenic acids of up to 65.05, 35.85,

and 1.98%, respectively, through pressing without microbial growth. Therefore, pressing enhances the physicochemical quality, safety, and nutraceutical potential of the oil for clinical applications.

Keywords: *pecan nut oil, nutraceutical, cold pressing, fatty acids, clinical intervention.*

Introducción

La nuez pecanera [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch], originaria de América del Norte y cultivada ampliamente en regiones de clima templado, ha cobrado importancia en la industria alimentaria debido a su perfil lipídico y contenido de compuestos bioactivos. Entre sus principales componentes destacan los ácidos grasos monoinsaturados como el oleico, así como los poliinsaturados linoleico y α -linolénico, los cuales han sido asociados con la modulación positiva del perfil lipídico y la prevención de enfermedades cardiovasculares (Rajaram et al., 2001; Hudthagosol et al., 2011). Adicionalmente, las nueces pecaneras son ricas en compuestos fenólicos, tocoferoles y fitoesteroles que actúan como antioxidantes naturales. Estos compuestos han demostrado efectos antiinflamatorios, hipolipemiantes y antitrombóticos, posicionando a este fruto como un alimento funcional de alto valor nutritivo (de la Rosa et al., 2011).

A pesar de los beneficios potenciales antes descritos, la obtención de aceite a partir de la nuez pecanera representa un reto tecnológico, ya que el método de extracción puede alterar su composición y calidad. Entre los métodos más utilizados se encuentran la extracción con solventes orgánicos, como el hexano, y el prensado en frío. El primero es eficiente en términos de rendimiento, pero puede dejar residuos tóxicos, alterar la estabilidad oxidativa y reducir la cantidad de compuestos bioactivos (Moyano et al., 2008). Por otro lado, el prensado en frío se ha promovido como una alternativa más segura y ecológica, preservando mejor los ácidos grasos esenciales, antioxidantes y micronutrientes sensibles al calor; sin embargo, dicha eficiencia se ve limitada por la estructura de la matriz oleaginosa. En este contexto, el uso de un precalentamiento del equipo a 50 °C o menor, previo al prensado, es necesario ya que favorece la liberación del aceite y mejorar rendimiento de extracción, sin comprometer la calidad del producto final (Çakaloğlu et al., 2018). No obstante, aún persisten retos importantes en la investigación respecto a estudios comparativos exhaustivos entre ambos métodos, especialmente con nuez pecanera, ya que la mayoría de los trabajos se enfocan parámetros fisicoquímicos y no consideran de manera integral variables como calidad microbiológica, estabilidad oxidativa, rendimiento y perfil completo de ácidos grasos.

Cabe destacar que algunas investigaciones han mostrado que el consumo de nuez pecanera y otros frutos secos ejercen beneficios en la regulación de parámetros metabólicos e inflamatorios. En donde, la incorporación de nuez pecanera en la dieta se ha asociado con disminuciones en colesterol total y LDL, junto con incrementos en colesterol HDL, lo que contribuye a un perfil cardioprotector (Rajaram et al., 2001; McKay et al., 2018). Estos resultados respaldan el potencial de los compuestos bioactivos presentes en la nuez pecanera y sus aceites como aliados en el manejo dietético de procesos inflamatorios de bajo grado relacionados con sobrepeso, obesidad, resistencia a la insulina y enfermedades cardiovasculares.

En este contexto, el presente estudio plantea el objetivo de comparar dos métodos de extracción de aceite de nuez pecanera mediante prensado en frío y extracción con solvente (hexano), y evaluar su efecto sobre el rendimiento, las propiedades fisicoquímicas, la calidad microbiológica y el perfil de ácidos grasos del aceite, utilizando tres tamaños distintos de nuez pecanera. La finalidad es determinar cuál método para extracción de aceite resulta más adecuado para conservar mejores rendimientos, calidad fisicoquímica que preserve la calidad nutricional del aceite, con el fin de evaluar su potencial uso nutracéutico o clínico.

Materiales y métodos

Materia prima

Se adquirieron 3 lotes de 5 kilos cada uno, de nuez pecanera cosecha 2023 con distintas calidades según su tamaño (**Fig. 1**): Gz: Granzón, Gr: Granillo y Pw: Pawnee con $4.26\text{mm} \pm 1.01$, $8.03\text{mm} \pm 2.18$ y $32.06\text{mm} \pm 2.89$ respectivamente. Los dos primeros variedad criolla se adquirieron directamente de la huerta “Los corcovados” en Rayones, Nuevo León, el tercer lote variedad Pawnee se adquirió de la huerta “Santa María” de Zaragoza, Coahuila.

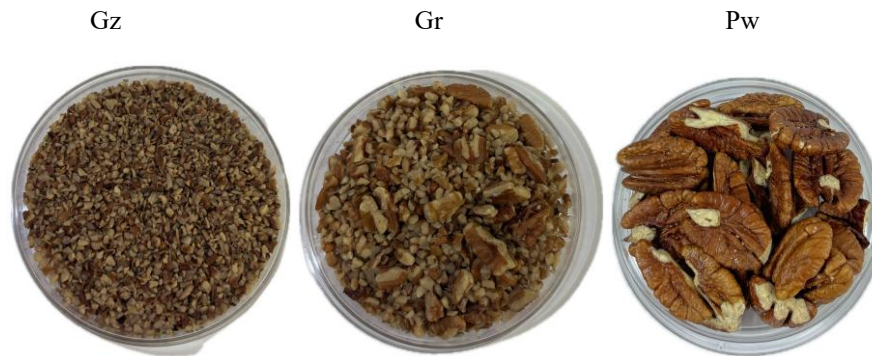


Fig. 1. Muestras con distintas calidades (Gz: granzón, Gr: granillo y Pw: Pawnee) de la nuez pecanera estudiada

Métodos de extracción

Se emplearon dos métodos de extracción para obtener el aceite de nuez pecanera (**Fig. 2A**): mediante prensado en frío y con solvente. En la primera se procesaron muestras de 300 gramos de nuez picada por sextuplicado y el aceite fue extraído en una prensa de tornillo tipo Speller para la cual se realizó un precalentamiento de $40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la velocidad de rotación fue de 50 rpm.

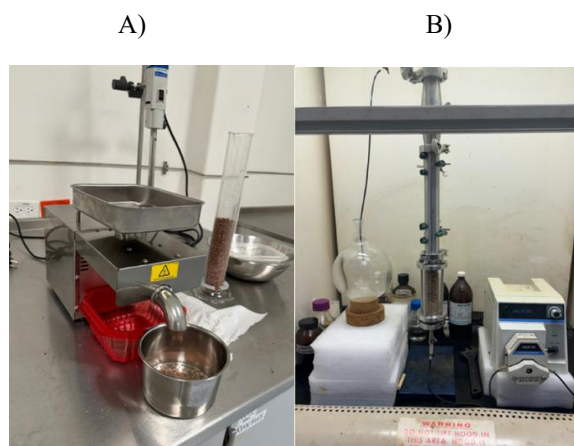


Fig. 2. Aspecto de los procesos de extracción de aceite **A)** Sistema de extracción por prensado en frío con prensa de tornillo tipo Speller. **B)** Sistema de extracción por solvente utilizando hexano conectada a una bomba peristáltica para el control del flujo (10 mL/min).

Para el caso de la extracción con solvente (**Fig. 2B**), también se procesaron por sextuplicado muestras de 300 gramos de nuez molida en una columna de vidrio de flujo descendente a través de la cual se hizo pasar hexano con un caudal constante de 10 mL/min, utilizando una bomba peristáltica para mantener la velocidad de flujo

Caracterización fisicoquímica y color

Los parámetros fisicoquímicos fueron determinados mediante métodos oficiales de la Association of Official Analytical Chemist (AOAC). La acidez libre se cuantificó mediante el método de titulación con NaOH (AOAC 940.28). El índice de peróxidos mediante valoración yodométrica (AOAC 965.33). El índice de saponificación por hidrólisis alcalina (AOAC 920.160) y el índice de refracción con refractómetro digital calibrado a 40°C (AOAC 921.08). Estas determinaciones permitieron evaluar la estabilidad oxidativa, el grado de hidrólisis lipídica y la calidad global de aceites obtenidos.

La caracterización colorimétrica del aceite se realizó utilizando un espectrofotómetro ColorFlex EZ (HunterLab), operando bajo el sistema CIELAB, el cual proporciona los valores de L* (luminosidad), a* (rojo-verde) y b* (amarillo-azul). Las muestras se midieron en cubetas de vidrio transparente, en condiciones controladas de iluminación y temperatura.

Caracterización microbiológica

La evaluación microbiológica del aceite se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos por la normativa sanitaria mexicana. El recuento de bacterias aerobias mesófilas se realizó conforme a la NOM-092-SSA1-1994, la determinación de coliformes totales según la NOM-114-SSA1-1994, y el análisis de hongos y levaduras de acuerdo con la NOM-111-SSA1-1994. Estas metodologías permitieron caracterizar el perfil microbiológico del aceite extraído mediante los diferentes métodos evaluados, con el fin de verificar su inocuidad y calidad microbiológica.

Perfil de ácidos grasos

El perfil de ácidos grasos fue determinado por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), según el método de (Jarret et al., 2013) con algunas modificaciones, previamente se realizó la conversión a ésteres metílicos mediante metilación alcalina. Se utilizó una columna capilar HP-88 (60 m × 0.25 mm × 0.20 μm), diseñada para la separación eficiente de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. La cuantificación se realizó con base en áreas relativas, utilizando estándares externos certificados.

En todos los experimentos se realizaron tres réplicas, y las determinaciones analíticas se efectuaron por triplicado, con excepción del análisis de color instrumental, el cual se llevó a cabo por quintuplicado.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos en cada uno de los diseños experimentales fueron procesados estadísticamente realizando análisis de varianza y comparación de medias por el método Fisher, con ayuda del programa de computación STATGRAPHICS 18 versión 18.1.13

Resultados

Rendimientos de extracción y caracterización fisicoquímica

El rendimiento de extracción es un parámetro clave en la industria alimentaria, ya que influye directamente en la viabilidad económica del proceso. En los procesos de obtención de aceites, depende tanto del método de extracción como de la variedad del fruto, su contenido lipídico y las condiciones de operación (Domínguez et al., 2019). Generalmente, los métodos mecánicos como el prensado en frío son más seguros desde el punto de vista toxicológico y conservan mejor los compuestos bioactivos, pero sacrifican eficiencia extractiva frente a métodos con disolventes orgánicos como el hexano, que son más agresivos y penetrantes (Moyano et al., 2008).

En la **Tabla 1**, se observó que, la extracción con solvente produjo rendimientos significativamente mayores ($p < 0.05$) en comparación con el prensado en frío para los tres tamaños evaluados, en donde Gr mostró el mayor rendimiento con 74.1 %, seguida por Gz y Pw con 68.81% y 63.66% respectivamente; en contraste, con el prensado en frío produjo rendimientos menores con 51.81, 49.73 y 45.15 % para Gr, Gz y Pw respectivamente; sin embargo, Gz también obtuvo el mayor rendimiento con relación a los otros dos tamaños evaluados.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en revisiones comparativas sobre métodos de extracción de aceites vegetales, donde se ha señalado que la extracción con solventes suele proporcionar mayores rendimientos en comparación con el prensado mecánico en frío; sin embargo, este último permite una mejor conservación de compuestos bioactivos y cualidades nutricionales del aceite. Este comportamiento refleja un compromiso inherente entre eficiencia extractiva y preservación de la calidad, el cual debe considerarse en función del uso final del aceite. (Lavenburg et al., 2021).

Estos resultados concuerdan con lo reportado en revisiones comparativas sobre métodos de extracción de aceites vegetales, donde se ha señalado que la extracción con solventes suele proporcionar **mayores rendimientos** en comparación con el prensado mecánico en frío; sin embargo, este último permite una **mejor conservación de compuestos bioactivos y cualidades nutricionales** del aceite. Este

comportamiento refleja un compromiso inherente entre eficiencia extractiva y preservación de la calidad, el cual debe considerarse en función del uso final del aceite (Lavenburg, 2021).

Tabla 1. Rendimientos y parámetros fisicoquímicos del aceite de nuez pecanera extraído mediante prensado en frío y con solvente para tres tamaños de nuez pecanera (Gz, Gr y Pw)

Tipo de extracción	Tamaño	Rendimiento (%)	Índice de peroxidación (meq O ₂ /kg aceite)	Índice de acidez (mg KOH/g)	Índice de refracción (%)	Saponificación (meq O ₂ /kg aceite)
Prensado	Gz	49.73±0.95 ^{AB}	3.18±0.25 ^C	2.1±0.10 ^C	1.40±0.07 ^A	171.37±14.85 ^A
	Gr	51.81±1.30 ^{AB}	2.6±0.29 ^B	1.11±0.04 ^B	1.35±0.03 ^A	179.09±4.10 ^{AB}
	Pw	45.15±0.85 ^A	1.32±0.19 ^A	0.41±0.04 ^A	1.46±0.00 ^B	186.42±6.61 ^B
Solvente	Gz	68.81±1.25 ^a	7.4±0.40 ^c	3.27±0.03 ^c	1.46±0.00 ^b	176.13±14.13 ^a
	Gr	74.1±1.60 ^b	4.67±0.32 ^b	1.63±0.14 ^b	1.46±0.00 ^a	195.39±7.43 ^b
	Pw	63.66±1.10 ^c	3.3±0.27 ^a	0.76±0.08 ^a	1.46±0.00 ^{ab}	179.48±11.95 ^a

Letras mayúsculas y minúsculas en cada columna para cada parámetro representan diferencias significativas ($p < 0.05$) para extracción con prensado y solvente respectivamente.

Por lo que, los rendimientos mayores obtenidos pueden estar relacionados con la capacidad del disolvente para solubilizar lípidos atrapados en estructuras celulares profundas, lo que es difícil de lograr con presión mecánica, especialmente cuando no se aplican procesos de ruptura celular o desintegración térmica previos. Asimismo, el menor tamaño de Gr aumentó la superficie de contacto particularmente en presencia del solvente, y favoreció también la extracción mediante prensado. Con base a los resultados anteriores, indican que tanto el método de extracción como el tamaño influyen de manera significativa en el rendimiento de extracción del aceite de nuez.

La evaluación fisicoquímica del aceite es fundamental para determinar su estabilidad, pureza y aptitud para consumo humano o aplicación funcional. De acuerdo con el Codex Alimentarius (2019), parámetros como los índices de acidez, peroxidación, saponificación y refracción son esenciales para establecer criterios de inocuidad y calidad en aceites vegetales. En este sentido, Firestone (2009) destaca que dichos indicadores permiten estimar tanto el grado de hidrólisis y oxidación lipídica, así como la estructura química predominante en la muestra, mientras que Domínguez et al. (2019) señalan su relevancia en la evaluación de la estabilidad oxidativa y vida de anaquel de aceites. Por otro lado, Moyano et al. (2008) resaltan que la combinación de estos índices también refleja la influencia del procesamiento y de los métodos de extracción en la composición química predominante.

En la **Tabla 1** se muestra el efecto de tipo de extracción y tamaño sobre los parámetros fisicoquímicos en el aceite extraído. El índice de acidez, indicador del contenido de ácidos grasos libres, fue consistentemente menor en los aceites obtenidos mediante prensado en frío. Pw presentó el valor más bajo con 0.41 mg KOH/g, seguida por Gr y Gz con 1.11 y 2.10 mg KOH/g respectivamente. En comparación, los aceites extraídos con hexano mostraron niveles más elevados: 0.76, 1.63 y 3.27 mg KOH/g para Pw, Gr y Gz respectivamente. Estos resultados reflejan que el prensado en frío probablemente induce mejor hidrólisis de triglicéridos, posiblemente por la ausencia de solventes.

En cuanto al índice de peróxidos, que constituye uno de los parámetros más relevantes para evaluar la frescura y calidad oxidativa de aceites, ya que cuantifica los hidroperóxidos formados durante la oxidación primaria de lípidos, en donde, los valores bajos indican un aceite fresco y estable, mientras que valores elevados reflejan un mayor grado de deterioro, con riesgo de formación de compuestos secundarios (aldehídos, cetonas) responsables de olores y sabores rancios, así como la pérdida de valor nutricional. Diversos factores influyen en la peroxidación, entre ellos, el tamaño de partícula, la exposición al oxígeno durante el procesamiento, el método de extracción y el contenido de antioxidantes naturales como tocoferoles y compuestos fenólicos. De acuerdo con el Codex Alimentarius (2019), los aceites comestibles deben presentar un IP (índice de peroxidación) ≤ 10 meq O₂/kg para considerarse aptos, criterio que se cumplió en los aceites prensados en frío de este estudio (**Tabla 1**), (1.32-3.18 meq O₂/kg), mientras que los obtenidos con hexano alcanzaron valores más elevados (hasta 7.4 meq O₂/kg). Este comportamiento coincide con lo descrito en la literatura, donde se ha documentado que los métodos mecánicos preservan mejor la estabilidad oxidativa que la extracción con solventes (Shahidi & Zhong, 2010; Domínguez et al., 2019)

Según el Codex Alimentarius (2019), el índice de refracción (IR) constituye un criterio clave de calidad en aceites, ya que se asocia con su densidad óptica y la proporción de ácidos grasos insaturados y pureza del producto. Se establecen rangos aceptables de IR para aceites vegetales comestibles, los cuales sirven como referencia para identificar adulteraciones o mezclas con aceite de distinto origen, además de detectar posibles alteraciones estructurales derivadas de procesos oxidativos o de refinación. De acuerdo con Firestone (2009), este parámetro permite validar la autenticidad del aceite y asegurar que conserve las propiedades fisicoquímicas esenciales; mientras que Shahidi y Zhong (2010) destacan su utilidad como indicador indirecto de estabilidad, especialmente cuando se relaciona con la presencia de ácidos grasos insaturados. En este estudio, los valores oscilaron entre 1.35 y 1.46 (**Tabla 1**), dentro del rango aceptable para aceites vegetales comestibles (Codex Alimentarius, 2019). Aunque no se detectaron diferencias significativas entre métodos ni tamaños, los aceites obtenidos por prensado en frío mostraron menor variabilidad, lo que sugiere una composición homogénea. Este comportamiento, junto con los resultados de estabilidad oxidativa, respalda que el prensado en frío favorece tanto la conservación como la autenticidad del aceite.

Por su parte, el índice de saponificación (IS), empleado para estimar la longitud promedio de las cadenas de ácidos grasos en un aceite, presentó valores de 171 a 195 mg KOH/g, rango consistente con lo reportado para aceites vegetales comestibles (Chowdhury et al., 2007; Nehdi et al., 2010). En este estudio, los aceites extraídos con hexano mostraron valores más elevados (**Tabla 1**), particularmente Gr, lo que sugiere una mayor proporción de ácidos grasos de cadena corta o media, probablemente debido a la capacidad del solvente para solubilizar fracciones lipídicas más ligeras. En contraste, los valores ligeramente menores observados en los aceites obtenidos por prensado en frío podrían estar relacionados con una mejor conservación de triglicéridos de cadena larga, los cuales aportan mayor estabilidad térmica y funcionalidad nutricional al producto final. Aunque este parámetro es ampliamente utilizado en la industria cosmética y jabonera, en el ámbito alimentario actúa como indicador indirecto de la composición estructural del aceite, y puede vincularse con su calidad y perfil funcional (Kyari, 2008; Akinola et al., 2010; Nehdi, 2010).

Estos hallazgos coinciden con revisiones recientes que indican que los métodos de extracción mecánicos, como el prensado en frío, tienden a preservar en mayor medida los compuestos antioxidantes naturales, lo cual se asocia con una mejor estabilidad oxidativa del aceite (Lavenburg et al., 2021). Por otra parte, el índice de refracción, además de reflejar la proporción de ácidos grasos insaturados, ha sido propuesto como un parámetro útil para detectar adulteración con aceites de menor costo, ya que desviaciones fuera del rango normativo pueden indicar mezclas o degradación (Moyano et al., 2008).

En este contexto, la estabilidad observada en los valores de IR (**Tabla 1**) en aceites prensados de nuez pecanera respalda su autenticidad y homogeneidad composicional. Finalmente, los valores de saponificación obtenidos concuerdan con lo descrito para aceite de nuez pecanera en estudios que reportan parámetros de calidad y un perfil lipídico dominado por ácidos grasos insaturados, con predominio del ácido oleico (Polmann et al., 2019).

Color

El color del aceite no solo constituye un atributo sensorial relevante para la aceptación del consumidor, sino que también refleja su composición en compuestos bioactivos y el grado de exposición a condiciones que producen su oxidación al que ha sido sometido.

El color de los aceites presentó variaciones con relación al método de extracción y tamaño de la nuez, como se muestra en la **Fig. 3**. En cuanto al parámetro L^* , los aceites obtenidos mediante prensado en frío mostraron una mayor luminosidad ($p < 0.05$) con relación a los extraídos con solvente, destacando el aceite Pw obtenido por prensado, con un valor de $L^* = 6.7$, seguido por Gz y Gr, con 5.8 y 5.2, respectivamente. Por el contrario, los valores más bajos se registraron en los aceites extraídos con hexano, siendo el menor correspondiente a Gr ($L^* = 4.4$). Estas diferencias indican que el prensado en frío, al evitar el uso de químicos y temperaturas agresivas, podrían favorecer una mayor luminosidad del aceite, posiblemente asociada a una menor degradación oxidativa de pigmentos y a la ausencia de residuos del proceso de extracción, como ha sido descrito para aceites obtenidos mediante procesos mecánicos (Moyano et al., 2008; Grajzer et al., 2020).

En cuanto al parámetro a^* , asociado a tonos rojizos o verdosos. los aceites prensados presentaron tonos verdosos, especialmente en Pw con -0.9 . Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de clorofilas intactas, es decir, pigmentos verdes originales (clorofila a y b) que, de acuerdo con Mínguez-Mosquera (1991), no han sufrido degradación estructural y contribuyen tanto al matiz verde característico como a cierta actividad antioxidante en aceites vegetales. En contraste, los aceites extraídos con hexano tendieron hacia tonalidades rojizas, alcanzando un valor de $a^* = 1.1$ en Gz, que, según lo señalado por Psomiadou & Tsimidou (2001), puede estar asociado a la degradación de pigmentos verdes o a la formación de compuestos oxidados que generan el viraje hacia tonos rojos.

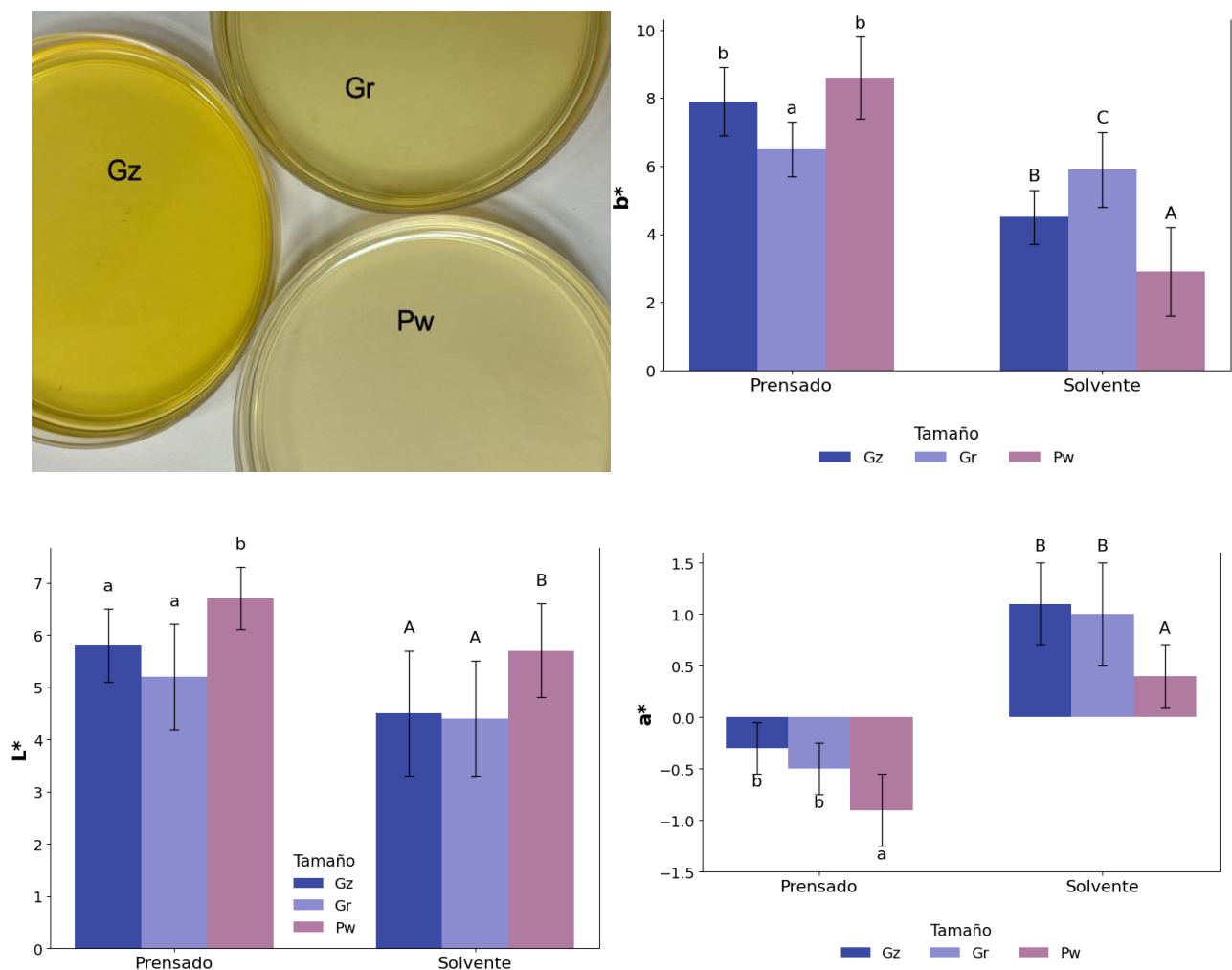


Fig. 3. Parámetros de color instrumental (L^* , a^* , b^*) del aceite de nuez obtenido con diferentes métodos de extracción y distintos tamaños, y aspecto de muestras de aceite de nuez obtenido por prensado para los tres tamaños Gz, Gr y Pw. Donde L^* (brillo o luminosidad; 0 = negro, 100 = blanco), a^* ($-a^*$ = verde, $+a^*$ = rojo) y b^* ($-b^*$ = azul, $+b^*$ = amarillo) respectivamente. Letras diferentes minúsculas o mayúsculas entre barras indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) para extracción por prensado y solvente respectivamente.

Respecto al parámetro b^* , que refleja la intensidad de los tonos amarillos, los valores más altos se observaron en los aceites prensados, particularmente en Pw con 8.6, mientras que los valores más bajos correspondieron a la misma variedad extraída con hexano ($b^* = 2.9$). Este comportamiento podría deberse a la mayor preservación de carotenoides como β -caroteno, luteína y zeaxantina en el prensado, compuestos que son sensibles a la degradación térmica y oxidativa. De acuerdo con Schmidt & Pokorny (2005), el método de extracción influye de manera directa en la estabilidad de los pigmentos carotenoides, de modo que procesos más suaves como el prensado en frío favorecen su conservación. Igualmente, Britton et al. (2008) señalan que la exposición a solventes y a temperaturas elevadas acelera la degradación de carotenoides, lo que traduce en una disminución de la intensidad del color amarillo característico de estos pigmentos. De forma complementaria, se ha documentado que la retención de carotenoides no solo contribuye al color del aceite, sino también a su capacidad antioxidante, ya que estos compuestos participan en la protección frente a la peroxidación lipídica (Kiokias et al., 2018). En este sentido, los valores más altos de b^* observados en los aceites obtenidos por prensado en frío pueden interpretarse como un

indicador de una mejor conservación de compuestos bioactivos y, en consecuencia, de un mayor potencial nutraceutico.

Los valores de L*, a* y b* reflejaron cambios de color en los aceites obtenidos por ambos métodos; en el caso de los aceites prensados, estos cambios parecen estar asociados a la conservación de pigmentos naturales y a la menor formación de compuestos de oxidación. Diversos estudios han vinculado estos parámetros con la presencia de clorofilas, feofitinas, tocoferoles y carotenoides, todos ellos sensibles durante el procesamiento y determinantes del color del aceite. Por ejemplo, Strati et al (2019) describen como las características cromáticas de los aceites prensados en frío capturan la presencia de pigmentos intactos, mientras que Suri et al. (2023) demostraron que los valores L*, a* y b* varían de acuerdo con el contenido de clorofilas y carotenoides, constituyendo indicadores de la calidad del aceite. De forma complementaria, se ha reportado que la degradación oxidativa conlleva a modificaciones en el color del aceite, asociadas a la formación de productos que alteran la intensidad de estos parámetros cromáticos (Choe & Min, 2006). Por lo anterior, el método de prensado favoreció una mayor luminosidad y la presencia de tonalidades verdosas en el aceite, lo que podría estar relacionado con la preservación de pigmentos bioactivos y, en consecuencia, con un mayor potencial nutraceutico.

Caracterización microbiológica

Los resultados de los parámetros microbiológicos indicaron que ninguno de los aceites analizados, independientemente del tamaño de nuez y el método de extracción, presentó crecimiento microbiano detectable en cuanto a coliformes totales, mesófilos aerobios y hongos y levaduras. Todas las muestras se mantuvieron por debajo de los límites de detección (<10 UFC/g) para los tres grupos microbiológicos evaluados. Este hallazgo indica que las condiciones de procesamiento, manejo y extracción fueron adecuadas para preservar la inocuidad del producto final.

Tabla 2. Caracterización microbiológica del aceite de nuez pecanera

Tipo de extracción	Tamaño	Parámetros microbiológicos (UFC/g)		
		CT	MA	HyL
Solvente	Gz	<10	<10	<10
	Gr	<10	<10	<10
	Pw	<10	<10	<10
Prensado	Gz	<10	<10	<10
	Gr	<10	<10	<10
	Pw	<10	<10	<10

*CT: Coliformes totales, MA: Mesófilos aerobios, HyL: Hongos y Levaduras.

Perfil de ácidos grasos

El perfil de ácidos grasos constituye un parámetro esencial en la calidad de aceites vegetales, ya que determina su valor nutricional, estabilidad oxidativa y aplicaciones tecnológicas. La proporción relativa de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados además de influir directamente en la susceptibilidad del aceite a la rancidez, en su estabilidad oxidativa durante procesamiento y almacenamiento, tiene un impacto sobre la salud humana (Gunstone, 2011; Nehdi et al., 2010). De manera general, un mayor contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente oleico y linoleico, se asocia con beneficios cardiovasculares y propiedades antiinflamatorias, mientras

que un exceso de saturados incrementa el riesgo aterogénico (Ros, 2010). Asimismo, la presencia de ácidos grasos minoritarios, como el mirístico, heptadecanoico o eicosanoico, puede influir en la estabilidad térmica y en características sensoriales, siendo marcadores de autenticidad y diferenciación varietal (Akinola et al., 2010). En este contexto, el análisis del perfil de ácidos grasos no solo permite evaluar la calidad del aceite, sino también establecer su potencial nutraceutico y funcional en intervenciones dietéticas.

Tabla 3. Perfil de ácidos grasos del aceite de nuez pecanera extraído por prensado

% Ester metílico	Tamaño de nuez pecanera		
	Gz	Gr	Pw
Ácido mirístico C14:0	ND	ND	0.03±0.01
Ácido palmítico C16:0	8.51±1.25 ^a	9.4±0.62 ^{ab}	11.47±0.42 ^b
Ácido palmitoleico 16:1	0.07±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.03±0.02 ^a
Ácido heptadecanoico C17:0	0.05±0.00 ^a	0.07±0.02 ^a	0.07±0.02 ^a
Ácido esteárico C18:0	2.8±0.45 ^a	4.8±0.31 ^b	4.71±0.19 ^b
Ácido oleico C18:1	49.84±4.14 ^a	65.50±1.76 ^b	58.02±1.37 ^{ab}
Ácido linoleico C18:2	35.85±6.54 ^b	16.70±2.70 ^a	22.51±1.28 ^a
Ácido linolénico C18:3 (α-3)	1.59±0.30 ^a	1.98±0.23 ^a	1.56±0.13 ^a

Letras distintas en cada fila para cada ácido graso indican diferencia estadística significativa (p<0.05).
ND No detectado.

Como se muestra en la **Tabla 3** (extracción con prensado) y la **Tabla 4** (extracción con solvente), los principales ácidos grasos identificados en las muestras fueron el oleico (C18:1), linoleico (C18:2), palmítico (C16:0), esteárico (C18:0) y α-linolénico (C18:3), los cuales representan la fracción mayoritaria de la matriz lipídica. En menor proporción se detectaron ácidos grasos saturados, como el mirístico (C14:0), heptadecanoico (C17:0), eicosanoico (C20:0), y palmitoleico (C16:1), presentes de forma variable según el método de extracción.

Tabla 4. Perfil de ácidos grasos del aceite de nuez pecanera extraído por solvente

% Ester metílico	Tamaño de nuez pecanera		
	Gz	Gr	Pw
Ácido palmítico C16:0	7.76±0.92 ^a	7.09±0.00 ^a	9.77±0.22 ^b
Ácido heptadecanoico C17:0	0.05±0.03 ^a	0.02±0.00 ^a	0.07±0.00 ^a
Ácido esteárico C18:0	3.33±0.48 ^a	3.47±0.27 ^a	3.88±0.04 ^a
Ácido oleico C18:1	54.92±7.38 ^a	57.96±2.04 ^a	56.53±0.00 ^a
Ácido linoleico C18:2	31.18±6.59 ^a	28.19±2.44 ^a	27.29±0.00 ^a
Ácido linolénico C18:3	1.97±0.38 ^a	1.91±0.00 ^a	1.51±0.05 ^a
Ácido eicosanoico C20:0	0.11±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a	0.12±0.00 ^b

Letras distintas en cada fila para cada ácido graso indican diferencia estadística significativa (p<0.05).

En términos comparativos, el ácido oleico (C18:1) fue el ácido graso predominante en todas las muestras, con valores de 65.05% y 57.96% en el tamaño Gr para prensado y solvente respectivamente. Hallazgo importante dado que según Kris.Etherton (1999), una dieta rica en ácido oleico se asocia con la reducción de colesterol LDL, mientras que Mensink (2016) reportó efectos cardioprotectores dentro de un perfil lipídico saludable. En cuanto al ácido linoleico (C18:2), se observó una mayor proporción en Gz prensado (35.85%) en comparación con los aceites obtenidos con solvente (27-31%), lo que sugiere que el prensado favorece la conservación de ácidos grasos poliinsaturados, aunque con mayor variabilidad entre los diferentes tamaños de nuez (p<0.05).

Respecto a los ácidos grasos saturados, el palmítico (C16:0) alcanzo valores más altos en Pw (11.47% y 9.77%) para prensado y solvente respectivamente, mientras que Gz y Gr no tuvieron diferencias significativas. En el aceite prensado el esteárico (C18:0) en Gr y Pw fue de 4.8 y 4.7% respectivamente siendo superior a Gz con 2.8%, indicando influencia del tamaño en este ácido graso específico. El linoléico (C18:3) presento valores bajos en todas las condiciones evaluadas (<2%), aunque con diferencias entre Gr prensado (1.98%) y Pw solvente (1.51%).

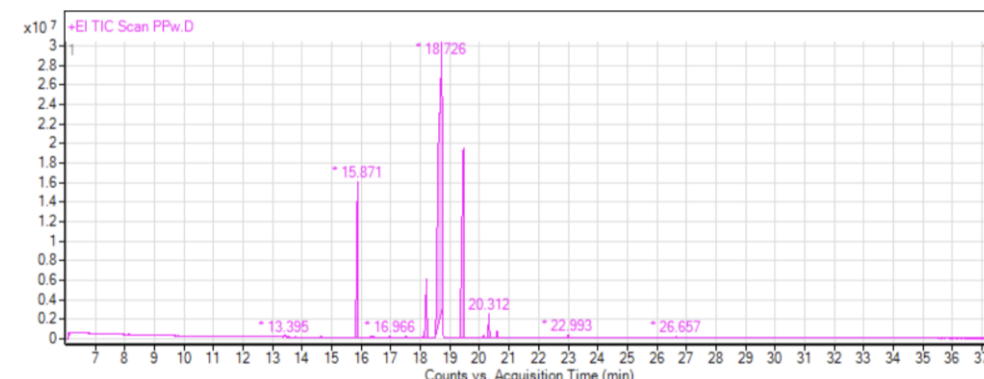


Fig. 4. Cromatograma de perfil de ácidos grasos de aceite de nuez variedad Pawnee extraído por prensado

En conjunto, los resultados evidencian que tanto el método de extracción como el tamaño de la nuez influyeron en el perfil de ácidos grasos ($p < 0.05$), siendo el prensado en frío más eficiente en la conservación de oleico y linoleico, mientras que el solvente promovió una composición más homogénea, pero con ligeras pérdidas de insaturados. Los cromatogramas representativos (**Fig. 4 y 5**) confirman la presencia de estos compuestos destacando los picos correspondientes a oleico y linoleico como mayoritarios en ambos métodos, aunque con mayor proporción en prensado.

Este patrón de ácidos grasos resulta de particular interés en el contexto de la inflamación crónica de bajo grado asociada al sobrepeso. En este sentido, Rajaram et al. (2001) y Casas et al. (2014) han señalado que el consumo regular de aceites ricos en ácido oleico y linoleico se asocia con la reducción de marcadores proinflamatorios. De manera complementaria, Estruch et al. (2018) documentaron que dietas enriquecidas en ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados contribuyen a mejorar el perfil lipídico sanguíneo, con disminución de triglicéridos y colesterol LDL, así como un aumento de colesterol HDL.

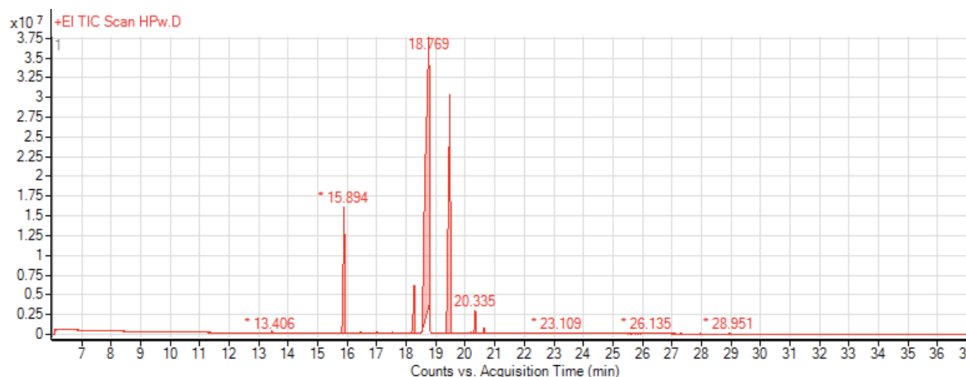


Fig. 5. Cromatograma de perfil de ácidos grasos de aceite de nuez variedad Pawnee extraído con solvente

En este contexto, los resultados del presente estudio sugieren que el aceite de nuez pecanera obtenido por prensado en frío preserva una fracción mayor de ácidos grasos insaturados, lo que refuerza su potencial como ingrediente nutracéutico en estrategias dietéticas para el manejo del sobrepeso y la prevención de sus complicaciones metabólicas.

Conclusiones

El presente estudio demostró que el método de extracción y la calidad de la nuez pecanera, de acuerdo con su tamaño, influyeron en la calidad del aceite obtenido. La extracción con solvente alcanzó mayores rendimientos y el prensado en frío resultó en calidad superior, particularmente en Gr y Pw en términos de índices de peroxidación y acidez, elevado contenido de ácidos grasos insaturados, estabilidad del color. Independientemente del método de extracción y tamaño, se obtuvo un aceite inocuo. Estos hallazgos respaldan el uso del aceite de nuez pecanera prensado en frío como un alimento funcional y/o nutracéutico con potencial aplicación en estrategias dietéticas clínicas.

Bibliografía

- AKINOLA, F. F., OGUNTIBEJU, O. O., ADISA, A. W., & OWOJUYIGBE, O. S. (2010). Physicochemical properties of palm oil from different palm oil local factories in Nigeria. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(3–4), 264–269.
- Çakaloğlu, B., Özyurt, V. H., & Ötleş, S. (2018). Cold press in oil extraction: A review. *Ukrainian Food Journal*, 7(4), 640–654. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-9>
- Casas, R., Sacanella, E., & Estruch, R. (2014). The immune protective effect of the Mediterranean diet against chronic low-grade inflammatory diseases. *Endocrine, Metabolic & Immune Disorders - Drug Targets*, 14(4), 245–254. <https://doi.org/10.2174/1871530314666140922153350>
- Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(4), 169–186. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x>
- Chowdhury, K., et al. (2007). Studies on the fatty acid composition of edible oil. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 42(3), 311–316.
- Codex Alimentarius. (2019). Standard for edible fats and oils not covered by individual standards (CODEX STAN 19-1981). FAO/WHO.
- de la Rosa, L. A., Alvarez-Parrilla, E., & Shahidi, F. (2011). Phenolic compounds and antioxidant activity of kernels and shells of Mexican pecan (*Carya illinoensis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 152–162. <https://doi.org/10.1021/jf1034306>
- Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoa, M., Barba, F. J., Zhang, W., & Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), 429. <https://doi.org/10.3390/antiox8100429>

- Estruch, R., et al. (2018). Primary prevention of cardiovascular disease with a Mediterranean diet supplemented with extra-virgin olive oil or nuts. *New England Journal of Medicine*, 378(25), e34. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1800389>
- Firestone, D. (Ed.). (2009). *Official methods and recommended practices of the AOCS* (6th ed.). AOCS Press.
- Grajzer, M., Szmalcel, K., Kuźmiński, Ł., Witkowski, M., Kulma, A., & Prescha, A. (2020). Characteristics and antioxidant potential of cold-pressed oils—Possible strategies to improve oil stability. *Foods*, 9(11), 1630. <https://doi.org/10.3390/foods9111630>
- Gunstone, F. D. (2011). *Vegetable oils in food technology: Composition, properties and uses* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Hudthagosol, C., Haddad, E. H., McCarthy, K., Wang, P., Oda, K., & Sabaté, J. (2011). Pecans acutely increase plasma postprandial antioxidant capacity and catechins and decrease LDL oxidation in humans. *Journal of Nutrition*, 141(1), 56–62. <https://doi.org/10.3945/jn.110.121269>
- Jarret, R. L., Levy, I. J., Potter, T. L., & Cermak, S. C. (2013). Seed oil and fatty acid composition in *Capsicum* spp. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.02.005>
- Kiokias, S., Proestos, C., & Oreopoulou, V. (2018). Effect of natural food antioxidants against LDL and DNA oxidative changes. *Antioxidants*, 7(10), 133. <https://doi.org/10.3390/antiox7100133>
- Kris-Etherton, P. M. (1999). Monounsaturated fatty acids and risk of cardiovascular disease. *Circulation*, 100(11), 1253–1258. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.100.11.1253>
- Kyari, M. Z. (2008). Extraction and characterization of seed oil. *International Agrophysics*, 22(1), 139–142.
- Lavenburg, V. M., Rosentrater, K. A., & Jung, S. (2021). Extraction methods of oils and phytochemicals from seeds and their environmental and economic impacts. *Processes*, 9(10), 1839. <https://doi.org/10.3390/pr9101839>
- McKay, D. L., Eliasziw, M., Chen, C. Y. O., & Blumberg, J. B. (2018). A pecan-rich diet improves cardiometabolic risk factors in overweight and obese adults: A randomized controlled trial. *Nutrients*, 10(3), 339. <https://doi.org/10.3390/nu10030339>
- Mínguez-Mosquera, M. I., Rejano-Navarro, L., Gandul-Rojas, B., Sánchez-Gómez, A. H., & Garrido-Fernández, J. (1991). Color–pigment correlation in virgin olive oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 68(5), 332–336.
- Moyano, M. J., Meléndez-Martínez, A. J., Alba, J., & Heredia, F. J. (2008). A comprehensive study on the colour of virgin olive oils and its relationship with their chlorophylls and carotenoids indexes

- (II): CIELUV and CIELAB uniform colour spaces. *Food Research International*, 41(5), 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.006>
- Nehdi, I. A., Omri, S., Khalil, M. I., & Al-Resayes, S. I. (2010). Characteristics and chemical composition of date palm (*Phoenix canariensis*) seeds and seed oil. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.05.016>
- Polmann, G., Badia, V., Frena, M., Teixeira, G. L., Rigo, E., Block, J. M., & Feltes, M. M. C. (2019). Enzyme-assisted aqueous extraction combined with experimental designs allow the obtaining of a high-quality and yield pecan nut oil. *LWT – Food Science and Technology*, 113, 108283. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108283>
- Psomiadou, E., & Tsimidou, M. (2001). Pigments in Greek virgin olive oils: Occurrence and levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(7), 640–647. <https://doi.org/10.1002/jsfa.859>
- Rajaram, S., Burke, K., Connell, B., Myint, T., & Sabaté, J. (2001). A monounsaturated fatty acid–rich pecan-enriched diet favorably alters the serum lipid profile of healthy men and women. *Journal of Nutrition*, 131(9), 2275–2279. <https://doi.org/10.1093/jn/131.9.2275>
- Ros, E. (2010). Health benefits of nut consumption. *Nutrients*, 2(7), 652–682. <https://doi.org/10.3390/nu2070652>
- Schmidt, Š., & Pokorný, J. (2005). Potential application of oilseeds as sources of antioxidants for food lipids – A review. *Czech Journal of Food Sciences*, 23(3), 93–102.
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*, 39(11), 4067–4079. <https://doi.org/10.1039/b922183m>
- Strati, I. F., et al. (2024). Quality assessment of edible plant-based oils using chromatic characteristics (L^* , a^* , b^*). *Applied Sciences*, 14(22), 10305. <https://doi.org/10.3390/app142210305>
- Suri, K., et al. (2023). Physicochemical characteristics and oxidative stability of edible oils: Influence of pigments and bioactive compounds. *Food Chemistry Advances*, 2, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100187>

Efecto Citotóxico de una Formulación a base de Zeína, Cannabidiol y Cannabigerol en un Modelo *In Vitro* de Células Caco-2

Cytotoxic Effect of a Zein, Cannabidiol, and Cannabigerol-Based Formulation in an *In Vitro* Cell Model of Caco-2 Cells

Kevin Antonio Cárdenas-Noriega ¹, Joel Horacio Elizondo-Luévano ^{2,*}, Adolfo Soto-Domínguez ³, Abelardo Chávez-Montes ², Luis Édgar Rodríguez-Tovar ¹, Moisés Armides Franco-Molina ², Diana Ginette Zárate-Triviño ², Juanita Guadalupe Gutiérrez-Soto ⁴, Ameyalli Jocelyn Martínez-Delgado ⁵, Raymundo Alejandro Pérez-Hernández ², Uziel Castillo-Velázquez ^{1,*}

1. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nuevo León, C. Francisco Villa 20, Ex Hacienda del Canadá, 66054, Cd. Gral. Escobedo, Nuevo León, México; kevin.cardenasno@uanl.edu.mx (K.A.C.-N.); luis.rodriquezvtv@uanl.edu.mx (L.E.R.-T.); uziel.castillovl@uanl.edu.mx (U.C.-V.)
2. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba, Niños Héroe, 66455, San Nicolás de los Garza. Nuevo León, México; joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.); abelardo.chavezmn@uanl.edu.mx (A.C.-M.); moises.francoml@uanl.edu.mx (M.A.F.-M.); diana.zaratetr@uanl.edu.mx (D.G.Z.-T.); raymundo.perezhrz@uanl.edu.mx (R.A.P.-H.)
3. Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Dr. Eduardo Aguirre Pequeño, 64460, Mitras Centro, Nuevo León, México; adolfo.sotodmn@uanl.edu.mx (A.S.-D.)
4. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, C. Francisco Villa 20, Ex Hacienda del Canadá, 66054, Cd. Gral. Escobedo, Nuevo León, México; juanita.gutierrezst@uanl.edu.mx (J.G.G.-S.)
5. Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Dr. Eduardo Aguirre Pequeño, 64460, Mitras Centro, Nuevo León, México; ameyalli.martinezd@uanl.edu.mx (A.J.M.-D.)

* **Correspondencia:** joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.); uziel.castillovl@uanl.edu.mx (U.C.-V.)

RESUMEN

El presente artículo de investigación se centra en la evaluación del efecto citotóxico de los fitocannabinoides cannabidiol (CBD) y cannabigerol (CBG), de manera individual y en combinación (CBD:CBG), así como en una formulación a base de zeína (Ze) con CBD y CBG en conjunto (ZeCBD:CBG). Para ello, el efecto de CBD, CBG, CBD:CBG y ZeCBD:CBG en la viabilidad celular se evaluó en la línea celular intestinal Caco-2 y se evaluó la actividad metabólica dependiente de mitocondria mediante análisis de reducción de bromuro 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2-5-difeniltetrazolio o ensayo de MTT. Además, para determinar el tratamiento más efectivo, se estimó la concentración inhibitoria al 50% (IC₅₀) de cada tratamiento evaluado mediante la prueba de Probit. Todos los tratamientos evaluados mostraron disminuir la viabilidad celular de células Caco-2 en diferente medida, siendo ZeCBD:CBG y CBD:CBG los que mostraron los valores más bajos de IC₅₀ (12.8 μ M y 9.2 μ M, respectivamente). Por lo anterior, estos resultados indican que la formulación de CBD y CBG en una matriz basada en zeína muestra un menor efecto citotóxico metabólica comparado con los cannabinoides libres en las condiciones *in vitro* evaluadas.

Palabras Clave: Cannabinoides, Cannabidiol, Cannabigerol, Caco-2, Zeína

Cytotoxic Effect of a Zein-based formulation Containing Cannabidiol and Cannabigerol in an In Vitro Caco-2 Cell Model

ABSTRACT

This research article focuses on evaluating the cytotoxic effects of the phytocannabinoids cannabidiol (CBD) and cannabigerol (CBG), both individually and in combination (CBD:CBG), as well as in a zein-based formulation containing both cannabinoids (ZeCBD:CBG). The effects of CBD, CBG, CBD:CBG, and ZeCBD:CBG on cell viability were assessed in the intestinal epithelial Caco-2 cell line by measuring mitochondrial-dependent metabolic activity using the 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) reduction assay. In addition, the half-maximal inhibitory concentration (IC_{50}) of each treatment was estimated using Probit analysis. All evaluated treatments induced a reduction in Caco-2 cell viability to different extents, with ZeCBD:CBG and CBD:CBG showing the lowest IC_{50} values (12.8 μ M and 9.2 μ M, respectively). Overall, these results indicate that the formulation of CBD and CBG in a zein-based matrix exhibits a lower cytotoxic metabolic effect compared with the free cannabinoids under the in vitro conditions evaluated.

Keywords: Cannabinoids, Cannabidiol, Cannabigerol, Caco-2, Zein

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades inflamatorias intestinales (EII) son un grupo de enteropatías inflamatorias, crónicas y de presentación clínica heterogénea que, aunque su etiología permanece incierta, se ha evidenciado que es una manifestación multifactorial de la desregulación de la respuesta inmune a la microbiota intestinal en individuos con predisposición genética (Saez et al., 2023; Lu et al., 2022). Debido a las consecuencias de sus manifestaciones en la salud, las cuales pueden involucrar diferentes grados de dolor, daño local en tracto gastrointestinal y en otros órganos y sistemas, dependiendo de la severidad, y de la ineficacia de las terapias convencionales, surge la necesidad de buscar estrategias terapéuticas complementarias (Cai et al., 2021; Seyedian et al., 2019). En este contexto, el uso de modelos *in vitro* basados en epitelio intestinal humano son ampliamente utilizados para estudios farmacológicos, de funcionalidad, fisiología y mecanismos patológicos del epitelio intestinal (Lopez-Escalera & Wellejus, 2022; Ding et al., 2021).

Por su parte, los componentes del sistema endocannabinoide contenidos en el tracto gastrointestinal tienen importantes roles en la regulación de respuesta inmune y procesos inflamatorios (Lian et al., 2022). Mientras que cannabinoides derivados de la planta de cannabis sativa L., como el cannabidiol (CBD) y el cannabigerol (CBG), son estudiados por su capacidad de modular al sistema endocannabinoide presentando actividad terapéutica en diversos estudios, además de amplios rangos de seguridad y baja toxicidad en animales (Iffland & Grotenhermen, 2017; Brierley et al., 2016). Sin embargo, debido a que son compuestos altamente lipofílicos, una de las principales limitantes en su aplicación farmacológica es su baja solubilidad acuosa, inestabilidad química y baja biodisponibilidad al ser administrados por la vía oral debido a un alto metabolismo de primer paso (Kok et al., 2022). Para superar esta limitante se han desarrollado sistemas de entrega basados en nanotecnología, capaces de mejorar las cualidades fisicoquímicas y terapéuticas de compuestos altamente hidrofóbicos, como los cannabinoides. Un estudio publicado por nuestro equipo de trabajo desarrolló un sistema de nanoentrega basado en el polímero Eudragit-L100 y cargado con CBD y CBG. Al ser evaluados en células Caco-2

sanas, los cannabinoides solubles y en nanoformulación mostraron un efecto más marcado en la viabilidad celular en conjunto, a comparación de sus componentes individuales (Cárdenas-Noriega et al., 2026). Por su parte se ha propuesto a la zeína, un polímero proteico extraído del maíz, se ha propuesto como un material adecuado para el desarrollo de sistemas de nanoentrega de cannabinoides (Wang et al., 2022; Abdelsalam et al., 2021). La búsqueda de complementos terapéuticos para las EII, así como de nanoformulaciones adecuadas para la entrega efectiva de cannabinoides, representan importantes perspectivas de estudio a explorar.

Por lo anterior, el objetivo principal de la presente investigación estuvo enfocado en evaluar el efecto citotóxico del cannabidiol (CBD), del cannabigerol (CBG), así como de los complejos CBD:CBG y la formulación basada en zeína ZeCBD:CBG in vitro en la línea celular intestinal Caco-2.

MÉTODOS

Reactivos

El cannabidiol (CBD) y el cannabigerol (CBG) de *Cannabis sativa* fueron adquiridos en Botican (ICAN Connect to Cannabis, CDMX, México) en forma de polvo con sus respectivos análisis de garantía (100% CBD y 99.08% CBG) en forma de polvo. Los solventes y reactivos utilizados en los tratamientos se adquirieron en CTR Scientific® (Monterrey, NL, México). Para el cultivo celular se utilizaron el medio de cultivo Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM), suero fetal bovino (SFB), bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y solución antibiótica/antimicótica (1% v/v de una mezcla comercial que contiene 100 U/mL de penicilina y estreptomycin), adquiridos de Gibco™ (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Para los ensayos de viabilidad, el bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolio (MTT), el dimetilsulfóxido (DMSO) e hidróxido de sodio (NaOH), así como el polvo de zeína para la formulación se adquirieron de Sigma-Aldrich® (Merck KGaA, Darmstadt, Alemania).

Formulaciones

Los cannabinoides se evaluaron a concentraciones de 0.8 µM, 4.7 µM, 9.5 µM, 14.2 µM, 19 µM y 23.7 µM, individuales o en combinación (CBD:CBG, 1:1). Por su parte, la formulación con cannabinoides a base de zeína (ZeCBD:CBG) se evaluó a concentraciones de 0.1 µg, 0.2 µg, 0.4 µg, 0.6 µg, 0.8 µg y 1.0 µg de zeína conteniendo las mismas concentraciones de cannabinoides anteriormente mencionadas.

La formulación del complejo ZeCBD:CBG se desarrolló de la siguiente manera. Se utilizó una solución de etanol al 80% con 0.01 g de zeína (Sigma-Aldrich Corp., St. Louis, MO, USA) y 0.06 g de cannabinoides (CBD:CBG, 1:1) y se realizó un tratamiento térmico en placa térmica a 95 °C durante 30 minutos en un recipiente cerrado. Finalizado el tratamiento térmico, se preparó un vaso precipitado con 6 mL de agua desionizada (agua MiliQ) y se colocó bajo un homogeneizador (T18 Digital Ultra Turrax, IKA® Works GmbH & Co. KG, Alemania) a 5,000 rpm. Rápidamente, se administró la solución de zeína tratada por goteo hasta obtener una solución transparente (hialino) color azul turquesa.

La formulación fue caracterizada basándonos en su tamaño promedio en nanómetros (nm) e índice de polidispersidad (PDI) mediante dispersión dinámica de luz mediante un Zetasizer Nano ZS system (Malvern Instruments Ltd., Malvern, Worcestershire, UK) y la eficiencia de encapsulación (EE%) mediante un método indirecto a través de espectrofotometría del sobrenadante y precipitado de muestras centrifugadas, así como lectura de absorbancia (Abs) relacionada a una curva de calibración de diluciones de los cannabinoides utilizando un

espectrofotómetro UV/VIS (Thermo Scientific™ GENESYS™ 10S, Thermo Fisher Scientific Inc. Madison, Wisconsin, Estados Unidos) a una longitud de onda de 215 nm para el CBD y 216 nm para el CBG. La eficiencia de encapsulación en porcentaje (%) fue determinada con la siguiente fórmula (1):

$$EE\% = \frac{(\mu\text{g Activo libre} \times 100)}{\mu\text{g Activo total}} - 100 \quad (1)$$

Efecto en la viabilidad celular *In vitro*

La viabilidad *in vitro* se evaluó en células epiteliales de adenocarcinoma de colon (Caco-2, [Caco2] HTB-37™) obtenidas del American Type Culture Collection (ATCC®). La viabilidad celular se evaluó mediante el ensayo de reducción de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolio bromuro (MTT), el cual se basa en la capacidad mitocondrial de reducción del MTT a formazán insoluble por células metabólicamente activas. Por lo tanto, los valores obtenidos reflejan la actividad metabólica dependiente de mitocondria, como un indicador de la viabilidad celular. Los cristales de formazán resultantes se disolvieron con 100 µL de DMSO por 30 minutos. Se realizó una lectura de absorbancia por espectrofotometría a una longitud de onda de 570 nm utilizando un espectrofotómetro Agilent Biotek Epoch Microplate Spectrophotometer espectrofotómetro (Agilent Biotek Epoch Microplate Spectrophotometer, Agilent Technologies, Santa Clara, CA). La evaluación del metabolismo celular dependiente de mitocondria se evaluó utilizando la siguiente fórmula (2):

(2)

Las células se sembraron en placas plásticas transparentes de 96 pozos a una concentración de 10,000 células por pozo y se incubaron en medio de cultivo DMEM con SFB) al 10% y antibiótico/antifúngico al 1% en una atmósfera húmeda estéril a 37 °C y CO₂ al 4% durante 24 h previas al tratamiento. Los tratamientos se administraron por triplicado a diferentes concentraciones en relación con el medio, y se utilizaron células tratadas con vehículo a los mismos volúmenes, así como células sin tratamiento como controles.

Análisis de datos

Se utilizó estadística descriptiva, análisis de varianza (ANOVA) y la prueba post hoc de Tukey para determinar la diferencia entre los tratamientos y la prueba de Probit para la determinación de la concentración inhibitoria al 50% (IC₅₀). Se utilizó el paquete estadístico Graphpad Prism, versión 4.0 (GraphPad Software Inc., San Diego, California, USA) para los análisis estadísticos.

RESULTADOS

La formulación ZeCBD:CBG mostró tamaños promedio de partículas de 144.8 nm ± 41.6 nm y un PDI de 0.148, valores dentro de los rangos reportados para este tipo de nanopartículas (Danaei et al., 2018), así como un %EE, definido como la proporción de agente activo añadido durante la formulación que permanece dentro del sistema de entrega después de procesado (Wallace et al., 2012) de 69.99 ± 2.68.

El efecto de los presentes tratamientos CBD, CBG, CBD:CBG (1:1) y ZeCBD:CBG frente a la viabilidad celular *in vitro* en cultivos de células Caco-2 mostro un efecto dosis-respuesta ya que a medida que aumenta la concentración del tratamiento disminuye la viabilidad

celular de estas. Siendo los más efectivos los tratamientos combinados CBD:CBG (1:1) y ZeCBD:CBG tal como se muestra en la figura 1.

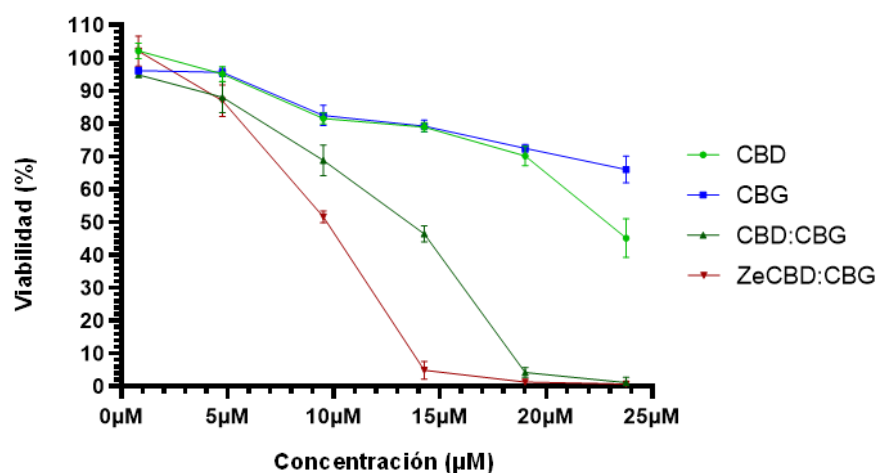


Figura 1. Efecto de los formulados sobre la viabilidad en la línea celular Caco-2 *in vitro*.

La determinación de las IC_{50} de los tratamientos con CBD, CBG, CBD:CBG y ZeCBD:CBG fue de 24.53 ± 1.95 , 42.63 ± 7.25 , 12.76 ± 0.43 y 9.22 ± 2.31 μM , respectivamente.

DISCUSION

En el presente estudio se determinó el efecto del CBD y CBG de manera individual, en conjunto (CBD:CBG) y su formulación en un sistema de entrega basado en zeína (ZeCBD:CBG) sobre la viabilidad celular *in vitro* en un modelo epitelial intestinal humano en células Caco-2 mediante el ensayo de reducción de MTT. Los resultados indican que los tratamientos evaluados indujeron una disminución dosis-dependiente en la actividad metabólica celular, siendo el CBD:CBG y ZeCBD:CBG los tratamientos cuyos valores de IC_{50} mostraron ser los más bajos a comparación de los cannabinoides administrados de manera individual. Es importante señalar que el ensayo MTT evalúa la capacidad metabólica mitocondrial de las células para reducir el reactivo a cristales de formazán, por lo que los valores obtenidos reflejan cambios en la actividad metabólica celular como un indicador indirecto de viabilidad. En este sentido, los cambios observados no permiten distinguir entre mecanismos específicos de muerte celular ni evaluar procesos asociados como arresto del ciclo celular o estrés oxidativo. Debido a esto los efectos observados se interpretaron como efectos en la viabilidad celular, concepto ampliamente utilizado en la literatura (Ghasemi et al., 2021), en concordancia con las limitaciones inherentes a este tipo de ensayo.

El comportamiento dosis-respuesta de los cannabinoides concuerda con otros estudios que reportan efectos dependientes de la concentración de los cannabinoides sobre la viabilidad celular (Cárdenas-Noriega et al., 2026). La combinación de ambos cannabinoides mostró un efecto más remarcable en la viabilidad celular a comparación de sus congéneres individuales. No obstante, es importante aclarar que en este estudio no se realizaron análisis específicos de sinergia, antagonismo o aditividad. Por lo tanto, bajo las presentes condiciones experimentales los efectos observados para las combinaciones de cannabinoides (solubles o formulados con zeína) no deben interpretarse como evidencia de un efecto sinérgico entre ellos. Las diferencias

en los resultados de IC_{50} para ZeCBD:CBG y CBD:CBG indican una modificación del formulado sobre el efecto de los cannabinoides en la viabilidad celular.

La zeína ha sido ampliamente estudiada como sistema de entrega para compuestos hidrofóbicos debido a su capacidad para mejorar la estabilidad y dispersión de moléculas lipofílicas, así como su compatibilidad biológica (Abdelsalam et al., 2021; Wang et al., 2022). En este contexto, los resultados sugieren que la formulación ZeCBD:CBG puede modular la disponibilidad celular de los cannabinoides, reflejado en un perfil de citotoxicidad distinto al de su contraparte no formulada. Estos resultados son consistentes con lo publicado por nuestro equipo de trabajo para otro sistema de nanoentrega diferente, en donde se comparó el efecto de un sistema formulado con el polímero Eudragit-L100 cargado de cannabinoides con los cannabinoides libres (Cárdenas-Noriega et al., 2026). En conjunto, ambos estudios refuerzan la utilidad de modelos epiteliales intestinales in vitro para evaluar la citotoxicidad metabólica y la respuesta a cannabinoides libres y formulado en sistemas de entrega.

Finalmente, aunque las células Caco-2 derivan de adenocarcinoma colorrectal, su capacidad para diferenciarse a células epiteliales funcionales de manera normal las hace objeto de estudio para evaluar los efectos de agentes terapéuticos in vitro. Por lo tanto, los resultados obtenidos no deben interpretarse en términos de actividad antitumoral o extrapolarse a contextos terapéuticos oncológicos. Estudios futuros que incorporen análisis mecanísticos específicos y modelos experimentales adicionales serán necesarios para profundizar en los efectos celulares de CBD, CBG y sus formulaciones.

CONCLUSIONES

El cannabidiol (CBD), el cannabigerol (CBG), su combinación (CBD:CBG) en forma libre y en una formulación a base de zeína (ZeCBD:CBG) produjeron una disminución dosis-dependiente de la actividad metabólica celular en un modelo epitelial intestinal humano in vitro (Caco-2), evaluada mediante el ensayo de MTT. Los tratamientos combinados presentaron valores menores de IC_{50} a comparación de los cannabinoides individuales; sin embargo, al no haber realizado análisis de sinergia, estos efectos deben interpretarse únicamente como el resultado de la coexposición a ambos compuestos. Asimismo, la formulación con zeína modificó el perfil de citotoxicidad metabólica con respecto a los cannabinoides libres en combinación. Estos resultados contribuyen a la caracterización de los efectos de estos compuestos en el metabolismo de células epiteliales intestinales in vitro.

Declaración de ética: Los autores respaldan el presente trabajo y contribuyen de manera significativa a su autoría. Asimismo, se han seguido todos los procedimientos éticos necesarios.

Conflictos de interés: No existe conflicto de intereses.

Agradecimientos: Agradecimiento a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, la Facultad de Medicina y la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL por brindarnos la infraestructura, los recursos y el acceso a bases de datos para llevar a cabo la presente investigación. Los autores también agradecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) por el apoyo económico otorgado a J.H.E.-L.; A.S.-D.; A.C.-M.; M.A.F.-M.; L.E.R.-T.; J.G.G.-S.; A.J.M.-D.; D.G.Z.-T.; R.A.P.-H. y U.C.-V.

REFERENCIAS

- Abdelsalam, A. M., Somaida, A., Ayoub, A. M., Alsharif, F. M., Preis, E., Wojcik, M., & Bakowsky, U. (2021). Surface-tailored zein nanoparticles: Strategies and applications. *Pharmaceutics*, 13(9), 1–25. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091354>
- Brierley, D. I., Samuels, J., Duncan, M., Whalley, B. J., & Williams, C. M. (2016). Cannabigerol is a novel, well-tolerated appetite stimulant in pre-satiated rats. *Psychopharmacology*, 233(19–20), 3603–3613. <https://doi.org/10.1007/s00213-016-4397-4>
- Cai, Z., Wang, S., & Li, J. (2021). Treatment of Inflammatory Bowel Disease: A Comprehensive Review. *Frontiers in Medicine*, 8(December), 1–24. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.765474>
- Cárdenas-Noriega, K. A., Elizondo-Luévano, J. H., Chávez-Montes, A., Rodríguez-Tovar, L. E., Franco-Molina, M. A., Zárate-Triviño, D. G., Pérez-Hernández, R. A., Soto-Domínguez, A., & Castillo-Velázquez, U. (2026). Nanoencapsulated Cannabidiol–Cannabigerol Using Eudragit L100: In Vitro and In Vivo Evidence in Murine Colitis Model. *Drugs and Drug Candidates*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.3390/ddc5010010>
- Danaei, M., Dehghankhold, M., Ataei, S., Hasanzadeh Davarani, F., Javanmard, R., Dokhani, A., Khorasani, S., & Mozafari, M. R. (2018). Impact of particle size and polydispersity index on the clinical applications of lipidic nanocarrier systems. In *Pharmaceutics*. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10020057>
- Ding, X., Hu, X., Chen, Y., Xie, J., Ying, M., Wang, Y., & Yu, Q. (2021). Differentiated Caco-2 cell models in food-intestine interaction study: Current applications and future trends. *Trends in Food Science and Technology*, 107(November), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.015>
- Ghasemi, M., Turnbull, T., Sebastian, S., & Kempson, I. (2021). The mtt assay: Utility, limitations, pitfalls, and interpretation in bulk and single-cell analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23). <https://doi.org/10.3390/ijms222312827>
- Iffland, K., & Grotenhermen, F. (2017). An Update on Safety and Side Effects of Cannabidiol: A Review of Clinical Data and Relevant Animal Studies. *Cannabis and Cannabinoid Research*, 2(1), 139–154. <https://doi.org/10.1089/can.2016.0034>
- Kok, L. Y., Bannigan, P., Sanaee, F., Evans, J. C., Dunne, M., Regenold, M., Ahmed, L., Dubins, D., & Allen, C. (2022). Development and pharmacokinetic evaluation of a self-nanoemulsifying drug delivery system for the oral delivery of cannabidiol. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 168(November 2021), 106058. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.106058>
- Lian, J., Casari, I., & Falasca, M. (2022). Modulatory role of the endocannabinoidome in the pathophysiology of the gastrointestinal tract. *Pharmacological Research*, 175(December 2021), 106025. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.106025>
- Lopez-Escalera, S., & Wellejus, A. (2022). Evaluation of Caco-2 and human intestinal epithelial cells as in vitro models of colonic and small intestinal integrity. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 31(July), 101314. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2022.101314>
- Lu, Q., Yang, M. F., Liang, Y. J., Xu, J., Xu, H. M., Nie, Y. Q., Wang, L. S., Yao, J., & Li, D. F.

- (2022). Immunology of Inflammatory Bowel Disease: Molecular Mechanisms and Therapeutics. *Journal of Inflammation Research*, 15(March), 1825–1844. <https://doi.org/10.2147/JIR.S353038>
- Saez, A., Herrero-Fernandez, B., Gomez-Bris, R., Sánchez-Martinez, H., & Gonzalez-Granado, J. M. (2023). Pathophysiology of Inflammatory Bowel Disease: Innate Immune System. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2). <https://doi.org/10.3390/ijms24021526>
- Seyedian, S. S., Nokhostin, F., & Malamir, M. D. (2019). A review of the diagnosis, prevention, and treatment methods of inflammatory bowel disease. *Journal of Medicine and Life*, 12(2), 113–122. <https://doi.org/10.25122/jml-2018-0075>
- Wallace, S. J., Li, J., Nation, R. L., & Boyd, B. J. (2012). Drug release from nanomedicines: Selection of appropriate encapsulation and release methodology. *Drug Delivery and Translational Research*, 2(4), 284–292. <https://doi.org/10.1007/s13346-012-0064-4>
- Wang, C., Cui, B., Sun, Y., Wang, C., & Guo, M. (2022). Preparation, stability, antioxidative property and in vitro release of cannabidiol (CBD) in zein-whey protein composite nanoparticles. *Lwt*, 162(April), 113466. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113466>

Aplicación de diversas tecnologías en la agricultura

Application of diverse technologies in agriculture

David G. García-Hernández ¹; Juan M. Ballesteros-Torres ¹; Juan C. Torres-Cruz ²; Sergio Lugo-Urbina ²; Marisa A. Lugo-Sánchez ²; Carmina M. Lugo-Briones ²; Nancy M. Castillo-Ojeda ²; Cindy Joanna Caballero-Prado ³; Joel H. Elizondo-Luévano ^{1,2*}

1. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 66455, México; david.garciahrz@uanl.edu.mx (D.G.G.-H.); juan.ballesterostr@uanl.edu.mx (J.M.B.-T.); joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.)
2. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, General Escobedo, Nuevo León, 66050, México; juan.torrescrz@uanl.edu.mx (J.C.T.-C.); sergio.lugoubn@uanl.edu.mx (S.L.-U.); marisa.lugoshz@uanl.edu.mx (M.A.L.-S.); carmina.lugobrns@uanl.edu.mx (C.M.L.-B.); nancy.castillooj@uanl.edu.mx (N.M.C.-O.); joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.)
3. Universidad de Monterrey, San Pedro Garza García, Nuevo León, 66238, México; cindy.caballero@udem.edu (C.J. C.-P.)

* Correspondencia: joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.)

Resumen:

El rápido crecimiento de la población mundial, sumado al deterioro ambiental, presenta desafíos urgentes para la producción agrícola. Para el año 2040, se calcula que la población mundial superará los 9 mil millones, lo cual incrementará la demanda de alimentos. Dentro de este marco, la introducción de tecnologías innovadoras en la agricultura aparece como una solución clave para asegurar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del sistema productivo. En este artículo se analiza el impacto de herramientas como la inteligencia artificial, la robótica, los sensores inteligentes y la agricultura de precisión en la transformación del sector agrícola. Se realizó una revisión bibliográfica para analizar los beneficios que estas tecnologías ofrecen en el mejoramiento de la productividad, la gestión de los riesgos climáticos, la predicción de plagas y los rendimientos. Los resultados muestran que el uso estratégico de nuevas tecnologías puede mejorar la resiliencia y eficiencia de los sistemas agrícolas, constituyendo una vía fundamental hacia una agricultura más inteligente y sostenible. Se realizó una búsqueda de información en bases de datos de Google Académico con documentos en español e inglés y se centró el análisis en las palabras clave “agricultura” y “tecnología”.

Palabras Clave: Sensores; Automatización; Precisión; Inteligencia artificial; Tecnologías emergentes.

Abstract:

The rapid growth of the global population, along with environmental degradation, poses urgent challenges for agricultural production. It is estimated that by the year 2040, the global population will exceed 9 billion, significantly increasing the demand for food. In this context, the incorporation of innovative technologies in agriculture emerges as a key solution to ensure food security and the sustainability of production systems. This article explores the impact of tools such as artificial intelligence, robotics, smart sensors, and precision agriculture in transforming the agricultural sector. Through a literature review, the benefits of these technologies are analyzed in terms of improving productivity, managing climate-related risks, and predicting pests and crop yields. The results show that the strategic use of new technologies can increase the resilience and efficiency of agricultural systems, representing a crucial pathway toward smarter and more sustainable agriculture. The search for information was conducted using Google Scholar databases with documents in Spanish and English, focusing on the keywords “agriculture” and “technology”.

Keywords: Sensors; Automation; Precision; Artificial intelligence; Emerging technologies.

Introducción

Una de las principales preocupaciones a nivel global es el rápido crecimiento de la población, esto a raíz de que se estima que, para el 2040, la población mundial superará los 9 mil millones de personas, lo que incrementa significativamente la demanda de recursos, implicados entre ellos los alimentos. Esta situación, sumada al deterioro acelerado del medio ambiente, impulsa la necesidad de adoptar sistemas de producción agrícola más eficientes y sustentables, que garanticen el abastecimiento alimentario sin comprometer los recursos naturales (FAO, 2017). Para ello, la innovación tecnológica enfocada al uso de herramientas que permitan el apoyo a la agricultura, como la inteligencia artificial, la robótica y la biotecnología, están impactando todos los sectores de esta área, por lo que se considera importante incorporar estos avances para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria (Trigo & Elverdin, 2020).

A lo largo del tiempo, la agricultura ha sufrido cambios importantes, desde depender mayormente de la mano de obra hasta la incorporación de tecnologías que han permitido mejorar la productividad y los rendimientos en toda la cadena agroindustrial (Liu et al., 2020). Esta transformación se ha logrado mediante la adopción progresiva de tecnologías innovadoras, las cuales han aportado beneficios importantes al sector agrícola en el transcurso del tiempo (Ozdogan et al., 2017). Con cada revolución tecnológica que ha vivido el sector agrícola, se han generado aprendizajes fundamentales para mejorar los procesos, y han servido para impulsar su desarrollo con el uso de nuevas herramientas y conocimientos (Liu et al., 2020). Así lo prueban los sensores inteligentes y los sistemas de agricultura de precisión, que han revolucionado el monitoreo de los suelos y los cultivos esto según Qiao et al., (2022).

Los sensores remotos permiten evaluar las condiciones del campo en tiempo real, facilitando una respuesta rápida ante riesgos como sequías o enfermedades. Esta capacidad de respuesta incrementa la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a eventos climáticos extremos. Otro avance clave adicional es la incorporación de inteligencia artificial en la predicción de potenciales riesgos de infestaciones provocadas por plagas, además de la estimación de rendimientos en la producción. (Cob-Parro et al., 2024), señalan que los algoritmos de aprendizaje automático permiten prever escenarios agrícolas y optimizar estrategias de manejo, lo que contribuye a reducir las pérdidas económicas y a mejorar la calidad de las cosechas. Con base a una recopilación y revisión de artículos científicos, se pretende analizar y plasmar cómo las nuevas tecnologías están transformando la agricultura, destacando los principales desafíos y soluciones tecnológicas actuales (Figura 1).



Figura 1. Aplicación de las nuevas tecnologías en la agricultura.

Agricultura de precisión

La agricultura inteligente o de precisión aplica tecnologías de la información para gestionar datos, analizarlos, tomar decisiones y enfrentar los desafíos agrícolas actuales, promoviendo una producción más eficiente y sostenible. Su objetivo es transformar los procesos agrícolas, mejorando la productividad y eficiencia mediante el uso de tecnologías (*Internet of Things, IoT*). Sin embargo, es importante evaluar su impacto ambiental de manera integral (Lascano, 2026). El uso de sensores IoT (sensores de humedad del suelo, temperatura, riego automático y monitoreo en tiempo real) en cultivos como la pitahaya, mejora la toma de decisiones en tiempo real, permitiendo que los agricultores utilicen los recursos disponibles de manera más eficiente, lo que, a su vez, reduce el impacto ambiental (Zambrano, 2020). Al optimizar recursos y aumentar la productividad, esta metodología juega un papel crucial para enfrentar las limitaciones climáticas y socioeconómicas, contribuyendo a los objetivos globales de seguridad alimentaria y hambre cero; aunado a esto, la conjunción de tecnologías como *blockchain*, inteligencia artificial (IA), teledetección y sensores mejora la producción, eleva la calidad y disminuye el impacto ambiental (Avola et al., 2024).

Tecnología y equipamiento

Las herramientas y tecnologías utilizadas con el fin de lograr los objetivos expresados con anterioridad se exponen a continuación:

Tecnología de tasa variable (VRT)

En la agricultura de precisión, una labor crucial es el uso fluctuante de fertilizantes, herbicidas o pesticidas, por lo que la optimización de estos aditamentos, en función de las condiciones del campo y el tipo de cultivo, ha direccionado a la agricultura al uso de la Tecnología de Tasa Variable (VRT), que facilita la modificación de las tasas de uso de recursos según la variabilidad del terreno, para ello, estas tecnologías incluyen el uso de sensores y receptores GPS, utilizados para suministrar datos geolocalizados que determinan los puntos de ajuste concretos para que los controladores de dosis suministren diversas cantidades de productos agroquímicos en lugares determinados (Nowak, 2021).

Sensores remotos

Otra de las tecnologías es el uso de sensores remotos, los cuales posibilitan la recolección, estudio y representación de datos espaciales y temporales, simplificando la detección de patrones y tendencias asociados a enfermedades vegetales, estrés hídrico, carencias nutricionales y otros desafíos que impactan la productividad en la agricultura; además, la combinación de información de diversas fuentes, tales como imágenes satelitales, datos meteorológicos y mapas de terreno, facilita una valoración completa de las condiciones del campo y la realización de elecciones fundamentadas, permitiendo optimizar cultivos y el uso de recursos (Ashraf et al., 2023).

Riego de precisión

Con base al uso eficiente del agua, El riego de precisión posibilita que los agricultores apliquen el volumen preciso de agua en instantes determinados, en contraposición al riego tradicional. El modo automático de este sistema lo transforma en una solución inteligente y flexible que puede ser ajustada de acuerdo con los diferentes contextos de uso, evitando, como principal consecuencia, el desperdicio del recurso hídrico, así como la reducción de la contaminación del mismo; aunado a esto, se optimizan las cantidades adecuadas para potencial el cultivo e incrementar rendimientos de la producción agrícola (Nonvide, 2024).

Robots agrícolas

Otra de las tecnologías recientemente implementadas es el uso de robots agrícolas, que han mostrado utilidad, aunque todavía en fase de integración. Se ha observado que estos ofrecen ventajas como ahorro de costos, mayor eficiencia en el manejo de plagas y cosechas; aunque, como puntos adversos, enfrentan desafíos técnicos y sociales, influyendo en su rendimiento en campo; si bien su implementación promete avanzar hacia una agricultura más sostenible, también plantea retos ambientales que pueden comprometer el medio ambiente, por lo que es necesario implementar estas tecnologías, teniendo en cuenta estrategias que permitan reducir el impacto ecológico y la disminución de la huella de carbono (Guevara-Reyes et al., 2024).

Uso de Inteligencia Artificial (IA)

La inteligencia artificial (IA) ha mostrado ser una herramienta de importancia para muchos aspectos, y la agricultura no es la excepción, esta herramienta ha demostrado ser eficaz en la detección de plagas mediante análisis avanzados de imágenes, reconocimiento de patrones y algoritmos de aprendizaje automático; apoyando en la identificación de plagas en tiempo real, con mayor precisión que los métodos tradicionales, que suelen depender de inspecciones manuales, más lentas y menos precisas; lo anterior se ha demostrado a través de la utilización de redes neuronales convolucionales (CNN), que permiten entrenar modelos para reconocer características específicas de plagas en imágenes capturadas por drones o dispositivos móviles, lo que mejora notablemente la detección temprana y la toma de decisiones (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Otras evidencias señalan que la integración de IA con sensores avanzados, como cámaras hiperespectrales y térmicas, facilita la identificación de cambios en los cultivos asociados a la actividad de plagas, como variaciones en la temperatura o la reflectancia de las hojas; al analizar los datos en sistemas automatizados no solo permiten una detección más rápida, sino que también proporcionan recomendaciones sobre las intervenciones necesarias, optimizando el uso de pesticidas y reduciendo su impacto ambiental (Sujawat & Chouhan, 2021). Estas evidencias sugieren que la introducción de IA en la agricultura es posible gracias a avances tecnológicos como el análisis de macrodatos, la robótica, el internet, la disponibilidad de sensores accesibles y cámaras, la tecnología de drones e incluso la cobertura de internet en áreas rurales dispersas (Oyakhilomen & Zibah, 2014). Estas tecnologías de manera complementada están transformando la agricultura, esto a través de la mejora en la eficiencia y precisión del control de plagas, favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes, optimizando el uso de recursos y maximizando los rendimientos a la vez que se minimizan las pérdidas (Gastesi et al., 2024).

Es importante resaltar que estas herramientas son potenciadas por el uso de estrategias que permitan el análisis de datos de una manera eficiente y que ayude a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre la producción, basándose en la realidad y el comportamiento que los datos muestran sobre el clima, el suelo, las semillas, las plagas, las enfermedades, la cosecha y el mercado (Glackin, 2019).

La agricultura ha experimentado una revolución gracias a la adopción de tecnologías emergentes, lo que ha posibilitado una producción más eficiente, sostenible y capaz de adaptarse a los cambios. La agricultura de precisión aparece como un eje central que permite una gestión detallada y localizada de los cultivos mediante sensores, tecnología de tasa variable y sistemas automatizados de riego. Estos avances permiten optimizar el uso de los recursos y minimizar los impactos ambientales negativos. La inteligencia artificial ha resultado especialmente útil para detectar con anticipación plagas y enfermedades, mejorando la toma de decisiones y disminuyendo el uso excesivo de agroquímicos. Por otro lado, el uso de robots aún enfrenta desafíos técnicos y de aceptación social, pero promete mejoras significativas en la eficiencia operativa y la reducción de costos. Sin embargo, estos avances tecnológicos deben ponerse en marcha teniendo en cuenta su huella ecológica, como el manejo de los desechos electrónicos y el consumo energético, con el fin de evitar nuevos problemas ambientales. La presente revisión destaca que la adopción tecnológica debe ir acompañada de políticas de sostenibilidad, educación digital y acceso equitativo en el medio rural (tabla 1).

Tabla 1. Cuadro comparativo de las nuevas tecnologías en la agricultura.

Tecnología	Funciones	Beneficios	Ref.
Sensores IoT	Monitoreo en tiempo real de variables como humedad, temperatura y nutrientes del suelo.	Optimización del uso de recursos hídricos y fertilizantes.	Zambrano, 2020
VRT	Aplicación precisa de insumos (fertilizantes, pesticidas) según las necesidades específicas del terreno.	Eficiencia y productividad de los cultivos.	Nowak, (2021)
Sensores Remotos	Obtención de datos espaciales y temporales	Detección temprana de enfermedades y estrés hídrico.	Ashraf et al., (2023)

	mediante satélites o drones para monitorear cultivos.		
AshaRA	Control automático del suministro de agua basado en las necesidades del cultivo y condiciones climáticas.	Uso eficiente del agua.	Nonvide, 2024
Robots Agrícolas	Automatización de siembra, cosecha y control de plagas.	Precisión y eficiencia de operaciones agrícolas.	Guevara-Reyes et al., (2024)
IA	Análisis de grandes volúmenes de datos para optimizar decisiones agrícolas.	Incremento en el rendimiento agrícola.	Kamilaris et al., (2018); Sujawat et al., (2021)

VRT: Tecnología de Tasa Variable; IA: Inteligencia Artificial; RA: Riego Automatizado; Ref: Referencia.

Conclusión

La transformación digital del sector agrícola es esencial para enfrentar los desafíos del siglo XXI, como el cambio climático, la escasez de recursos y el aumento poblacional. Las nuevas tecnologías ofrecen soluciones prometedoras que mejoran la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Sin embargo, su éxito depende de una implementación equitativa, formación continua y evaluación de impactos ambientales. Es importante destacar que, para que estas tecnologías se introduzcan dentro del área agrícola, es importante la vinculación de diversas áreas del conocimiento, universidades, centros de investigación, iniciativa privada y gobierno, permitiendo una sinergia útil para potencializar los beneficios de las prácticas agrícolas.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por las becas de maestría brindadas a los beneficiarios J.C.T.-C. (CVU 2055508); S.L.-U. (CVU 2055592); M.A.L.-S. (CVU 2054751); C.M.L.-B. (CVU 2054822) y N.M.C.-O. (CVU 2054711).

Referencias

- Ashraf, A., Ahmad, L., Ferooz, K., Ramzan, S., Ashraf, I., Khan, J. N., Shehnaz, E., Ul-Shafiq, M., Akhter, S., & Nabi, A. (2023). Remote sensing as a management and monitoring tool for agriculture: potential applications. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(8), 324–343. <https://doi.org/10.9734/ijecce/2023/v13i81957>
- Avola, G., Distefano, M., Torrisi, A., & Riggi, E. (2024). Precision agriculture and patented innovation: State of the art and current trends. *World Patent Information*, *76*, 102262.
- Cob-Parro, A. C., Lalangui, Y., & Lazcano, R. (2024). Fostering agricultural transformation through AI: an open-source AI architecture exploiting the MLOps paradigm. *Agronomy*, *14*(2), 259. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020259>
- Gastesi, J. A., Mora, F. C., Villalba, J. G., & Litardo, R. M. (2024). Manejo integrado de cultivos y desarrollo sostenible. *Magazine de Las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, *9*(1), 22–35. <https://doi.org/10.33262/rmc.v9i1.3049>
- Glackin, M. (2019). Mejora de la predicción: el valor del conocimiento meteorológico sustentado en datos y en la colaboración pública y privada. *Boletín de la OMM*. *68*(1), 59- 63.

- Guevara-Reyes, R. J., Mendoza-Cela, J. U. R., Guerra-Triviño, O. L., & Villamar-Piguave, W. G. (2024). Avances actuales de la tecnología y su impacto en con el medio ambiente. *MQRInvestigar*, 8(4), 4289–4300. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.4289-4300>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147(1), 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Lascano, T. B. (2026). Fusión de IA, IoT y Big Data para Superar la Brecha de Interoperabilidad en Latinoamérica. *Arandu UTIC*, 13(1), 638–650. <https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.1937>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2020). From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Nonvide, G. M. A. (2024). Impact of irrigation on food and nutrition security among rice farmers in Benin. *The European Journal of Development Research*, 36(6), 1343–1371. <https://doi.org/10.1057/s41287-024-00638-9>
- Nowak, B. (2021). Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agricultural Research*, 10(4), 515–522. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00539-x>
- Oyakhilomen, O., & Zibah, R. G. (2014). Agricultural production and economic growth in Nigeria: Implication for rural poverty alleviation. *Quarterly Journal of International Agriculture*, 53(3), 207–223.
- Ozdogan, B., Gacar, A., & Aktas, H. (2017). Digital agriculture practices in the context of agriculture 4.0. *Journal of Economics Finance and Accounting*, 4(2), 186–193. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2017.448>
- Qiao, Y., Valente, J., Su, D., Zhang, Z., & He, D. (2022). AI, sensors and robotics in plant phenotyping and precision agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 13: 1064219. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064219>
- Sujawat, G. S., & Chouhan, J. S. (2021). Application of artificial intelligence in detection of diseases in plants: a survey. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(3), 3301–3305. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i3.1581>
- Trigo, E. J., & Elverdin, P. (2020). Los Sistemas de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de América Latina y el Caribe en el marco de los nuevos Escenarios de Ciencia y Tecnología. *Revista Compromiso Social*, 1(3), 116–127. <https://doi.org/10.5377/recoeso.v2i3.13437>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2024. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Zambrano, Á. L. (2020). Agricultura digital en el cultivo de Pitahaya. *Latin-American Journal of Computing*, 7(2), 22–33.

Formulación De Polvo Para Bebida: Aprovechamiento De Subproducto De La Industria Quesera

Powdered Beverage Formulation: Utilization of a By-product from the Cheese Industry

Sauce-Guevara M.A^{a*}, Guevara-Contreras J.C^b, Guerra-Martínez A.A^{c-d}, Rosas-Gallo A^e, Muñoz Rosales A.F^f.

- a) Departamento de Ciencias Químicas y Biológicas, Universidad de Las Américas Puebla, Puebla, México. mildred.saucega@udlap.mx.
- b) Departamento de ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico Superior de Atlixco, Puebla, México. juaguebiotec2018@gmail.com
- c) Laboratorio de Investigación Clínica y Ambiental, Departamento de Microbiología, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- d) Laboratorio de Investigación en Patología Experimental, Hospital Infantil de México Federico Gómez. aguerram2300@alumno.ipn.mx
- e) Departamento de Ingeniería de Alimentos, Universidad Tecnológica de Huejotzingo, Puebla, México. anabel.rosas@uth.edu.mx
- f) Departamento de Gestión de Negocios y Proyectos, Universidad Tecnológica de Huejotzingo, Puebla, México. anabel.rosas@uth.edu.mx

RESUMEN:

La valorización del lactosuero ácido, un subproducto contaminante de la industria quesera, representa un desafío tecnológico debido a su acidez y dificultad de secado. El objetivo de este estudio fue formular una base en polvo para bebida tipo frappé utilizando lactosuero ácido de queso Oaxaca, procesado mediante secado por aspersión ($T^{\circ}_{\text{entrada}} 220^{\circ}\text{C}$, $T^{\circ}_{\text{salida}} 90^{\circ}\text{C}$). Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y la aceptación sensorial del producto obtenido. El polvo resultante presentó un contenido de proteína de 11.17% y 78.68% de lactosa, con una humedad final del 4.5%. Se implementó un diseño factorial para la formulación de la bebida, logrando una viscosidad en el rango de 133-189 cP, adecuada para la sensación bucal deseada. La evaluación sensorial (prueba discriminativa A-No A, n=24) indicó que la formulación con mayor contenido de suero no presentó diferencias significativas ($p>0.05$) en sabor y textura respecto a una referencia comercial. Estos resultados demuestran la viabilidad técnica de reincorporar el suero ácido en la cadena alimentaria como ingrediente funcional sustentable.

PALABRAS CLAVE: Alimento, bebida, lactosuero, desperdicio, industria quesera.

ABSTRACT:

The valorization of acid whey, a polluting by-product of the cheese industry, poses a technological challenge due to its high acidity and difficult drying behavior. This study aimed to formulate a powdered base for a frappé-style beverage using acid whey from Oaxaca cheese, processed via spray drying ($T^{\circ}_{\text{inlet}} 220^{\circ}\text{C}$, $T^{\circ}_{\text{outlet}} 90^{\circ}\text{C}$). The physicochemical properties and sensory acceptance of the resulting powder were evaluated. The powder exhibited a protein content of 11.17% and 78.68% lactose, with a final moisture content of 4.5%. A factorial design was implemented for the beverage formulation, achieving a viscosity range of 133–189 cP, suitable for the desired mouthfeel. Sensory evaluation (A-Not A discriminative test, n=24) indicated that the formulation with the highest

whey content showed no significant differences ($p>0.05$) in flavor and texture compared to a commercial reference. These results demonstrate the technical feasibility of reincorporating acid whey into the food chain as a sustainable, functional ingredient.

KEYWORDS: Functional food, beverage, whey, waste, cheese industry.

INTRODUCCIÓN

La industria quesera es un sector estratégico en la agroindustria de México, destinando aproximadamente el 23% de la producción nacional de leche a la elaboración de quesos (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], s. f.). No obstante, este proceso genera grandes volúmenes de lactosuero, estimándose una producción anual superior a 2.4 millones de toneladas, de las cuales apenas el 50% es aprovechado (Mollera et al., 2013).

El vertido inadecuado de este subproducto representa un grave problema ambiental debido a su alta carga orgánica (DBO 35-45 kg/L), lo que demanda alternativas urgentes para su valorización bajo un esquema de economía circular (Dragone et al., 2009, Arango Bedoza & Sanchez e Sousa et al., 2009).

El lactosuero retiene cerca del 55% de los nutrientes de la leche, incluyendo proteínas de alto valor biológico (β -lactoglobulina, α -lactoalbúmina), lactosa y minerales (Smithers, 2008). Dependiendo del proceso de coagulación, se clasifica en dulce o ácido. El lactosuero ácido ($\text{pH} < 5.0$), subproducto típico de quesos de pasta hilada como el Oaxaca o frescos, presenta desafíos tecnológicos particulares para su industrialización. A diferencia del suero dulce, su alto contenido de ácido láctico y minerales dificulta su deshidratación, generando polvos higroscópicos que tienden a adherirse a las paredes de los equipos de secado, comprometiendo el rendimiento del proceso (Yousif. Et al., 1998). A pesar de estos retos de procesamiento, el lactosuero ácido posee un perfil sensorial idóneo para el desarrollo de bebidas refrescantes.

El mercado actual busca ingredientes que aporten funcionalidad tecnológica natural, como cuerpo, turbidez y sensación bucal cremosa, sin recurrir a hidrocoloides sintéticos (Jelen, 2011). Las proteínas del suero actúan como agentes texturizantes y emulsificantes, propiedades críticas para el desarrollo de bases para bebidas tipo frappé, donde la viscosidad y la estabilidad son atributos de calidad determinantes (Bylund, 2015). En este contexto, surge la interrogante sobre si es técnicamente viable transformar el lactosuero ácido de queso Oaxaca en un ingrediente en polvo estable sin el uso excesivo de coadyuvantes.

Se plantea la hipótesis de que el control de las variables de secado por aspersión permitirá obtener una base en polvo con propiedades fisicoquímicas y sensoriales adecuadas para su reincorporación en una bebida tipo frappé, superando las barreras de aceptación del consumidor. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue desarrollar una formulación de base en polvo para bebida, valorizando lactosuero ácido mediante secado por aspersión. El alcance del estudio se centra en evaluar la viabilidad técnica del proceso de secado, caracterizar las propiedades fisicoquímicas del polvo (humedad, proteína, solubilidad) y determinar el efecto de la formulación sobre la viscosidad y la aceptación sensorial de la bebida reconstituida, ofreciendo una alternativa tecnológica para la reducción del impacto ambiental de la industria quesera local.

METODOLOGÍA

Caracterización fisicoquímica del suero

Se recolectaron muestras de lactosuero provenientes de 10 lotes de producción de queso de pasta hilada (tipo Oaxaca) y fresco (tipo Panela) en la empresa Lácteos Avick (Puebla, México). Las muestras fueron

almacenadas en refrigeración (4°C) y analizadas por triplicado. Los parámetros fisicoquímicos se evaluaron conforme a las técnicas descritas en la Tabla 1.

Análisis Proximal y Fisicoquímico

- pH y Acidez: El pH se midió directamente mediante potenciometría (Método 981.12) utilizando un potenciómetro calibrado con soluciones buffer de pH 4.0 y 7.0. La acidez titulable se determinó volumétricamente titulando 10 mL de muestra con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador, reportando el resultado como porcentaje de ácido láctico (Método AOAC 947.05).
- Humedad y Sólidos Totales: Se determinaron por el método gravimétrico de secado en estufa. Se pesaron 2 g de muestra en cápsulas a peso constante y se sometieron a secado a $105\pm 2^\circ\text{C}$ hasta peso constante, cuantificando la pérdida de peso como humedad y el residuo como sólidos totales (AOAC 925.105).
- Proteína: Se cuantificó mediante el método Kjeldahl (AOAC 920.05). La muestra fue digerida con ácido sulfúrico concentrado y catalizadores de cobre, seguida de destilación y titulación del amonio liberado. El porcentaje de nitrógeno total se multiplicó por el factor de conversión 6.38 (específico para lácteos) para obtener el contenido proteico.
- Materia Grasa: Se empleó el método butirométrico de Gerber. La muestra se trató con ácido sulfúrico ($d=1.82$) y alcohol isoamílico para separar la grasa, la cual fue cuantificada tras centrifugación a 1100 rpm durante 5 minutos en butirómetros calibrados.
- Cenizas: Se determinaron por incineración de la muestra seca en una mufla a 550°C durante 4 horas hasta obtener cenizas blancas libres de carbón (AOAC 945.05).

Análisis Microbiológico

Para garantizar la inocuidad de la materia prima, se realizó el recuento de Bacterias Mesófilas Aerobias en agar cuenta estándar incubado a $35\pm 2^\circ\text{C}$ por 48 h (NOM-092-SSA1-1994). Asimismo, se cuantificaron Bacterias Ácido-Lácticas (BAL) mediante siembra en agar MRS incubado en condiciones anaerobias a 37°C por 48-72 h.

Tabla 1

Determinación	Técnica	Referencia
Humedad	Termogravimétrica	(Secretaría de Salud, 1995)
aw (actividad de agua)	Punto de rocío en un espejo enfriado	(NORMEX, 2018)
pH	Potenciometría	(NORMEX, 2010)
Acidez	Volumetría	(AOAC 947.05 International, 1990)
Proteína	Método AOAC 920.05	(AOAC 920.05 International, 1990)
Materia grasa	Butirométrica	(AOAC 989.04 International, 1990)
Cenizas	Método AOAC 945.05 / 90	(AOAC 945.05 International, 1990)
Sólidos solubles	Método AOAC 932.12 / 90	(AOAC 932.12 International, 1990)
Sólidos totales	Método AOAC 925.105 / 90	(AOAC 925.105 International, 1990)
Bacterias ácido lácticas (BAL)	Vertido en placa	(Secretaría de Salud, 1994)
Bacterias mesófilas aerobias (BMA)	Vertido en placa	(Zhao, et al., 2003)

Métodos analíticos para la caracterización del suero.

Criterio de Selección de la Materia Prima

Se seleccionó el lactosuero ácido (proveniente de queso Oaxaca) como materia prima exclusiva debido a su representatividad en la zona de estudio, constituyendo el 95% del volumen de efluentes generados por la planta procesadora (Lácteos Avick). Aunque el suero dulce presenta mayores facilidades tecnológicas para el secado, el objetivo de este trabajo fue mitigar el impacto ambiental del residuo mayoritario, asumiendo los retos de procesamiento inherentes a su acidez y composición mineral.

Descripción de Análisis Físicoquímicos

Para la determinación de proteína, se utilizó el método Kjeldahl ($N \times 6.38$), digiriendo 1 g de muestra con ácido sulfúrico concentrado. La materia grasa se cuantificó mediante el método volumétrico de Gerber, utilizando butirómetros calibrados para suero. La acidez titulable se determinó con NaOH 0.1N usando fenolftaleína como indicador, expresando el resultado como % de ácido láctico. El contenido de sólidos totales se obtuvo por gravimetría mediante secado en estufa a 105°C hasta peso constante.

Deshidratación del suero

Para la obtención del polvo, se utilizó exclusivamente lactosuero ácido de queso Oaxaca, el cual representa el 95% de la producción de la planta. El proceso se realizó en tres etapas:

1. Pasteurización del suero: El suero fue pasteurizado a 72°C durante 15 s y enfriado inmediatamente a 15°C (choque térmico) para asegurar su inocuidad microbiológica.

2. Evaporación al vacío: Se realizó una evaporación al vacío (Rotavapor Buchi R-300, presión de vacío 20 inHg) a 60°C hasta alcanzar una concentración de sólidos del 18% (18°Brix). Se procesó un volumen total de 22 L de suero concentrado.
3. Deshidratación: El concentrado se deshidrató en un secador por aspersión a escala piloto (Buchi B-290). Las condiciones de operación fueron: temperatura de entrada del aire 220°C, temperatura de salida 90±2°C y flujo de alimentación de 30 mL/min. Cabe destacar que no se utilizaron coadyuvantes de secado (como maltodextrina) con el fin de obtener un aislado proteico puro, decisión que implica asumir pérdidas por adherencia en cámara debido a la transición vítrea de la lactosa, pero garantiza la integridad composicional del ingrediente.

Diseño experimental y formulación

La viscosidad y la aceptación sensorial son factores determinantes en bebidas tipo frappé. Para optimizar estos parámetros, se implementó un diseño factorial completo 2^3 (tres factores, dos niveles), evaluando las interacciones entre: A) Concentración de lactosuero en polvo, B) Tipo de edulcorante y C) Tipo de saborizante. Se establecieron niveles altos (+1) y bajos (-1) para cada factor, realizando el experimento por duplicado para determinar los efectos significativos sobre la viscosidad.

Los factores y sus niveles reales (% p/p en la formulación seca) fueron: A) Lactosuero en polvo: Bajo (20%) - Alto (80%); B) Edulcorante: Bajo (0.05% EDULCORANTE A) - Alto (0.01% EDULCORANTE B); C) Saborizante: Bajo (0.2% SABOR A) - Alto (1% SABOR B).

La validación estadística del modelo se realizó evaluando el Coeficiente de Determinación (R^2) y el R^2 ajustado. Se consideró un ajuste satisfactorio para valores de $R^2 > 0.85$. Asimismo, se analizó la gráfica de residuos para verificar los supuestos de normalidad y homocedasticidad, asegurando que el modelo predictivo para la viscosidad fuera robusto dentro del espacio de diseño evaluado.

Una bebida tipo frappé en polvo requiere integrar criterios fisicoquímicos y sensoriales bajo un enfoque estadístico robusto. En este estudio se aplicó un diseño factorial completo 2^3 , metodología ampliamente validada en optimización de formulaciones alimentarias, que permite evaluar efectos principales e interacciones entre factores con alta eficiencia experimental.

Se evaluaron tres factores con dos niveles cada uno:

- **A) Concentración de lactosuero en polvo** (bajo y alto % p/p)
- **B) Tipo de edulcorante** (nivel bajo: Edulcorante A; nivel alto: Edulcorante B)
- **C) Tipo de saborizante** (nivel bajo: Sabor A; nivel alto: Sabor B)

El diseño 2^3 generó ocho tratamientos experimentales, ejecutados por duplicado para mejorar la estimación del error experimental y la significancia estadística. La variable respuesta primaria fue la viscosidad aparente (medida reológicamente bajo condiciones controladas de cizalla), complementada con evaluación sensorial hedónica para aceptación global y atributos de textura y sensación en boca.

Relación entre viscosidad y percepción del sabor

La viscosidad es un atributo crítico en bebidas tipo frappé por tres razones principales:

1. **Modulación de la liberación de compuestos aromáticos**
Sistemas más viscosos reducen la movilidad de compuestos volátiles, prolongando su permanencia en cavidad oral y modulando la intensidad
2. **Sensación en boca (mouthfeel) y percepción de cuerpo**
La viscosidad contribuye directamente al “cuerpo” de la bebida. Una mayor viscosidad se asocia con mayor cremosidad y plenitud sensorial, atributos altamente valorados en bebidas tipo frappé
3. **Interacción dulzor-textura**

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Existe evidencia de que el aumento de viscosidad puede potenciar la percepción del dulzor mediante efectos cognitivos y sensoriales cruzados (cross-modal interactions), incluso cuando la concentración de azúcares permanece constante.

Por tanto, la optimización no busca maximizar la viscosidad indiscriminadamente, sino identificar el rango óptimo que equilibre estabilidad física, facilidad de consumo y aceptación sensorial.

Interpretación esperada del diseño factorial

El análisis estadístico (ANOVA factorial) permite identificar:

- Efecto principal de la concentración de lactosuero sobre la viscosidad.
- Interacción A×B: posible modificación estructural del sistema dependiendo del tipo de edulcorante.
- Interacción A×C: influencia de la matriz proteica sobre la liberación aromática.
- Interacciones triples (A×B×C): sinergias complejas que pueden impactar simultáneamente textura y aceptación.

Este enfoque experimental es consistente con metodologías de optimización en ingeniería de alimentos y permite establecer formulaciones con respaldo estadístico robusto.

Determinación de viscosidad

Las mediciones reológicas se realizaron en un reómetro digital programable (Brookfield modelo RVDV-III) equipado con el software Rheocal y sonda de temperatura. Se utilizaron muestras de 350 mL en vasos de precipitado de 600 mL, empleando el husillo (spindle) número 4. El protocolo de medición consistió en un barrido de cizalla entre 20 y 240 rpm, con intervalos de 10 s y un tiempo de espera de 10 s entre lecturas. Para fines de este estudio y facilitar la comparación con bebidas comerciales similares, los valores de viscosidad aparente se reportan en centipoise (cP).

Análisis sensorial de la formulación en polvo para la bebida. Prueba A no A (ISO 8588:1987)

Con base en los resultados reológicos, se seleccionaron las dos formulaciones experimentales más estables (Formulación A: Nivel Alto de suero; Formulación B: Nivel Bajo). Se aplicó una prueba discriminativa "A - No A" conforme a la norma ISO 8588:1987 para determinar si existían diferencias perceptibles respecto a una referencia comercial (Bebida SX) (Zhao, et al., 2003). El panel estuvo conformado por 24 jueces no entrenados. Se presentaron las tres muestras (Referencia, A y B) codificadas aleatoriamente, registrando las frecuencias de identificación positiva.

Análisis estadístico

Los datos fisicoquímicos y de viscosidad se analizaron mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$) utilizando el software Minitab. Para la evaluación sensorial, los datos de frecuencia se analizaron mediante la prueba de Chi-cuadrada (X^2) para establecer la independencia entre las formulaciones y la percepción de los jueces respecto a la referencia comercial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la Materia Prima

El lactosuero ácido de queso Oaxaca presentó un pH de 6.41 ± 0.12 y una acidez titulable característica. A diferencia del suero dulce (Tabla 2), el suero ácido mostró un menor contenido de lactosa (4.48) y proteína

(1.25), pero una mayor concentración de grasa (0.29). Estos valores difieren ligeramente de los reportados clásicamente, lo cual puede atribuirse a las variaciones estacionales de la leche y al proceso específico de acidificación e hilado del queso Oaxaca (Rocha-Mendoza et al., 2021). A pesar de tener menor carga proteica que el suero dulce, el volumen generado (30,000 L/día) justifica su recuperación para evitar el impacto ambiental de su vertido (DBO alta).

Tabla 2

Tipo de suero / Parámetro	Suero del queso Panela (Dulce)	Suero del queso Oaxaca (Ácido)
Temperatura	20 °C	20 °C
Apariencia	Líquido verdoso turbio	Líquido Amarillento turbio
pH	6.36 ± 0.150	6.41 ± 0.124
% de grasa	0.15 ± 0.016	0.29 ± 0.062
% de proteína	1.3 ± 0.018	1.25 ± 0.029
% de lactosa	5.8 ± 0.087	4.48 ± 0.047
% de sales minerales	0.72 ± 0.09	0.75 ± 0.004
% de sólidos no grasos	7.46 ± 0.06	6.47 ± 0.04
% de sólidos totales	7.57 ± 0.04	6.76 ± 0.05
% de humedad	93.4 ± 0.071	93.24 ± 0.05

Resultados obtenidos para la caracterización fisicoquímica del lactosuero.

Proceso de Deshidratación y Balance de Masas

Se procesaron 22 L de suero concentrado (18° Brix) obteniendo 2 kg de polvo, con un tiempo de residencia de 30 min por lote. El rendimiento del 50% se explica por la ausencia de coadyuvantes de secado; la alta concentración de ácido láctico en el suero Oaxaca reduce la temperatura de transición vítrea (Tg) de la lactosa, provocando adherencia en las paredes del secador (Bhandari et al., 2013).

El polvo obtenido presentó un color amarillo crema y un contenido proteico del 11%, con una humedad final del 4.5%, cumpliendo con los estándares para polvos higroscópicos (<5%). La solubilidad y el sabor "lácteo-salado" fueron característicos de los sueros ácidos desmineralizados parcialmente.



Figura 1. Apariencia del suero deshidratado por aspersión. Se utilizó un secador Spray dryer debido a sus características que garantizan la uniformidad en el tamaño de partícula del producto (malla 40). Muestra representativa.

Tabla 3

Análisis Físicoquímico		Análisis microbiológico	
Proteína	11%	Cuenta estándar (10,000 UFC/g)	
Lactosa	78%	Hongos y levaduras	10 UFC/g
Humedad	4.5%	Coliformes	Negativo
Grasas	1%	<i>E. coli</i>	Negativo
pH (sol. 10% a 20°C)	6	Salmonella (750g)	Negativo
Acidez (sol. 10%)	.18%	<i>Estafilococos coagulasa</i>	Negativo
Cenizas	10%		
Color	Amarillo crema		
Sabor	Ligero, dulce-salado		
Olor	Lácteo		

Resultados obtenidos para la caracterización físicoquímica y microbiológica del lactosuero deshidratado

Efecto de la Formulación en la Viscosidad

El análisis de varianza (ANOVA) del diseño factorial (Tabla 4) reveló que la concentración de lactosuero (Factor C) tuvo el efecto más significativo ($p < 0.05$) sobre la viscosidad, elevándola hasta 189 cP en la interacción ABC (Niveles altos).

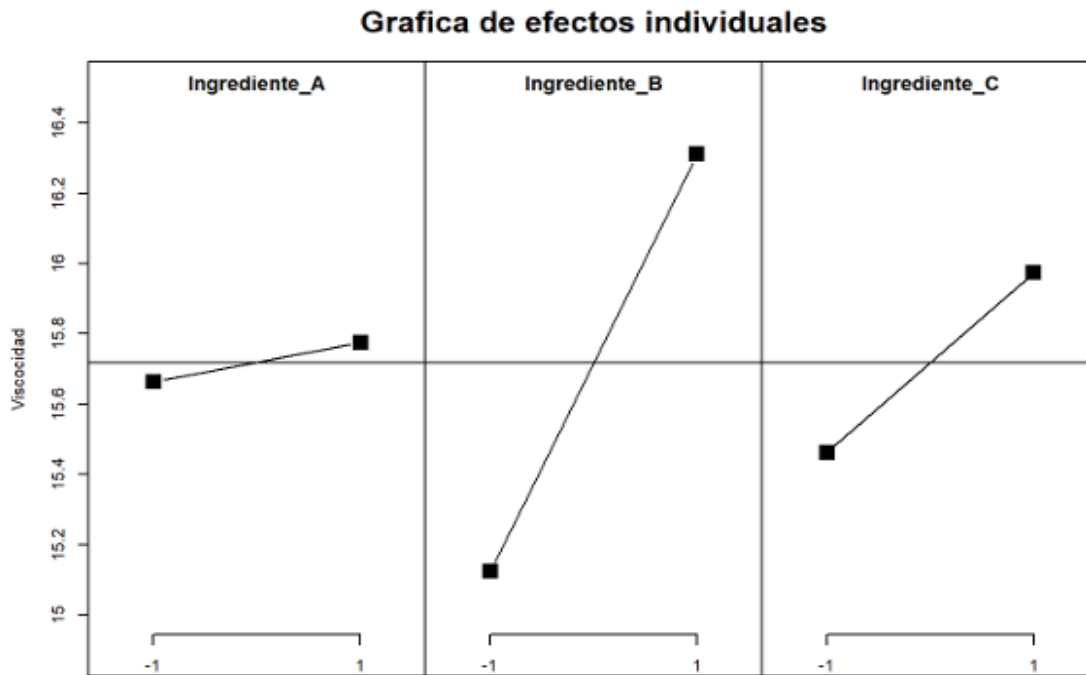
Tabla 4

Ingrediente A	Ingrediente B	Ingrediente C	Viscosidad (Expresado en cp)
-1	-1	-1	133+ 0.03
+1	-1	-1	147+ 0.06
-1	+1	-1	146+ 0.03
+1	+1	-1	143+ 0.04
-1	-1	+1	169+ 0.07
+1	-1	+1	155+ 0.06
-1	+1	+1	174+ 0.03
+1	+1	+1	189 + 0.05

Efecto de la concentración de los ingredientes A, B y C en la viscosidad de la bebida estilo frappé

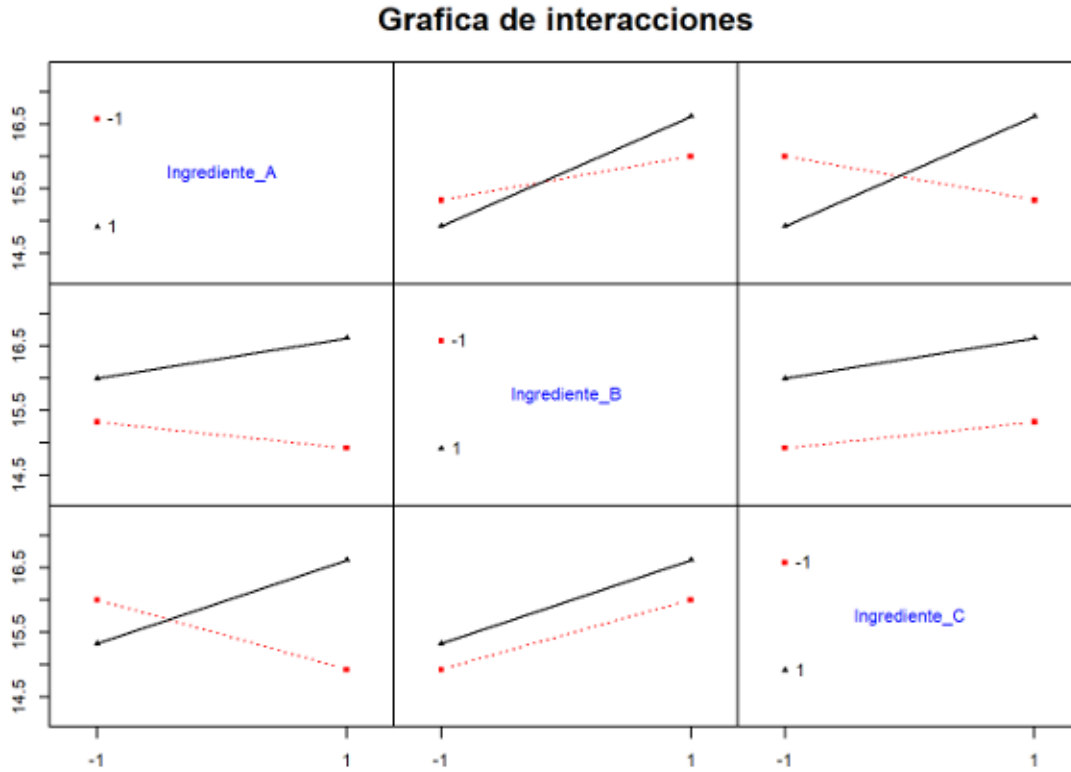
Análisis de Interacciones

Se observó una interacción positiva significativa entre el lactosuero y el edulcorante/saborizante. Mientras que el ingrediente B (Saborizante) generó variabilidad, el ingrediente C (Lactosuero) aportó estabilidad a la matriz. Esto sugiere que las proteínas del suero actúan como hidrocoloides naturales, ligando agua y creando cuerpo en la bebida, una propiedad funcional deseable en productos tipo frappé para evitar la separación de fases tras el licuado (Gráficas 1 y 2).



Gráfica 1. *Efectos individuales.* Se muestran los efectos individuales que muestra cómo los ingredientes A, B y C afectan la viscosidad de la bebida.

En el Gráfico 1 se observa que el ingrediente A tiene un efecto mínimo sobre la viscosidad, ya que la pendiente de la línea que conecta los niveles bajos (-1) y altos (1) es prácticamente plana. Esto indica que los cambios en la concentración de este ingrediente no generan variaciones significativas en la viscosidad. En contraste, el ingrediente B presenta un efecto positivo pronunciado, con un aumento notable en la viscosidad al pasar de un nivel bajo a uno alto. Sin embargo, esta variabilidad sugiere que el ingrediente B podría no proporcionar estabilidad en términos de viscosidad, lo que podría limitar su utilidad en la formulación. Finalmente, el ingrediente C también muestra un efecto positivo sobre esta propiedad, aunque con una pendiente menos pronunciada. Esto sugiere que el ingrediente C ofrece un rango más controlado y estable de viscosidad, lo cual es deseable para garantizar la consistencia en la preparación de la bebida. (Zhao, et al., 2003).



Gráfica 2. *Gráfica de interacciones.* Se muestran las interacciones en donde se evalúa cómo los ingredientes A, B y C interactúan entre sí en relación con la viscosidad de la bebida. Cada celda representa la interacción entre dos ingredientes. Se omiten los efectos individuales en la diagonal.

En el gráfico 2 se analizaron los efectos combinados de los ingredientes A, B y C. Cada celda representa la interacción entre dos ingredientes, mientras que las líneas muestran cómo cambia la viscosidad al variar los niveles de cada ingrediente (de -1 a 1). Las pendientes y paralelismos de las líneas permiten identificar interacciones significativas.

La interacción entre los ingredientes A y B muestra líneas no paralelas, lo que indica que el efecto del ingrediente B sobre la viscosidad depende del nivel del ingrediente A. De manera similar, las interacciones entre A y C, así como entre B y C, también presentan líneas no paralelas, sugiriendo que los efectos de C varían según los niveles de A y B.

Estas interacciones son relevantes para la formulación de la bebida, ya que la viscosidad final no solo depende de los efectos individuales de los ingredientes, sino también de cómo se potencian o contrarrestan entre sí. Particularmente, el ingrediente C muestra un comportamiento más estable en sus interacciones, lo que lo posiciona como un componente clave para lograr una viscosidad controlada y consistente en la bebida tipo frappé.

Formulación Final

Con base en la viscosidad, se evaluaron dos formulaciones finales (Tabla 5) mediante mezcla en seco (dry blending):

- Formulación A (Alto Suero): 98.3% Suero en Polvo, sin agentes de carga.

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

- Formulación B (Bajo Suero): 20% Suero en Polvo, utilizando maltodextrina (79.76%) añadida externamente como agente de carga (filler) para completar el volumen.

Tabla 5

Ingrediente	Formulación A	Formulación B
Lactosuero en polvo	98.3 %	20 %
Saborizante	1 %	0.02 %
Colorante	0.2 %	0.2 %
Edulcorante	0.5 %	0.02 %
Maltodextrina (Vehículo)	0 %	79.76 %

Formulaciones en polvo para bebida.

Evaluación Sensorial

La prueba discriminativa A-No A (Tabla 6) permitió establecer la similitud de las formulaciones experimentales con la referencia comercial. El análisis de Chi-cuadrada (X^2) reveló comportamientos opuestos entre las muestras:

- Formulación A (Alto Suero): Obtuvo un valor de $X^2 = 2.42$ con un valor $p = 0.119$. Al ser $p > 0.05$, no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, lo que indica que no hay diferencias significativas perceptibles entre la bebida de suero puro y la referencia comercial.
- Formulación B (Bajo Suero): Presentó un valor de $X^2 = 5.68$ con un valor $p = 0.017$. Dado que $p < 0.05$, se concluye que esta formulación es significativamente diferente a la referencia comercial, siendo rechazada por su perfil sensorial inferior atribuido al exceso de agentes de carga (maltodextrina).

Estos resultados demuestran que la sustitución extensiva de sólidos lácteos por agentes de carga (maltodextrina en Formulación B) altera significativamente la percepción del producto. Por el contrario, el uso mayoritario de lactosuero ácido (Formulación A) permitió replicar con éxito el perfil integral de la bebida comercial sin necesidad de enmascaradores complejos, validando la viabilidad de usar este subproducto como base estructural de la bebida.

Tabla 6

Respuestas dadas	Formulación en polvo para la bebida		
	SX (532)	Formulación A (604)	Formulación B (721)
A	19	14	11
No- A	5	10	13

Resultados de la evaluación sensorial

CONCLUSIONES

La presente investigación demostró la viabilidad técnica de valorizar el lactosuero ácido de queso Oaxaca, un subproducto regional de difícil manejo, mediante su transformación en una base en polvo para bebidas. Se logró estabilizar una matriz compleja, caracterizada por su alta acidez y contenido mineral, obteniendo un ingrediente tecnológicamente funcional capaz de aportar cuerpo y estructura a bebidas tipo frappé.

Desde la perspectiva sensorial, se comprobó que la incorporación de este suero como ingrediente mayoritario (sin dilución excesiva con agentes de carga) permite replicar el perfil de sabor y textura de bebidas comerciales. La ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) entre la formulación experimental y la referencia de mercado valida el potencial del lactosuero ácido para ser reintroducido en la cadena de valor alimentaria, no solo como un relleno barato, sino como un componente estructural competente.

Sin embargo, se reconoce como principal limitación del estudio el bajo rendimiento de secado (~50%) obtenido a escala piloto. La ausencia de coadyuvantes de secado en la alimentación del atomizador, si bien permitió obtener un aislado puro, expuso la susceptibilidad del suero ácido al fenómeno de pegajosidad (stickiness) debido a la depresión de la temperatura de transición vítrea (T_g). Por lo tanto, futuras investigaciones deberán enfocarse en la optimización del proceso mediante el uso de portadores de bajo índice glucémico o la modificación del pH previo al secado, buscando un equilibrio entre la eficiencia industrial y la pureza nutricional. Este trabajo sienta las bases para pasar de un modelo lineal de desecho a un esquema de economía circular en la industria quesera local.

AGRADECIMIENTOS

M.A.S.G y A.A.G.M agradecen a CONHACYT por la beca de manutención brindada. A.A.G.M agradece al laboratorio de Investigación Clínica y Ambiental, Departamento de Microbiología, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional y al Laboratorio de Investigación en Patología Experimental, Hospital Infantil de México Federico Gómez.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

J.C.G.C, por la investigación, metodología, M.A.S.G, A.A.G.M, por el análisis de datos, análisis formal, y edición, A.R.G, A.F.M.R por la revisión y conceptualización del escrito.

FINANCIACIÓN

Los autores/as declaran que no ha existido financiación para realizar este estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que no existen conflictos de interés al redactar el manuscrito.

REFERENCIAS

- Arango Bedoya, O., & Sánchez e Sousa, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(2), 24–31.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 920.05: Fat in meat). AOAC International.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 925.105: Soluble solids in fruit juices). AOAC International.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 932.12: Total fat in milk). AOAC International.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 945.05: Protein in meat and meat products). AOAC International.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 947.05: Moisture in meat). AOAC International.
- AOAC International. (1990). Official methods of analysis (15th ed., Method 989.04: Determination of ascorbic acid in foods). AOAC International.
- Bhandari, B. R., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (Eds.). (2013). *Handbook of food powders: Processes and properties*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098672>
- Bylund, G. (2015). *Dairy processing handbook* (3rd ed.). Tetra Pak.
- Dragone, G., Mussatto, S. I., Oliveira, J. M., & Teixeira, J. A. (2009). Characterisation of volatile compounds in an alcoholic beverage produced by whey fermentation. *Food Chemistry*, 112(4), 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.005>
- Jelen, P. (2011). Whey processing. In J. W. Fuquay, P. F. Fox, & P. L. H. McSweeney (Eds.), *Encyclopedia of dairy sciences* (2nd ed., pp. 731–738). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00512-1>
- Mollea, C., Marmo, L., & Bosco, F. (2013). Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry, in food industry. In *Food industry*. InTech. <https://www.intechopen.com/books/food-industry/valorisation-of-cheese-whey-a-by-product-from-the-dairy-industry>
- NORMEX. (2010). NMX-F-102-NORMEX-2010, alimentos y bebidas. Determinación de proteínas en alimentos. Método de Kjeldahl.
- NORMEX. (2018). NMX-F-621-NORMEX-2018, alimentos y bebidas. Determinación de la cantidad de azúcares totales por el método de HPLC.
- Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badillo-Zeferino, G., Miyagusuku-Cruzado, G., et al. (2021). Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262–1275. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19038>

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

- Secretaría de Salud. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994, bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Salud. (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-1994, bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4728942&fecha=15/08/1994
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (s. f.). Estadística de producción pecuaria: leche de bovino. http://infosiap.siap.gob.mx/anpecuario_siapx_gobmx/ResumenNacional.do
- Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins—From “gutter-to-gold”. *International Dairy Journal*, 18(8), 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>
- Yousif, A. K., Abou-Eisheh, M. A., Humaid, M. A., & Tabbaa, M. J. (1998). Concentration of acidic whey and its functionality in French type bread. *International Journal of Dairy Technology*, 51(3), 72–76.
- Zhao, B., Basir, O. A., & Mittal, G. S. (2003). Correlation analysis between beverage apparent viscosity and ultrasound velocity. *International Journal of Food Properties*, 6(3), 443–448. <https://doi.org/10.1081/JFP-120020115>