



UNACAR[®]
Universidad Autónoma del Carmen
"Por la Grandeza de México"

Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen

Julio- Diciembre
2024

Número 119
ISSN 2594 1658





Fotografía de portada realizada por los autores de los artículos contenidos en esta edición especial.

Dra. Marcela Rangel Marrón
Coordinadora de la Edición Especial

Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen No. 119, Julio - Diciembre 2024, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Carmen, a través de la Dirección General de Extensión Universitaria, por el Departamento de Fomento Editorial, Av. 56 No. 4 Col. Benito Juárez. C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, teléfono 3811018, www.unacar.mx. Editor responsable LDG. Ana Isabel Polkey Gómez, Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2015-042113060500-203. ISSN 2594-1658. Responsable de la última actualización de este número, Coordinación de Informática Administrativa UNACAR, Ingeniero Raúl Arturo Peralta. Calle 56 número 4, esquina avenida Concordia. Col. Benito Juárez. C.P. 24180. Ciudad del Carmen, Campeche. Fecha de última modificación, 10 de diciembre del 2024.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma del Carmen.

Dra. Sandra Martha Laffon Leal
Rectora

Mtro. Juan Pablo Cetina Monterrey
Secretario General

Dra. Heidi Angélica Salinas Padilla
Secretaria Académica

Mtro. Joel Adir Acuña Gálvez
Director General de
Extensión Universitaria

Mtra. Yuridia Raquel Velasco Sosa
Directora de Difusión Cultural

LDG. Ana Isabel Polkey Gómez
apolkey@delfin.unacar.mx
Jefa de Fomento Editorial
Editor responsable
Diagramación

Lic. Eduardo Martínez Hernández
Corrector de estilo

Directorio

Dr. Ricardo Armando Barrera Cámara
Facultad de Ciencias de la Información

MMI. Rafael Ferrer Méndez
Facultad de Ciencias Educativas

Dra. Myrna Delfina López Noriega
Facultad de Ciencias Económicas
Administrativas

Dra. Lucely Maas Góngora
Facultad de Ciencias de la Salud

Dr. Carlos Montalvo Romero
Facultad de Química

Dr. Leonardo Palemón Arcos
Facultad de Ingeniería

Dra. María Elena Reyes Monjaras
Facultad de Derecho

Comité Editorial

Representantes Invitados

Dra. Ana Alberta Canepa Saézn
Facultad de Ciencias de la Información

Dra. Angélica Gabriela Vital Ocampo
Facultad de Química

5.- ELABORACIÓN DE PAN DE CAJA
SUSTITUYENDO PARCIALMENTE HARINA
DE TRIGO POR HARINA DE SORGO

Cassandra Yamileth Lagunes San Agustín
Adelfo García Ceja
José Jaime Vázquez Bravo
Guadalupe Gabriela Bárcena Vicuña
Emma Mani López
Arely León López

14.- SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS
DE ORO CON EXTRACTO ACUOSO DE
MORINGA (*MORINGA OLEIFERA*)

Heidi Yamilet Pérez Hernández
Aleida Selene Hernández Cázares
Marcela Rangel Marrón
Marlon Rojas López
Genaro Gustavo Amador Espejo
María Antonieta Ríos Corripio

26.- EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS
DE PRODUCCIÓN DE *ARTHROSPIRA*
MAXIMA EN PRIMAVERA BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO EN
CLIMA SEMITROPICAL

Wenndy López Wong
Ma. Antonieta Ríos Corripio
Ma. Rocío Torres López
Leticia Mora Soler
Carlos Fernando Gómez Merino
Aleida Selene Hernández Cázares

36.- FERMENTACIÓN DE GRANOS DE
CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*) Y SU
EFECTO EN LA CALIDAD EN TAZA EN
LATINOAMÉRICA

M. Dreidi Bocarando Guzmán
Roselia Servín Juárez
M. Antonieta Ríos Corripio
J. Valente Hidalgo Contreras
Esteban Escamilla Prado
Aleida Selene Hernández Cázares

47.-

CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES A BASE DE PURÉ DE COCO (*COCOS NUCIFERA L.*) COMO UNA ALTERNATIVA DE EMPAQUE

Bernardo Vázquez Ovando
Rosalinda Ovando Cáceres
Julia Griselda Cerón Bretón
Rosa María Cerón Bretón
Marcela Rangel Marrón

58.-

BARRAS NUTRITIVAS CON MERMELADA A BASE DE MARACUYÁ

Vanessa Irais Romero Vega
Johana Ramírez Hernández
Guadalupe Gabriela Bárcena Vicuña
Adelfo García Ceja

Contenido

La Red de colaboración académica “Nuevas Tecnologías de Conservación y Desarrollo de alimentos” inicio en 2018 y es hasta 2023 que se genera el registro ante la Dirección General de Investigación y Posgrado. El objetivo de la red es, unificar la experiencia de cada integrante a partir de las líneas de investigación que cada uno cultiva, fomentando el intercambio de conocimiento, experiencia en la investigación y trabajo colaborativo entre los investigadores. La Red está conformada por el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba (COLPOS-Córdoba), Instituto Tecnológico Superior de Atlixco, Universidad de las Américas-Puebla (UDLAP), Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) y la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).

Como parte de las actividades de la red, se realizó el primer Seminario de Investigación Multidisciplinario “Fortaleciendo la transferencia de conocimiento y tecnología en los alimentos” que se llevó a cabo del 25 al 27 de septiembre de 2024 de manera híbrida.

En esta ocasión la Revista Acalán divulga el conocimiento generado de los investigadores pertenecientes a la red como *Elaboración de pan caja sustituyendo parcialmente harina de trigo por harina de sorgo* de la Universidad de las Américas-Puebla y TecNM Campus Venustiano Carranza. Por parte del Colegio de postgraduados Campus Córdoba participaron con los manuscritos titulados: *Síntesis verde de nanopartículas de oro con extracto acuoso de moringa (Moringa oleífera)*, *Evaluación de los parámetros de producción de Arthrospira máxima en época de primavera bajo condiciones de invernadero en clima semitropical* y un artículo de revisión titulado *Fermentación de granos de café (Coffea arábica L.) y su efecto en la calidad en taza en latinoamérica*. La Universidad Autónoma del Carmen presenta su artículo de investigación titulado *Caracterización de películas comestibles a base de puré de coco (Cocos nucifera L.) como una alternativa de empaque*. Cada manuscrito presentado fue evaluado por pares académicos pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadores del CONAHCYT.

Estimado lector, en las páginas siguientes encontraras conocimiento enriquecedor en la Conservación y Desarrollo de alimentos, investigaciones colaborativas que contribuyen a la Soberanía Alimentaria del País. Bienvenido!

Dra. Marcela Rangel-Marrón
Profesora-Investigadora de la Facultad de Química
de la Universidad Autónoma del Carmen.
Líder de la Red de colaboración académica
“Nuevas Tecnologías de Conservación y Desarrollo de alimentos”

ELABORACIÓN DE PAN DE CAJA SUSTITUYENDO PARCIALMENTE HARINA DE TRIGO POR HARINA DE SORGO

BREAD FORMULATION PARTIALLY REPLACING WHEAT FLOUR WITH SORGHUM FLOUR

Cassandra Yamileth Lagunes San Agustín⁽¹⁾
 Adelfo García Ceja⁽¹⁾
 José Jaime Vázquez Bravo⁽¹⁾
 Guadalupe Gabriela Bárcena Vicuña⁽²⁾
 Emma Mani López⁽³⁾
 Arely León López^{*(1)}

RESUMEN

Se elaboró pan de caja sustituyendo parcialmente harina de trigo por harina de sorgo en proporción 2:1 (harina de trigo: harina de sorgo) y se almacenó por 5 días a 25°C. Adicionalmente se evaluó la textura, la relación ancho/alto y la aceptación sensorial del pan control (100% harina de trigo) y parcialmente sustituido con harina de sorgo (PSHS), frescos; mientras que, el color y la estabilidad microbiológica se analizaron en ambos panes, frescos y después de 5 días de almacenamiento. El color no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) en cuanto a los parámetros a^* y b^* , sin embargo, la luminosidad aumentó en la corteza y miga del pan control y miga del pan PSHS, presentando diferencias significativas ($p < 0.05$) después de 5 días. La dureza del pan PSHS fue significativamente ($p < 0.05$) menor que la del pan control, la relación ancho/alto y el nivel de aceptación sensorial fue similar ($p > 0.05$) en los dos panes. Los

recuentos microbianos muestran que el proceso de elaboración del pan cumple con las buenas prácticas de manufactura al obtener recuentos < 10 UFC/g en los panes recién hechos, mientras que, después de 5 días tuvieron conteos < 50 UFC/g para mohos y levaduras y $< 15\ 000$ UFC/g en bacterias mesófilas aerobias, por lo que, son seguros para su consumo. El pan PSHS (33%) formulado cumple con las características físicas, sensoriales y microbiológicas de un pan de caja convencional.

Palabras clave: Pan de caja, pan parcialmente sustituido con harina de sorgo, propiedades físicas, evaluación sensorial, calidad microbiológica

ABSTRACT

Bread was made by partially replacing wheat flour with sorghum flour in a ratio 2:1 (wheat flour: sorghum flour) and stored for 5 days at 25 °C. In addition, the texture, width/height ratio and sensory acceptance of the control bread (100% wheat flour) and bread partially replaced with sorghum flour (PRSF), fresh, were evaluated; whereas color and microbiological stability were analyzed in both breads, fresh and stored by 5 days. The color did not present significant differences ($p > 0.05$) in a^* and b^* parameters; however, the luminosity increased in the crust and crumb of the control bread and crumb of bread PRSF presenting significant differences ($p < 0.05$) after 5 days. The hardness of bread PRSF was significantly ($p < 0.05$) lower than control bread, the width/height ratio and the level of sensory acceptance were similar ($p > 0.05$) in the two breads. Microbial counts show that breadmaking process fulfills the good manufacturing practices since all microbial counts were < 10 CFU/g in fresh breads whereas after 5 days, they had counts < 50 CFU/g for molds and yeasts and $< 15\ 000$ CFU/g in aerobic

⁽¹⁾TecNM Campus Venustiano Carranza, Avenida Tecnológico s/n, Col. El Huasteco, Ciudad Lázaro Cárdenas, C.P. 73049, Puebla. México. *arely.leon@itsvc.edu.mx y adelfo.ceja@itsvc.edu.mx ⁽²⁾Instituto Tecnológico Superior de Atlixco, Prolong. Heliotropo 1201 Col. Vista Hermosa C.P. 74218, Atlixco, Puebla. MÉXICO. baviga@yahoo.com.mx ⁽³⁾Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir S/N. C.P. 72810. San Andrés Cholula, Puebla. MÉXICO. emma.mani@udlap.mx y emma_ml@yahoo.com.mx

mesophilic bacteria; therefore, they are safe for consumption. The formulated bread PRSF (33%) meets the physical, sensory, and microbiological characteristics of a conventional bread.

Keywords: Bread, bread partially replaced with sorghum flour, physical properties, sensory evaluation, microbiological quality

INTRODUCCIÓN

Los cereales son las semillas de las gramíneas, constituyen la principal fuente de energía en la dieta debido a su alto valor energético y su bajo costo en comparación con otros alimentos; además, que se cultivan con facilidad y se pueden almacenar por periodos largos. Dentro de ellos se incluyen el maíz, trigo, arroz, cebada, avena y sorgo. El sorgo (*Sorghum bicolor*), es el quinto cereal más importante en producción después del arroz, trigo, maíz y cebada. Constituye el principal grano alimenticio para más de 750 millones de personas que viven en los trópicos semiáridos de África, Asia y América Latina (McGinnis y Painter, 2020). El sorgo aporta 70-80% de hidratos de carbono, 8-18% de proteínas, 1-5% de lípidos, 19% de fibra dietética, 132 µg/g de calcio, 1496 µg/g de magnesio, 286 µg/g de fósforo, 1.54 mg/100 g de zinc, 4.4 mg/100 g de hierro, 28 mg/100 g de calcio, 2.92 mg/100 g de niacina, 0.24 mg/100 g de tiamina, 0.59 mg/100 g de vitamina B6 y 0.81 mg/100 g de vitamina E (Tanwar et al., 2023). El sorgo también contiene compuestos bioactivos entre los que destacan α -tocoferol (1.22-5.26 µg/100 g), espermidina (0.5-18.7 mg/kg), espermina (2.7-27.2 mg/kg), β -sitosterol (17.75-32.32 mg/kg), ácido ferúlico (120.5-173.5 mg/g), ácido p-cumárico (41.9-71.9 mg/g), ácido siríngico (15.7-17.5 mg/g), ácido vinílico (15.4-23.4 mg/g), ácido gálico (14.8-21.5 mg/g), ácido cafeico (13.6-20.8 mg/g) y ácido cinámico (9.8-15.0 mg/g) (Tanwar et al., 2023). Su aporte de aminoácidos esenciales incluye: triptófano (0.124 g/100 g), treonina (0.346 g/100 g), isoleucina (0.433 g/100 g), leucina (1.49 g/100 g), lisina (0.229 g/100 g), metionina (0.169 g/100 g), fenilalanina (0.546 g/100 g), valina (0.561 g/100 g) e histidina (0.246 g/100 g) (USDA, 2019). El sorgo destaca nutrimentalmente sobre el arroz y el maíz en sus niveles de proteínas, fibra, lisina, vitamina E y compuestos bioactivos (Hassan, 2023). El sorgo es una alternativa para el desarrollo de alimentos debido a la demanda de productos con mayor contenido de fibra, lo que está relacionado con la liberación gradual de glucosa en sangre; además, provee compuestos funcionales de tipo

fenólico con función antioxidante, antihipertensiva y antimicrobiana (Simnadis et al., 2016; Jiang et al., 2018; León-López, 2022). Los 3-flavanoles y los flavonoles de sorgo han demostrado tener actividad antimicrobiana (Shields et al., 2021).

De acuerdo con la NOM-F-159-S-1979 el pan blanco de caja se define como el producto alimenticio elaborado mediante la cocción por horneado de la masa fermentada, hecha con la harina de trigo, agua potable, sal yodada, levadura y otros ingredientes opcionales y aditivos permitidos para alimentos. De acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria Panificadora, el consumo per cápita anual de pan es de 33.5 kg, de los cuales entre el 70% y el 75% corresponden al pan de caja, siendo el Estado de México, Veracruz, Puebla, Oaxaca, Ciudad de México, Sonora y Michoacán, los estados con una mayor presencia de panificadoras productoras de pan de caja (Data México, 2024). En la actualidad el consumo de pan exige modificación en sus formulaciones, por lo que, en algunos productos se sustituye parcialmente la harina de trigo por harina de otros cereales como la avena, el arroz y el sorgo los cuales presentan buenas características nutrimentales favoreciendo la biodisponibilidad de nutrientes y el aporte de compuestos funcionales (Vasquez-Lara et al., 2018; Cayres et al., 2020; Olojede et al., 2020; Rashwan et al., 2020). En especial la inclusión de harina de sorgo en pan reduce el índice glicémico, aumenta el contenido de fibra en el pan y provee compuestos funcionales (Adzqia et al., 2023). Es por lo anterior, que los objetivos de esta investigación fueron desarrollar la formulación de un pan de caja que incluya harina de sorgo, así como, evaluar el color, la textura, la relación ancho/alto, la calidad microbiológica y las características sensoriales del pan fresco. Adicionalmente, se midió el color y la calidad microbiana después de 5 días de almacenamiento a 25 °C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y formulación del pan de caja

La investigación se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la panificadora La Ceiba ubicada en Lindero Hernández #9, Villa Ávila Camacho, municipio de Xicotepec de Juárez, Puebla. La empresa proporcionó los insumos, equipos y formulación del pan de caja (control). Para obtener el pan PSHS, la harina de trigo fue sustituida en proporción 2:1 (harina de trigo: harina de sorgo) como se muestra en la Tabla 1. El porcentaje

de sustitución de la harina de trigo por sorgo se seleccionó con base en reportes bibliográficos previos como el de Temnikova et al. (2020) y Adzqia et al. (2023), quienes sugieren porcentajes entre 25 y 30% para obtener pan de buena calidad y buen sabor. Para la elaboración de los panes se utilizó: harina de sorgo (Viesca), harina de trigo (Don Carlos), margarina (Untarella), levadura (La Florida), azúcar (Beta San Miguel), sal (La Fina), mejorante (Pluspan), leche entera (Nutrí leche) y agua.

El pan PSHS (15 piezas) y el control (15 piezas) en presentación de 200 g después de horneados se enfriaron por 1 h y se colocaron en bolsas de polipropileno, se sellaron y almacenaron a 25 °C por 5 días.

Análisis físicos del pan fresco

Para el análisis de textura las piezas de pan horneadas se dejaron enfriar 1 h y se envasaron en bolsas de polipropileno para realizar las pruebas en un lapso no mayor de 24 h. Se realizó un análisis de perfil de textura (TPA, por sus siglas en inglés) del

pan control (100% harina de trigo) y del pan PSHS utilizando un texturómetro Shimadzu modelo EZ-SX 500 N (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón), una sonda cilíndrica de acero inoxidable (d= 25 mm) a una velocidad de 1.7 mm/s con una compresión del 25%. La prueba se realizó en las piezas de pan completo por cuatuplicado. La relación ancho/alto se determinó midiendo la anchura y el alto del pan con un Vernier digital (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japón), las mediciones se realizaron por triplicado.

Análisis microbiológico del pan fresco

Se tomaron 10 g de cada pan para diluirlos en 90 mL de agua peptonada y se determinó la presencia de Salmonella spp. y Escherichia coli siguiendo la NOM-210-SSA1-2014, utilizando Agar Salmonella-Shigella (Becton Dickinson; Heidelberg, Alemania) y Agar Eosina Azul de Metileno (Becton Dickinson; Heidelberg, Alemania), respectivamente. Para la determinación de mohos y levaduras se siguió la metodología de la NOM-111-SSA1-1994 utilizando Agar Sabouraud Dextrosa (Bioxon, BD, Estado de México, México). Para el recuento de bacterias mesófilas aerobias se utilizó el agar para Métodos

Tabla 1. Formulación de los panes de caja elaborados

Ingrediente	Pan control	Pan parcialmente sustituido con harina de sorgo
Harina de trigo	450 g	300 g
Harina de sorgo	-----	150 g
Margarina	100 g	100 g
Levadura	25 g	25 g
Azúcar	40 g	40 g
Sal	8 g	8 g
Mejorante	5 g	5 g
Leche	50 mL	50 mL
Agua	15 mL	15 mL

Estándar (Bioxon, BD, Estado de México, México) siguiendo el método descrito en la NOM-092-SSA1-1994. El recuento de coliformes totales se realizó siguiendo la metodología descrita en el NOM-113-SSA1-1994 y utilizando agar Rojo Bilis Violeta (Bioxon, BD, Estado de México, México). Las muestras se sembraron en cajas Petri (100x15 mm) y se incubaron durante 24 h en una estufa (FELISA modelo FE-131; Zapopan, Jalisco. México) a 37°C±2 °C para las bacterias y a 25±2 °C

para los mohos y levaduras por 72 h.

Evaluación sensorial del pan

Los panes control y PSHS fueron rebanados después de 24 h de su elaboración para llevar a cabo la evaluación sensorial. Se aplicó una prueba afectiva de tipo escala hedónica de 9 puntos, en la que, 1 corresponde a “me disgusta muchísimo” y 9 a “me gusta muchísimo”; calificaciones promedio de 6 se consideran con buena aceptación. La

prueba la realizaron 12 panelistas no entrenados que calificaron 4 atributos del pan (color, olor, sabor y textura). Las calificaciones se analizaron mediante una prueba de t de Student ($p < 0.05$) para identificar si alguno de los panes tuvo mayor nivel de aceptación.

Color y calidad microbiológica del pan

Se midió el color de la corteza y la miga del pan control y pan PSHS utilizando un colorímetro CM-508 (Konica Minolta, Japón) en modo transmitancia y con la escala CIELAB donde L^* representa la luminosidad, a^* el color rojo-verde y b^* el color azul-amarillo; las mediciones se hicieron por triplicado. El color se midió en los panes frescos y almacenados por 5 días. Para la calidad microbiológica, a los panes se les realizó el recuento de bacterias mesófilas aerobias, de mohos y levaduras y coliformes totales después de 5 días de almacenamiento. Los métodos que se utilizaron fueron los descritos en la sección Análisis microbiológico del pan fresco para los grupos mencionados.

Análisis estadístico

Todas las mediciones se realizaron al menos por triplicado, los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa estadístico SPSS versión 23

con un nivel de significancia de $p < 0.05$ y las medias se compararon mediante una prueba de Tukey ($p < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Formulación y proceso de elaboración del pan

En el área de productos de panificación el sorgo se ha convertido en una alternativa para sustituir parcialmente al trigo, obteniendo productos innovadores aptos para el consumo humano. En esta investigación se obtuvo la formulación para la elaboración de pan sustituyendo parcialmente la harina de trigo en una proporción 2:1 (harina de trigo: harina de sorgo), como se muestra en la Figura 1, en la que se describe cada una de las etapas del proceso de elaboración del pan, así como, las cantidades utilizadas de la materia prima y la temperatura de cocción. Estudios previos señalan que sustituir del 20-30% de la harina de trigo por sorgo permite obtener pan de buena calidad y sabor (Temnikova et al., 2020). Los productos resultantes fueron los panes de caja (Figura 2).

Como ya se mencionó anteriormente, la harina de sorgo en pan reduce el índice glicémico, aumenta el contenido de fibra en el pan y provee compuestos funcionales (Adzija et al., 2023).

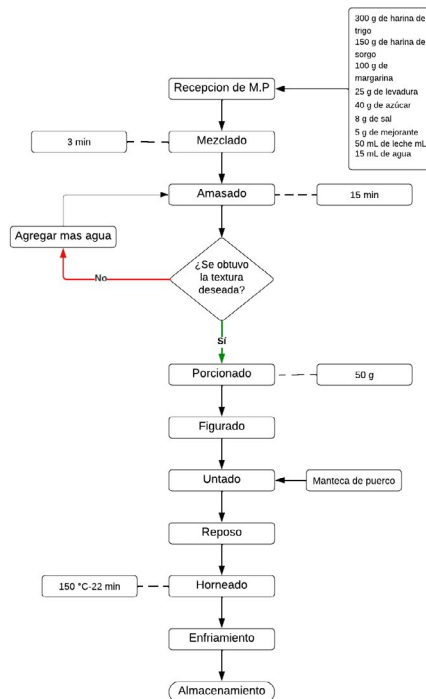


Figura 1. Diagrama de flujo de la elaboración de pan control y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo. Materia prima (M.P.).

El sorgo y los productos obtenidos a base de este cereal presentan ciertas características que los catalogan como alimentos funcionales que son aquellos que, además de cumplir con su función básica de proporcionar nutrientes, tienen un impacto positivo en una o más funciones específicas del organismo, más allá de los efectos nutrimentales básicos. Estos alimentos contienen compuestos biológicamente activos que ofrecen beneficios

para la salud cuando se consumen de forma regular y en las cantidades recomendadas (Topolska, 2021; Baker et al., 2022). La presencia de fibra y compuestos bioactivos en el sorgo otorgan beneficios a la salud relacionados con propiedades funcionales como la actividad antioxidante, antihipertensiva, antidiabética y antiobesidad, así como, la acción antimicrobiana en el alimento (Taylor et al., 2007; Awika, 2017; Xu et al., 2021).

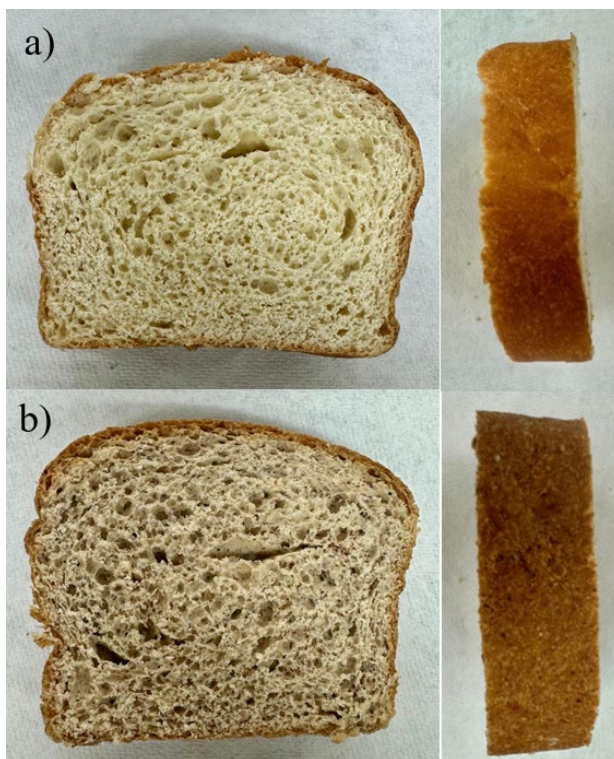


Figura 2. Miga y corteza de pan de caja control (100% harina de trigo) y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo (33%), a) y b), respectivamente.

Características físicas del pan fresco

En la Tabla 2 se muestran los valores de textura y la relación ancho/alto del pan control (100% harina de trigo) y PSHS. La dureza y adhesividad de los panes fue significativamente diferente ($p < 0.05$), lo que indica, que la harina de sorgo modifica de forma importante la estructura tridimensional del pan. Lo anterior se atribuye a la dilución que tiene el gluten debido a la adición de harina de sorgo y que debilita la firmeza del pan (Abdelghafor et al., 2011). Valores de dureza (7.31 N) similares fueron reportados para pan con 25% de harina de sorgo, arroz, tapioca y maíz (Adzqia et al., 2023) y pan PSHS (7.65 N; 30% harina de sorgo) (Hryhorenko et al., 2023). Curti et

al. (2023) obtuvieron valores de dureza más altos en tres panes formulados con harina de sorgo, arroz y tapioca, la cual osciló entre 14.87 a 25.87 N. Las diferencias en dureza se atribuyen a las diferencias en la formulación, ya que, a mayor contenido de harina de sorgo, más compacta es la miga y, por lo tanto, más duro el pan. La relación ancho/alto es importante porque es un factor de calidad de forma y tamaño del pan, que está directamente relacionado con la correcta formación del gluten (Hernández-Figueroa et al., 2024). La relación ancho/alto no fue significativamente diferente ($p > 0.05$) entre el pan control y PSHS, por lo que, las dimensiones del pan y su elevación se mantienen al sustituir la tercera parte de la harina de trigo con harina de sorgo.

Tabla 2. Caracterización física del pan control y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo

Parámetro	Pan control (100% harina de trigo)	Pan parcialmente sustituido con harina de sorgo (33%)
Dureza (N)	10.75±1.21 a	6.10±1.14 b
Adhesividad (J)	0.047±0.005 a	0.025±0.005 b
Relación ancho/alto	1.29±0.15 a	1.27±0.11 a

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Los valores representan la media \pm desviación estándar.

Evaluación sensorial del pan

En la Figura 3 se muestran las calificaciones promedio del pan control y el PSHS, de los 4 atributos evaluados. Las calificaciones promedio del pan con harina de sorgo son ligeramente más bajas; sin embargo, no hubo diferencia significativa ($p > 0.05$) al compararlas con el control. Por lo que, su nivel de aceptación se considera bueno; además, las calificaciones estuvieron alrededor de 7 (me gusta

moderadamente) para ambos panes. Calificaciones promedio similares han sido reportadas para pan con harina de sorgo (0, 5, 10 y 15%) entero o decortinado en olor, sabor, textura y aceptabilidad general que fueron de 6.25 a 7.72 (Abdelghafor et al., 2011); así como, para pan de sorgo (15%) con arroz y mijo cuyas calificaciones promedio fueron de ~6 para atributos como textura, color, sabor y aroma (Azarbad et al., 2019). Por lo que, el pan PSHS formulado en este estudio tuvo mejor nivel de aceptación.

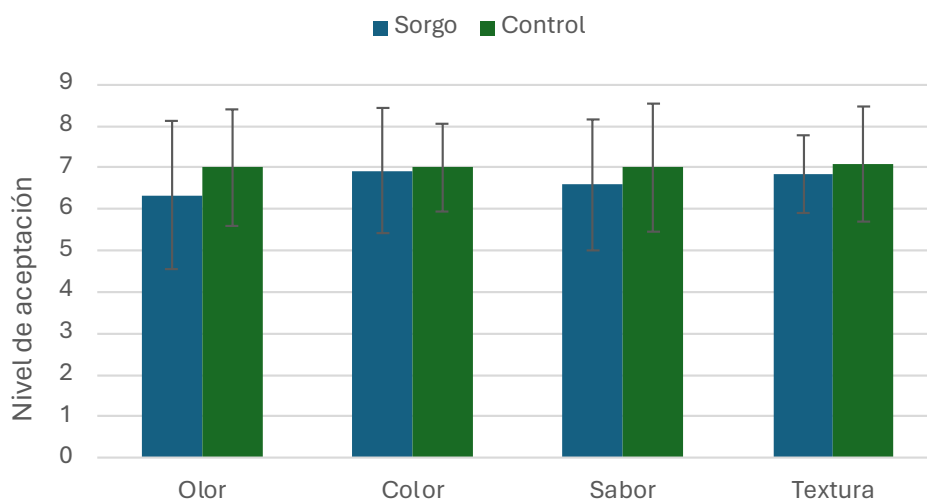


Figura 3. Calificaciones promedio de la evaluación sensorial de pan control (100% harina de trigo) y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo (33%). Calificaciones de 6 se consideran aceptables.

Color y calidad microbiológica del pan fresco y almacenado

El color es el primer contacto que tiene el consumidor con un alimento, condicionando su preferencia e influenciando su elección. El color está relacionado con la aceptación sensorial y la composición química y, por lo tanto, es uno de los factores que define la calidad de un producto alimentario. En la Figura 2 se muestra el pan control y pan PSHS, y se observa que el color cambia cuando se adiciona harina de sorgo a la formulación. La Tabla 3 muestra los parámetros

de color del pan control y PSHS. El color de la corteza (L^* , a^* , b^*) del pan control y PSHS frescos fue similar. Por otro lado, la miga fue más blanca en el pan control que en el PSHS debido a los pigmentos propios (tonos rojos) de la harina de sorgo entero. La incorporación de harina de sorgo en la formulación de pan resulta en cortezas y migas de pan más oscuras y/o cafés y con mayor índice de oscurecimiento debido a la presencia de antocianinas y taninos en el sorgo (Hryhorenko et al., 2023; Omer et al., 2023). Después de 5 días de almacenamiento, la corteza del pan control y las migas de ambos panes se decoloran (incrementan

su luminosidad, $p < 0.05$). Los parámetros a^* (+rojo, -verde) y b^* (+amarillo, - azul) no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) durante el almacenamiento de ambos panes. La miga de pan de trigo y PSHS (30%) frescos tuvieron valores de luminosidad (70.25 y 60.28) y b^* (10.03 y 16.75) menores que los observados en el presente estudio; sin embargo, el valor de a^* para pan PSHS fue similar (6.62) (Hryhorenko et al., 2023). Valores

similares de luminosidad ($L = 68.69$ y $L = 65.29$) de la miga fueron reportados previamente para pan PSHS con 15 o 20% de harina de sorgo entero (Abdelghafor et al., 2011). Las diferencias de color entre los panes estudiados previamente y los analizados en el presente estudio pueden deberse a la variedad de sorgo y la formulación del pan. Sin embargo, los valores en los parámetros de color presentan similitudes.

Tabla 3. Parámetros de color en pan de caja control (100% harina de trigo) y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo (PSHS, 33%) frescos y después de 5 días de almacenamiento

Pan control	Corteza		Miga	
	Día 0	Día 5	Día 0	Día 5
L^*	44.88±3.73 ^a	57.03±1.03 ^b	80.20±0.91 ^a	88.23±1.33 ^b
a^*	20.48±1.53 ^a	19.93±0.47 ^a	4.05±0.26 ^a	4.20±0.36 ^a
b^*	31.00±4.20 ^a	29.67±1.18 ^a	25.92±0.65 ^a	27.03±1.32 ^c
Pan PSHS				
L^*	45.67±1.40 ^a	45.07±3.22 ^a	67.30±1.90 ^a	80.70±0.95 ^b
a^*	19.00±0.80 ^a	18.63±0.50 ^a	6.27±0.39 ^a	6.60±0.44 ^a
b^*	31.40±2.10 ^a	30.58±1.31 ^a	22.55±0.86 ^a	23.56±1.03 ^a

Letras diferentes en cada línea para corteza o miga y tipo de pan indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Los valores representan la media ± desviación estándar.

En la Tabla 4 se muestran los recuentos microbianos de los panes elaborados en este estudio. En ambos casos se puede observar que, los panes se elaboraron siguiendo adecuadas prácticas de manufactura al obtener recuentos < 10 UFC/g en todos los microorganismos o grupos analizados. Durante el almacenamiento existe crecimiento de bacterias mesófilas aerobias y de mohos y levaduras, lo cual se espera debido a las condiciones en las que se

almacenaron (25 °C). Sin embargo, después de 5 días ambos productos siguen cumpliendo con las especificaciones microbiológicas establecidas en la NMX-F-442-1983 para productos de panificación, que son: cuenta de hongos máximo 50 UFC/g, cuenta de levaduras máximo 50 UFC/g, E. coli negativo, organismos coliformes máximo 10 UFC/g y cuenta total máximo 15 000 UFC/g. Por lo que, los productos elaborados son seguros para consumo.

Tabla 4. Recuentos microbianos de pan control (100% harina de trigo) y pan parcialmente sustituido con harina de sorgo (PSHS) (33%) frescos y después de 5 días de almacenamiento

Microorganismo o grupo microbiano	Pan control		Pan PSHS	
	Día 0	Día 5	Día 0	Día 5
<i>Salmonella</i> spp. (UFC/g)	< 10	No determinado	< 10	No determinado
<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)	< 10	No determinado	< 10	No determinado
Coliformes totales (UFC/g)	< 10	< 10	< 10	< 10
Bacterias mesófilas aerobias (UFC/g)	< 10	8000±1200	< 10	4200±1000
Mohos y levaduras (UFC/g)	< 10	25±9	< 10	28±6

Los valores representan la media ± desviación estándar.

CONCLUSIONES

La sustitución parcial de harina de trigo por harina de sorgo en la elaboración de un pan de caja no afectó el nivel de aceptación ni la relación ancho/alto del pan cuando se comparó con un control (100% harina de trigo). El color y la textura si se modificaron y fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$), sin embargo, esto no tuvo efecto en el nivel de aceptación sensorial de los panes. Los recuentos microbiológicos cumplieron con los criterios establecidos por la norma, por lo que, es seguro su consumo después de 5 días de almacenamiento a 25 °C. En futuras investigaciones será necesario evaluar la presencia de compuestos antioxidantes en el pan para determinar si se trata de un alimento funcional, así como analizar su composición.

REFERENCIAS

- Abdelghafor, R. F., Mustafa, A. I., Ibrahim, A. M. H., y Krishnan, P. G. (2011). Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3(1), 9-15.
- Adzqia, F., Suwonsichon, S., y Thongngam, M. (2023). Effects of White sorghum flour levels on physicochemical and sensory characteristics of gluten-free bread. *Foods*, 12, Artículo 4113. <https://doi.org/10.3390/foods12224113>
- Awika, J. M. (2017). Sorghum: Its Unique Nutritional and Health-Promoting Attributes. *Gluten-Free Ancient Grains*, Woodhead Publishing, 21-54. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100866-9.00003-0>
- Azarbad, H. R., Tehrani, M. M., y Rashidi, H. (2019). Optimization of gluten-free bread formulation using sorghum, rice, and millet flour by D-optimal mixture design approach. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 101-115. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-16135-en.html>
- Baker, M. T., Lu, P., Parrella, J. A., y Leggette, H. R. (2022). Consumer acceptance toward functional foods: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), Artículo 1217.
- Cayres, C. A., Ascheri, J. L. R., Couto, M. A. P. G., Almeida, E. L., y Melo, L. (2020). Consumers' acceptance of optimized gluten-free sorghum-based cakes and their drivers of liking and disliking. *Journal of Cereal Science*, 93, Artículo 102938. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102938>
- Curti, M. I., Palavecino, P. M., Savio, M., Baroni, M. V., y Ribotta, P. D. (2023). Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) gluten-free bread: The effect of milling conditions on the technologies properties and in vitro bioaccessibility of polyphenols and minerals. *Foods*, 12, Artículo 3030. <https://doi.org/10.3390/foods12163030>
- Data México. (2024). Elaboración de productos de panadería y tortillas. Data México. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/bakeries-and-tortilla-manufacturing> Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- Hassan, S. M. (2023). Nutritional, functional and bioactive properties of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) with its future outlooks: A review. *Open Journal of Nutrition and Food Sciences*, 5(1), Artículo 1030.
- Hernández-Figueroa, R. H., Mani-López, E., Ramírez-Corona, N., y López-Malo, A. (2024). Optimizing lactic acid bacteria proportions in sourdough to enhance antifungal activity and quality of partially and fully baked bread. *Foods*, 13, Artículo 2318. <https://doi.org/10.3390/foods13152318>
- Hryhorenko, N., Krupa-Kozak, U., Bączek, N., Rudnicka, B., y Wróblewska, B. (2023). Gluten-free bread enriched with whole-grain red sorghum flour gains favourable technological and functional properties and consumers acceptance. *Journal of Cereal Science*, 110, Artículo 103646. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103646>
- Jiang, H., Hettiarachchy, N. S., y Horax, R. (2018). Physical properties and estimated glycemic index of protein-enriched sorghum-based chips. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 891-898. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2993-x>
- León-López, A., Mendoza-Wilson, A. M., y Baladrán-Quintana, R. R. (2022). Propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas de alimentos a base de sorgo: Avances y oportunidades para su aprovechamiento integral: Nutritional, functional and bioactive properties of sorghum-based foods: Advances and opportunities for its integral exploitation. *Tecnociencia Chihuahua*, 16(2), 912-912.
- McGinnis, M. J., y Painter, J. E. (2020). Sorghum: History, use, and health benefits. *Nutrition Today*, 55(1), 38-44.
- NMX-F-442-1983. (1983). Alimentos – pan – productos de bollería. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/1983/nmx-f-442-1983.pdf> Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- NOM-F-159-S-1979. (1979). Pan blanco de caja. Secretaría de Gobernación. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4829330&fecha=06/08/1979#gsc.tab=0 Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- NOM-092-SSA1-1994. (1995). Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias mesófilas aerobias en placa. Secretaría de Salud. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4886029&fecha=12/12/1995#gsc.tab=0 Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- NOM-111-SSA1-1994. (1995). Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos. Secretaría de Salud. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881226&fecha=13/09/1995#gsc.tab=0 Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- NOM-113-SSA1-1994. (1995). Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. Secretaría de Salud. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69536.pdf> Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- NOM-210-SSA1-2014. (2015). Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. Secretaría de Gobernación. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5398468&fecha=26/06/2015#gsc.tab=0 Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- Olojede, A. O., Sanni, A. I., y Banwo, K. (2020). Effect of legume

- addition on the physiochemical and sensorial attributes of sorghum-based sourdough bread. *LWT*, 118, Artículo 108769. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108769>
- Omer, S. H. S., Hong, J., Zheng, X., y Khashaba, R. (2023). Sorghum flour and sorghum flour enriched bread: characterizations, challenges, and potential improvements. *Foods*, 12, Artículo 4221. <https://doi.org/10.3390/foods12234221>
- Rashwan, A. K., Yones, H. A., Karim, N., Taha, E. M., y Chen, W. (2021). Potential processing technologies for developing sorghum-based food products: An update and comprehensive review. *Trends in Food Science y Technology*, 110, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.087>
- Shields, L., Gang, Y., Jordan, K., Sapkota, S., Boatwright, L., Jiang, X., Kresovich, S., y Boyles, R. (2021). Genome-wide association studies of antimicrobial activity in global sorghum. *Crop Science*, 61, 1301-1306. DOI: 10.1002/csc2.20348
- Simnadis, T. G., Tapsell, L. C., y Beck, E. J. (2016). Effect of sorghum consumption on health outcomes: a systematic review. *Nutrition Reviews*, 74, 690-707. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw>
- Tanwar, R., Panghal, A., Chaudhary, G., Kumari, A., y Chhikara, N. (2023). Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: A review. *Food Chemistry Advances*, 3, Artículo 100501. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100501>
- Taylor, J., Bean, S. R., Ioerger, B. P., y Taylor, J. R. N. (2007). Preferential binding of sorghum tannins with γ -kafirin and the influence of tannin binding on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science*, 46, 22-31. <http://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.11.001>
- Temnikova, O., Rudenko, E., Mukovnina, G., y Ruzyanova, A. (2020). Technology of functional bread using sorghum flour. *BIO Web of Conferences*, 17, Artículo 00196. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700196>
- Topolska, K., Florkiewicz, A., y Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). Functional food—consumer motivations and expectations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), Artículo 5327.
- USDA, US Department of Agriculture. (2019). Sorghum grain. Food Data Central. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169716/nutrients> Consultado el 13 de septiembre de 2024.
- Vasquez-Lara, F., Soto Padilla, D., Cordero Fernández, D. L., Granados Nevárez, M. D. C., Islas Rubio, A. R., Verdú Amat, S., y Barat Baviera, J. M. (2018). Utilización de harina de sorgo tratada térmicamente como una alternativa en la sustitución de harina de trigo en panificación. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(2), 267-280.
- Xu, J., Wang, W., y Zhao, Y. (2021). Phenolic Compounds in whole grain sorghum and their health benefits. *Foods*, 10, Artículo 1921. <https://doi.org/10.3390/foods10081921>

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 23/10/2024

SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE ORO CON EXTRACTO ACUOSO DE MORINGA (*MORINGA OLEIFERA*)

GREEN SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES WITH AQUEOUS EXTRACT OF MORINGA (*MORINGA OLEIFERA*)

Heidi Yamilet Pérez Hernández⁽¹⁾
 Aleida Selene Hernández Cázares⁽²⁾
 Marcela Rangel Marrón⁽³⁾
 Marlon Rojas López⁽⁴⁾
 Genaro Gustavo Amador Espejo⁽⁵⁾
 María Antonieta Ríos Corripio*⁽⁶⁾

RESUMEN

El uso de nanomateriales, como las nanopartículas de oro, ha aumentado en diversas áreas como la biotecnología y biomedicina debido a sus propiedades. Sin embargo, la síntesis tradicional de estos nanomateriales genera residuos que contaminan el ambiente ya que se usan sustancias químicas. La síntesis verde busca reducir estos impactos sustituyendo estos reactivos por compuestos biológicos presentes en extractos de hongos, bacterias y plantas. En Veracruz su territorio cumple con las condiciones óptimas para el cultivo de moringa (*Moringa oleifera*) y esta tiene un alto valor nutricional y compuestos bioactivos con capacidad

antioxidante (flavonoides, fenoles, ácidos orgánicos) que pueden ser aislados en extractos con capacidad de reducir iones metálicos. El objetivo del trabajo fue evaluar un método de síntesis verde de nanopartículas de oro usando un extracto acuoso de moringa como agente reductor y optimizar el proceso de síntesis empleando un diseño experimental Box-Behnken. Se establecieron tres variables independientes (concentración del agente precursor (1, 1.5 y 2 mM), concentración del reductor (5, 7.5 y 10 mL) y tiempo de reacción (10, 15 y 20 min)) para tener la absorbancia máxima, mayor tamaño y densidad de partícula. El modelo arrojó 15 experimentos, la síntesis de nanopartículas optimizada (1mM de precursor metálico, 5 mL de extracto de moringa y 15 min de tiempo de reacción) fue caracterizada utilizando espectrofotometría UV-visible, FTIR, SEM y potencial zeta. La banda de superficie de plasmón se observó a 556 nm, el tamaño de las nanopartículas se encontró entre 3-5 nm y una densidad de partícula 2.43×10^{12} part/mL. Se concluye que el extracto acuoso de moringa es capaz de actuar como agente reductor en la síntesis verde de nanopartículas de oro lo que lo convierte en un agente sostenible en la obtención de nanomateriales.

Palabras Clave: nanotecnología, AuNPs, moringa, síntesis verde

⁽¹⁾Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Avenida Universidad 350, Cuitláhuac, Veracruz, México. C.P. 94910. 20223j101019@utev.edu.mx
⁽²⁾Colegio de Postgraduados Campus Córdoba- Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. aleyse@colpos.mx ⁽³⁾Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56 No. 4 Esq. Avenida Concordia. Col. Benito Juárez C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, México. mrangel@pampano.unacar.mx ⁽⁴⁾Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex Hacienda de San Juan Molino. Carretera Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Tepetitla, Tlaxcala, México. C. P. 90700. marlonr1@yahoo.com.mx ⁽⁵⁾CONAHCYT- Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex Hacienda de San Juan Molino. Carretera Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Tepetitla, Tlaxcala, México. C. P. 90700. genaroamador2014@gmail.com ⁽⁶⁾CONAHCYT- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba- Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. *rios.antonietta@colpos.mx.

ABSTRACT

The use of nanomaterials, such as gold nanoparticles, has increased in various areas such as biotechnology and biomedicine due to their properties. However, the traditional synthesis of these nanomaterials generates waste that contaminates the environment since chemical substances are used. Green synthesis seeks to reduce these impacts by replacing these reagents with biological compounds present in extracts of fungi, bacteria and plants. In Veracruz, its territory meets the optimal conditions for the cultivation of moringa (*Moringa oleifera*) and it has a high nutritional value and bioactive compounds with antioxidant capacity (flavonoids, phenols, organic acids) that can be isolated in extracts with the capacity to reduce metal ions. The objective of the work was to evaluate a green synthesis method of gold nanoparticles using an aqueous extract of moringa as a reducing agent and to optimize the synthesis process using a Box-Behnken experimental design. Three independent variables (precursor agent concentration (1, 1.5 and 2 mM), reducer concentration (5, 7.5 and 10 mL) and reaction time (10, 15 and 20 min)) were established to have the maximum absorbance, largest particle size and density. The model yielded 15 experiments, the optimized nanoparticle synthesis (1 mM of metal precursor, 5 mL of moringa extract and 15 min of reaction time) was characterized using UV-visible spectrophotometry, FTIR, SEM and zeta potential. The surface plasmon band was observed at 556 nm, the nanoparticle size was found between 3-5 nm and a particle density of 2.43×10^{12} part/mL. It is concluded that the aqueous extract of moringa is capable of acting as a reducing agent in the green synthesis of gold nanoparticles, which makes it a sustainable agent in obtaining nanomaterials.

Keywords: nanotechnology, AuNPs, moringa, green synthesis

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es una disciplina que se encarga del estudio de la materia a escala nanométrica (1×10^{-9} m), a esta escala las propiedades de los nanomateriales cambian a diferencia de la escala macro (De Jesús Jiménez-Martínez y Vázquez-Lira, 2024). En los últimos años la nanotecnología ha tenido un gran realce, debido a sus múltiples aplicaciones en diversos campos de la ciencia como en la medicina, la electrónica,

la farmacéutica, la energía, la fabricación de materiales, la agricultura, la energía, la biotecnología y materiales inteligentes (Bhushan, 2017). Las nanopartículas metálicas (Au, Ag y Cu, entre otros) son algunos de los nanomateriales que se desarrollan de la nanotecnología y permiten adentrarse en nuevas técnicas de aplicación, ya que tiene distintas propiedades (eléctricas, magnéticas, fotoelectrónicas, catalíticas, biomédicas) que dependerán de su tamaño, su forma y su distribución (Márquez et al., 2021).

Las nanopartículas de oro (AuNPs) han tenido gran relevancia debido a sus prometedoras aplicaciones en el ámbito energético, catálisis, aplicaciones biológicas, medicina y farmacéutica (Echevarría, 2016). Estas nanopartículas presentan gran biocompatibilidad; además, pueden recubrirse y funcionalizarse con diferentes moléculas como lo son anticuerpos, proteínas, ADN, polímeros, entre otros (Al Qadi y López, 2009).

Existen diferentes métodos de síntesis como métodos físicos, químicos y electroquímicos, los cuales además de su alto costo y gasto de energía, utilizan sustancias y productos químicos peligrosos (Yahaya et al., 2022; Fatima et al., 2024). En la actualidad debido a la contaminación ambiental se han buscado métodos más amigables y respetuosos con el ambiente es por esto que se han desarrollado métodos alternativos como lo es la síntesis verde de nanomateriales, la cual en lugar de utilizar agentes reductores químicos, utiliza extractos de plantas, frutos, flores, hongos y algas, como sustitutos siendo así una alternativa muy favorable en distintos aspectos (económicos, prácticos, respetuosos con el ambiente, sencilla y rápida) (Orbe, 2021). Los extractos naturales se pueden ocupar como agentes reductores; asimismo, actúan como estabilizantes y recubrimiento que le confieren a las AuNPs propiedades antioxidantes y antimicrobianas que provienen de las moléculas orgánicas de los extractos naturales (Katas et al., 2019).

La Moringa, conocida científicamente como *Moringa oleifera*, es un árbol de tamaño pequeño, de mediano a rápido crecimiento, originario de regiones subtropicales y tropicales de África y Asia (Bocarando-Guzmán et al., 2020). Este árbol es muy valorado debido a sus múltiples beneficios nutricionales y terapéuticos, además de que todas las partes del árbol son consideradas como comestibles y con propiedades saludables

(Choudhary et al., 2024). No obstante, cada parte del árbol contiene diferentes nutrientes, vitaminas (C, A y E), minerales (hierro, calcio y potasio), compuestos fenólicos, compuestos bioactivos, polifenoles, flavonoides, antioxidantes y aminoácidos (Rockwood et al., 2013; Olagbemide y Philip, 2014). Ente las aplicaciones se destaca el uso en el consumo alimenticio de animales y humano, purificación del agua, en la industria cosmética, además de usos medicinales y tratamientos (Bouttier-Figueroa et al., 2024). Por todo esto, la moringa es una planta versátil y altamente nutritiva que ha ganado popularidad en todo el mundo debido a su amplia gama beneficios (Adeyemi y Elebiyo, 2014).

Con base en la caracterización agroclimática del estado de Veracruz, 75 % de su territorio cumple con las condiciones óptimas, con intervalos de temperaturas entre 15 a 27 °C para el cultivo de moringa (Espinosa et al., 2013). A pesar de todo esto en Veracruz la moringa es una planta no tan conocida, ni consumida. Por lo que se busca diversificar su uso utilizándolo como agente reductor y estabilizador en la síntesis verde de AuNPs.

La síntesis verde de nanopartículas utilizando extracto acuoso de moringa representa una idea muy viable entre la nanotecnología y la sostenibilidad ambiental, aprovechando recursos naturales renovables y minimizando el impacto ambiental en los procesos de síntesis de nanopartículas. Por lo tanto el objetivo fue evaluar un método de síntesis verde de nanopartículas de oro usando un extracto acuoso de moringa como agente reductor y optimizar el proceso de síntesis empleando un diseño experimental Box-Behnken. Se establecieron tres variables independientes (concentración del agente precursor (1, 1.5 y 2 mM), concentración del agente reductor (5, 7.5 y 10 mL) y tiempo de reacción (10, 15 y 20 min) buscando tener la absorbancia máxima, mayor tamaño y densidad de partícula.

MÉTODOS

Materiales y métodos

Materiales

Las hojas de moringa (*Moringa oleifera*) se recolectaron del municipio de Atzalan, Veracruz, México. El ácido tetracloroáurico (HauCl_4) fue adquirido de Sigma Aldrich® (Toluca, México).

Todas las soluciones acuosas se prepararon en agua destilada y desionizada.

Preparación del extracto acuoso de moringa

Las hojas maduras y en buen estado de la moringa se lavaron con agua de garrafón repetidamente para eliminar residuos de tierra u otros, para después secarse a temperatura ambiente a 25 °C para eliminar la humedad. Posteriormente se pesaron 10 g de moringa, se trituraron en un mortero y se adicionaron 100 mL de agua desionizada. La solución se calentó hasta ebullición durante 20 min, posteriormente se enfrió y filtró a través de un papel filtro (Whatman No. 1), finalmente se almacenó a 4 °C hasta su uso.

Síntesis verde de AuNPs

Para la síntesis verde de las AuNPs se siguió la metodología de Rosas-Vara, (2020) con algunas modificaciones. Esta reacción se basa en la reducción del ácido tetracloroáurico con el agente reductor (extracto acuso de moringa) en presencia de calor y tiempos de reacción entre 10 y 20 min. A medida que se añade el agente reductor la solución cambia de color hasta obtener un color rojo rubí, lo que indica la formación de las AuNPs. Posteriormente se centrifugo a 3500 rpm durante 15 min, se eliminó el sobrenadante y las AuNps se resuspendieron en 6 mL de agua desionizada. La suspensión obtenida se almacenó a 4°C hasta su uso.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño Box-Behnken para estudiar los efectos de las variables independientes, concentración del precursor (X_1), concentración del agente reductor (X_2) y tiempo de reacción (X_3), como se muestra en el Tabla 1. Las variables se seleccionaron con base en pruebas preliminares e investigaciones de trabajos anteriores. Este diseño generó 15 tratamientos aleatorios con 3 réplicas de puntos centrales. Las 15 corridas generadas se representan en el Tabla 2 (variables codificadas reales).

Posteriormente, para mostrar la relación entre las respuestas que ajustan al modelo se obtuvieron gráficos de contorno. Los mejores efectos de combinación esperados se determinaron con el software Minitab versión 19. Se utilizaron técnicas como UV-Vis, microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja FTIR y potencial zeta para caracterizar las AuNPs optimizadas.

Tabla 1. Niveles codificados para variables independientes.

Variable independiente	Nivel		
	-1	0	1
x_1 : Precursor (HAuCl ₄) concentración, mM	1	1.5	2
x_2 : Agente reductor (extracto de moringa) concentración, mL	5	7.5	10
x_3 : Tiempo de Reacción, min	10	15	20

Tabla 2. Variables independientes utilizadas en el arreglo del diseño experimental.

Corrida	Variable Codificada			Variable		
	x_1	x_2	x_3	Precursor (mM) x_1	Agente reductor (mL) x_2	Tiempo de reacción (min) x_3
1	-1	-1	0	1.0	5.0	15
2	0	-1	-1	1.5	5.0	10
3	1	-1	0	2.0	5.0	15
4	0	0	0	1.5	7.5	15
5	-1	1	0	1.0	10.0	15
6	1	0	-1	2.0	7.5	10
7	1	1	0	2.0	10.0	15
8	1	0	1	2.0	7.5	20
9	-1	0	-1	1.0	7.5	10
10	0	0	0	1.5	7.5	15
11	-1	0	1	1.0	7.5	20
12	0	1	-1	1.5	10.0	10
13	0	-1	1	1.5	5.0	20
14	0	0	0	1.5	7.5	15
15	0	1	1	1.5	10.0	20

Espectrofotetría UV-Visible

Los espectros de absorbancia de 190 a 900 nm, con un paso de longitud de onda de 2 nm, se midieron en un espectrofotómetro UV-vis (Thermo Scientific Evolution 600), utilizando agua destilada como línea base.

Tamaño y densidad de partículas de AuNPs

Se utilizó el método propuesto por Haiss et al. (2007) para determinar el tamaño y densidad de AuNPs a través de la información del espectro UV-vis. El tamaño de la partícula (d) se calculó según la ecuación (1):

$$d = \exp \left(B_1 \frac{A_{spr}}{A_{450}} - B_2 \right) \tag{1}$$

Donde A_{spr} es la absorbancia de la resonancia del plasmó superficial, A_{450} es la absorbancia a 450 nm, B_1 es la inversa de la pendiente del ajuste lineal entre $\frac{A_{spr}}{A_{450}}$ y B_2 es la intersección.

Utilizando datos experimentales informados por Haiss et al. (2007), $B_1 = 3.0$ y $B_2 = -2.2$. Los cálculos del diámetro de las partículas utilizando la ecuación (1) permitieron la determinación del tamaño de las AuNPs. Además, la densidad de las partículas (N, concentración) se estimó mediante la ecuación (2):

$$N = \frac{A_{450} \times 10^{14}}{d^2 \left(-0.295 - 1.36 \exp \left(- \left(\frac{d-96.8}{78.2} \right)^2 \right) \right)} \tag{2}$$

Espectroscopia FTIR

Se empleó un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) Bruker modelo Vertex 70, en el modo de muestreo de reflexión total atenuada (ATR). Todas las mediciones se realizaron en el rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , utilizando 120 escaneos, con una resolución de 4 cm^{-1} .

Potencial zeta

La estabilidad de las AuNPs se determinó a través del potencial zeta utilizando un equipo Zetasiser Pro con el método análisis de fase de dispersión de luz mediante medición en modo mixto (M3-PALS) en el rango de tamaño de 3.8 nm – 100 nm, utilizando un volumen de la muestra de 20 μL .

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología, el tamaño y la distribución de las AuNPs se analizaron utilizando un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo de alta resolución (HR-FESEM, MAIA-3, Tescan). Una gota de la suspensión acuosa de AuNPs en su estado coloidal se colocó sobre un cristal de silicio y luego

se dejaron secar antes de su análisis por microscopía electrónica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Síntesis Verde de AuNPs

En la Figura 1 se presentan los compuestos utilizados en el proceso de síntesis de AuNPs. El extracto acuoso de moringa como agente reductor (Figura 1A) presentó un color amarillo anaranjado derivado de los compuestos fenólicos que contiene (Ezz et al., 2022). En la Figura 1B se presenta el ácido tetracloroáurico (HAuCl_4) utilizado como precursor, con una coloración casi transparente pues está diluido a la concentración con la que se trabajó (1mM) y por último se presenta las AuNPs optimizadas (precursor 1 mM, agente reductor 5 mL en un tiempo de reacción de 15 min) presentó un color morado, lo cual nos indica la formación de las AuNPs y está asociado al tamaño de la nanopartícula (Figura 1C).

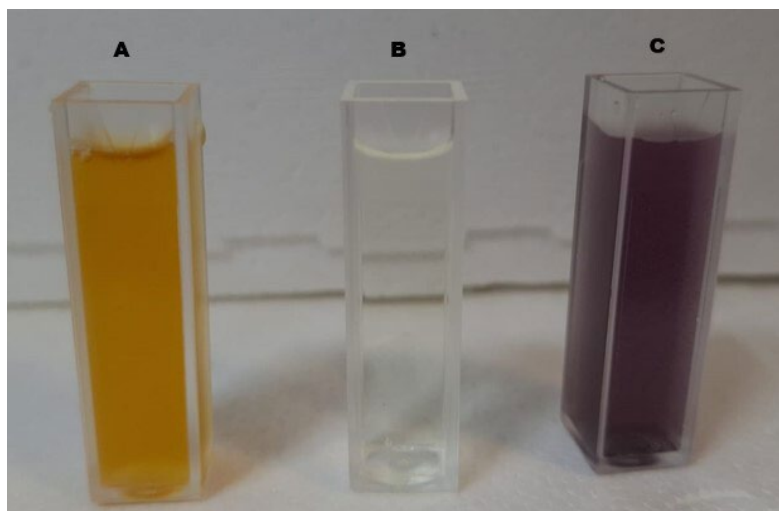


Figura 1. Extracto de moringa (A), precursor (HAuCl_4) (B) y síntesis verde de AuNPs optimizadas (C).

Optimización de las AuNPs

La absorbancia de las nanopartículas es una propiedad esencial que determina cómo interactúan con la luz. La absorbancia depende de factores como el tamaño, la forma, la composición y la densidad de las nanopartículas (Yahaya et al., 2022). La absorbancia es vital para optimizar el rendimiento de las nanopartículas en diversas aplicaciones. De acuerdo con el Tabla 3 la absorbancia máxima

no mostró efectos significativos ($p > 0.10$) en los efectos principales, términos cuadráticos y sus interacciones. Los resultados sugieren que, si se desea una mayor absorbancia en las AuNPs con el extracto acuoso de moringa, se requiere ocupar de concentración del precursor en un rango de 1.0 a 1.4 mM, el agente reductor arriba de 9 mL y el tiempo de reacción de 20 min; tal y como se puede observar en la Figura 2.

Tabla 3. Coeficientes de regresión del análisis de varianza del diseño Box-Behnken

Coefficientes	absorbancia máxima	tamaño de partícula	densidad de Partícula
X ₀	3.22	10.1	7.3
Lineal			
X ₁	-1.46	-3.6	-6.7
X ₂	-0.695	-0.36	0.21
X ₃	0.166	-0.14	-0.32
Cuadrático			
X ₁ ² X ₁	0.283	2.86	0.64
X ₂ ² X ₂	0.0293	0.065	-0.066
X ₃ ² X ₃	-0.00677	-0.0099	-0.0182
Interacción			
X ₁ ² X ₂	0.082	-0.804	0.194
X ₁ ² X ₃	-0.0280	0.055	0.347
X ₂ ² X ₃	0.0102	0.0282	0.0566
R ² (%)	45.93	58.28	70.43
Falta de ajuste (p)	0.531	0.420	0.757
X ₁ Precursor Metálico, X ₂ Agente Reductor, X ₃ Tiempo de reacción			*p<0.01

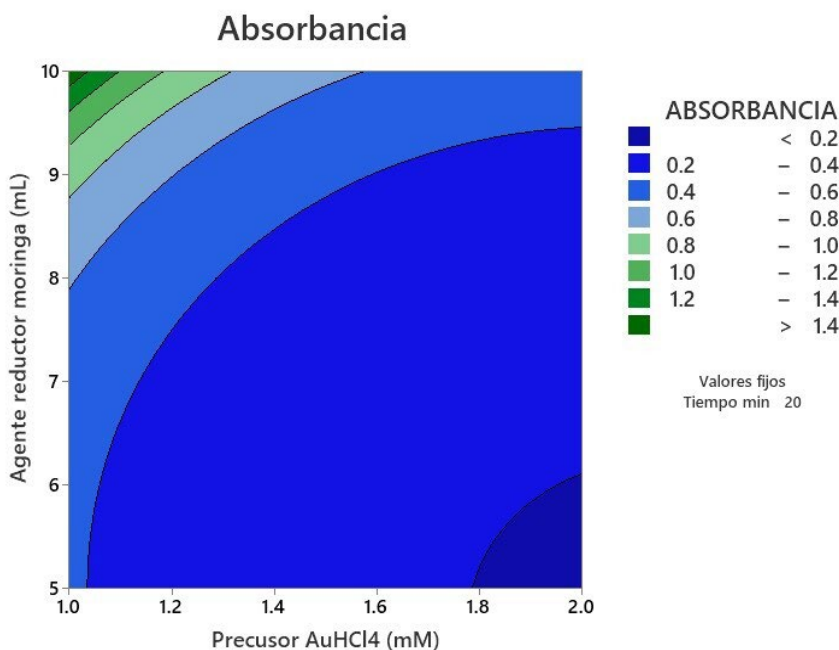


Figura 2. Gráfica de contorno para el efecto de la concentración del precursor y agente reductor sobre la absorbancia.

El tamaño de las nanopartículas influye en las propiedades ópticas, como la absorbancia y la dispersión de la luz, el control preciso del tamaño de las nanopartículas es esencial para optimizar su rendimiento en una amplia gama de aplicaciones (Bonilla-Nepomuceno et al., 2021). En la Tabla 3 se presenta los resultados de los efectos principales, términos cuadráticos y sus interacciones para el

efecto de las variables independientes sobre el tamaño de partícula. Las variables independientes no presentaron un efecto significativo ($p > 0.10$) en la respuesta estudiada, tal y como se observa en la Figura 3, en donde se podrán obtener nanopartículas superiores a 5 nm cuando las concentraciones del agente reductor y el tiempo de reacción alcancen los 7 mL y 20 min respectivamente.

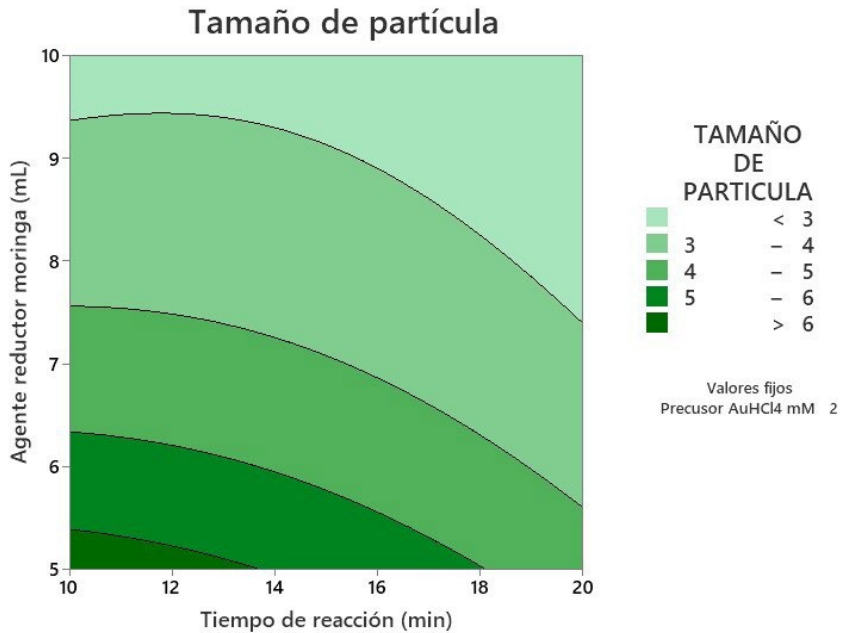


Figura 3. Gráfica de contorno para el efecto de la concentración del tiempo de reacción y agente reductor sobre el tamaño de partícula.

La densidad de las nanopartículas es fundamental porque influye en varias propiedades clave, además de que afecta directamente la funcionalidad y efectividad de las nanopartículas según la aplicación (Bindhu et al., 2020). El análisis de varianza (Tabla 3) comprobó que el término lineal precursor tiene un efecto significativo en la respuesta ($p < 0.10$), pero no así en los términos lineales tiempo y agente reductor, tampoco se observó efecto significativo

en los términos cuadráticos y sus interacciones. La Figura 4 representa la gráfica de contorno del comportamiento de la concentración de la densidad de las nanopartículas del efecto significativo del precursor, observando que, al aumentar la concentración de éste por arriba de 1.4 mM y un tiempo de reacción superior a los 14 min, la densidad de las partículas incrementa hasta alcanzar valores de 6 independientemente de la concentración del agente reductor ($p > 0.10$).

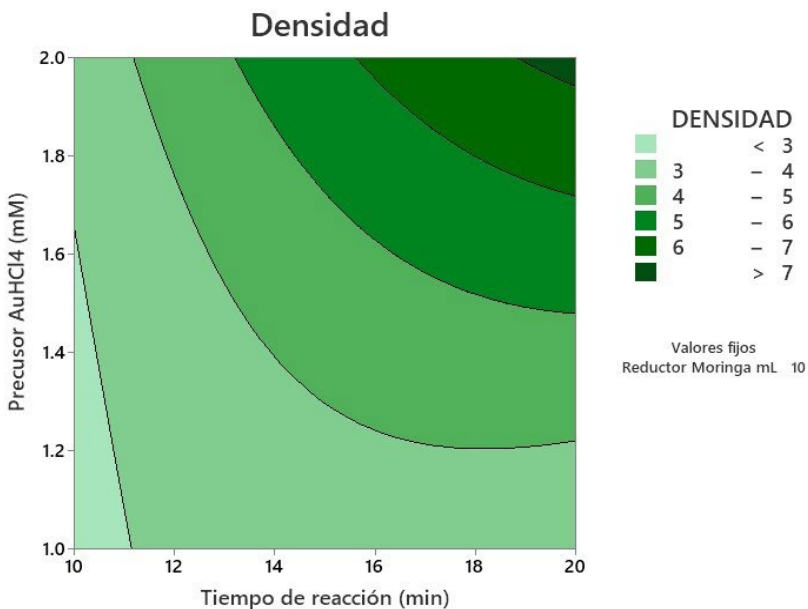


Figura 4. Gráfica de contorno para el efecto de la concentración del tiempo frente al precursor sobre la densidad de las nanopartículas.

Espectrofotometría UV-Visible

La Figura 5 muestra los espectros UV-Visible del extracto acuoso de moringa, el precursor (HAuCl₄) y las AuNPs optimizadas. El espectro UV-Visible del precursor presentó dos bandas de absorción a 228 y 296 nm las cuales se asignan a la transferencia de carga de ligando a metal (King et al., 2015). El espectro UV-Visible del extracto acuoso de moringa mostró bandas típicas de la presencia de flavonoides a 224, 266 y 330 nm (Tošović et al., 2017). Finalmente el espectro UV-Visible de las AuNPs optimizadas presentó una banda de absorbancia máxima a 556 nm indicando la síntesis de estas. Bouttier-Figueroa et al. (2024) menciona que las AuNPs presentan absorbancia del plasmón superficial entre 510 y 560 nm lo que indica que el extracto

acuoso de moringa que contiene compuestos reductores desempeña un papel importante en la conversión de iones de oro en AuNPs estos resultados concuerdan con lo reportado por Mohammed y Hawar, (2022). Por otra parte, la incidencia e intensidad de la banda de resonancia de plasmón superficial depende del tamaño la forma, la composición, y estructura de las nanopartículas formadas (Gupta et al., 2020). Finalmente, el espectro UV-Visible de las AuNPs optimizadas además de presentar la banda de plasmón presentó otra banda a 266 nm que corresponde a la presencia de flavonoides lo que indica que las AuNPs se encuentran funcionalizadas con estos compuestos resultados similares se han reportado para otros extractos (Bonilla-Nepomuceno et al., 2021).

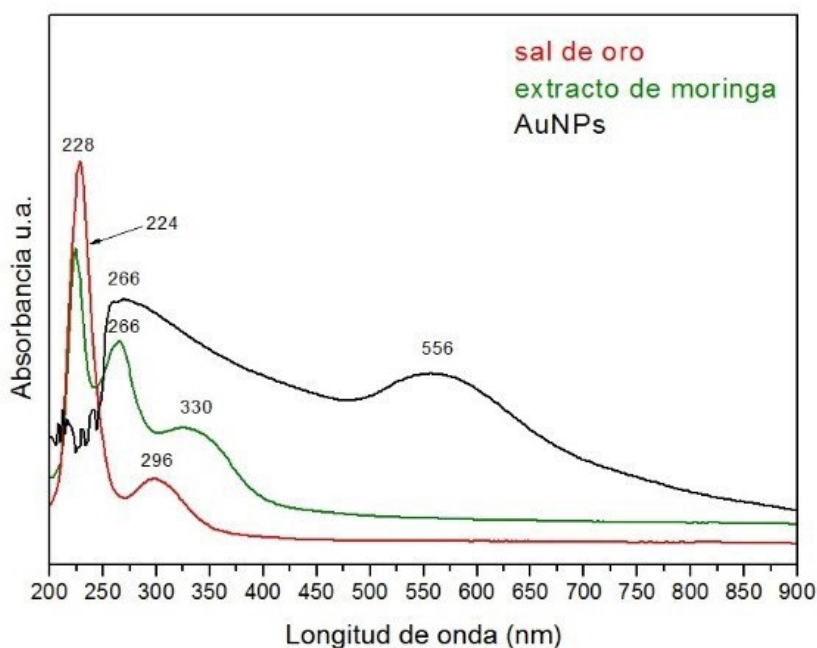


Figura 5. Espectros UV-Visible del precursor (HAuCl₄) (rojo), extracto acuoso de moringa (verde) y AuNPs optimizadas (negro) en la región de 200 a 900 nm.

Espectroscopia FTIR

El análisis FTIR se realizó para identificar los grupos funcionales presentes de las biomoléculas responsables de la síntesis verde de las AuNPs. En la Figura 6 se muestra el espectro FTIR de las AuNPs optimizadas y del extracto acuoso de moringa. El espectro del extracto acuoso de moringa presentó bandas de absorción a 2916 y 2848 cm⁻¹ que están asociadas al grupo funcional del enlace de hidrogeno intramolecular OH (Anand et al., 2015). La banda a 1589 cm⁻¹, se puede atribuir al estiramiento del

enlace C-N y a la deformación de las proteínas de enlace N-H presentes en la moringa (Araújo et al., 2010). La banda a 1398 cm⁻¹ corresponde a la banda de estiramiento del enlace -C=C- (Bindhu et al., 2020). La banda a 1230 cm⁻¹ corresponde al enlace O=C-O-C asociado al grupo éster (Ezeamaku et al., 2018).

El espectro de la AuNPs optimizada mostró dos bandas de absorción a 2920 y 2850 cm⁻¹ que corresponden a los enlaces C-H y C-H₂

respectivamente (Araújo et al., 2010; Reddy et al., 2011; Cruz-Espinoza et al., 2012). Se encontró una banda a 1633 cm^{-1} que corresponde a la presencia de grupos amidas (Ahmad et al., 2016). Se observó una banda a 1535 cm^{-1} relacionada a un estiramiento de compuestos nitro N-O (Khalid et al., 2023). La

banda a 1047 cm^{-1} es representativa del enlace C-O de ésteres y éteres (Gupta et al., 2020). Por lo tanto, el espectro FTIR de las AuNPs muestra la participación de amidas, ésteres, éteres y grupos aromáticos actuando como reductores en el proceso de síntesis verde.

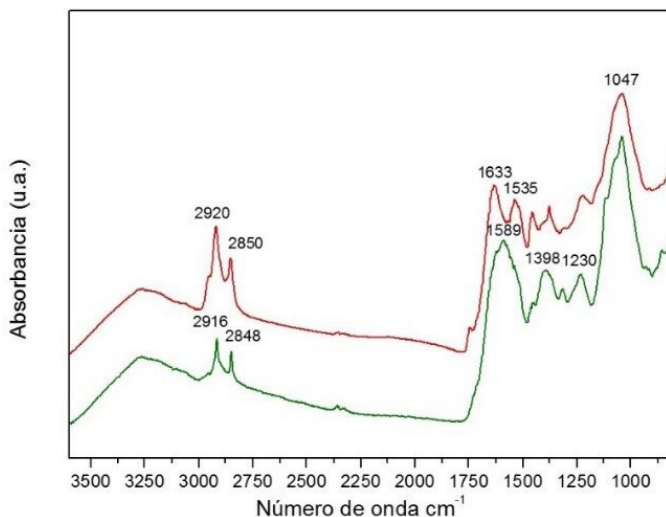


Figura 6. Espectros FTIR de extracto acuoso de moringa (verde) y AuNPs optimizadas (rojo).

Potencial zeta

Las mediciones del potencial zeta confirmaron la estabilidad de las AuNPs optimizada con un valor de -13,21 mV (Figura 7), el potencial zeta negativo de las AuNPs sugiere una fuerte repulsión entre

partículas evitando agregación las nanopartículas (Bhattacharjee, 2013). La carga negativa podría originarse por la presencia de los compuestos de la moringa, actuando como agente reductor y estabilizador de superficie (Kumar et al., 2024).

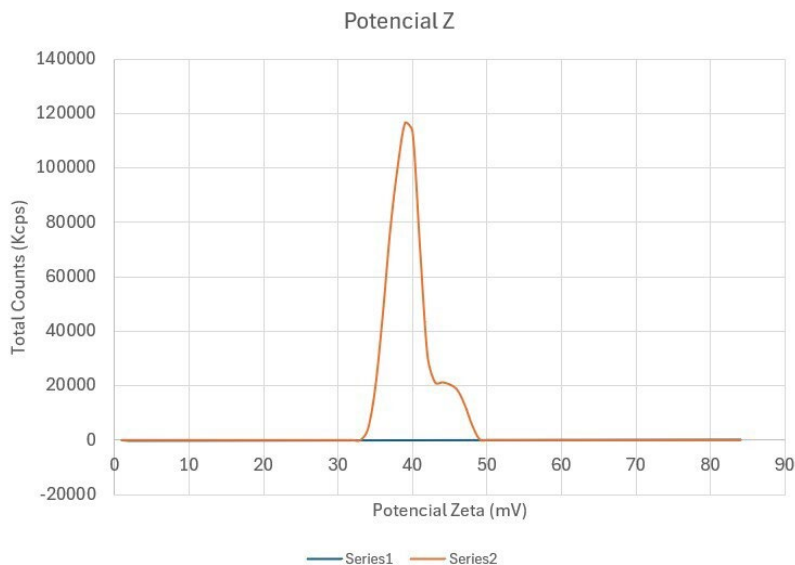


Figura 7. Gráfico de potencial zeta de AuNPs optimizadas y sintetizadas con extracto acuoso de moringa.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Las AuNPs sintetizadas a partir del extracto acuoso de moringa se caracterizaron por SEM lo que nos permitió analizar la forma y dispersión de las AuNPs. La Figura 8 muestra que las AuNPs presentan una morfología predominantemente esférica y con tamaño nanométrico aproxima-

mente entre 3 y 5 nm. Se presenta una distribución uniforme y una superficie lisa sin aglomeraciones, lo que indica que el extracto de moringa puede actuar eficazmente como agente reductor y estabilizador similares resultados han sido reportados (Anand et al., 2015; Kiran et al., 2021; Kumar et al., 2024).

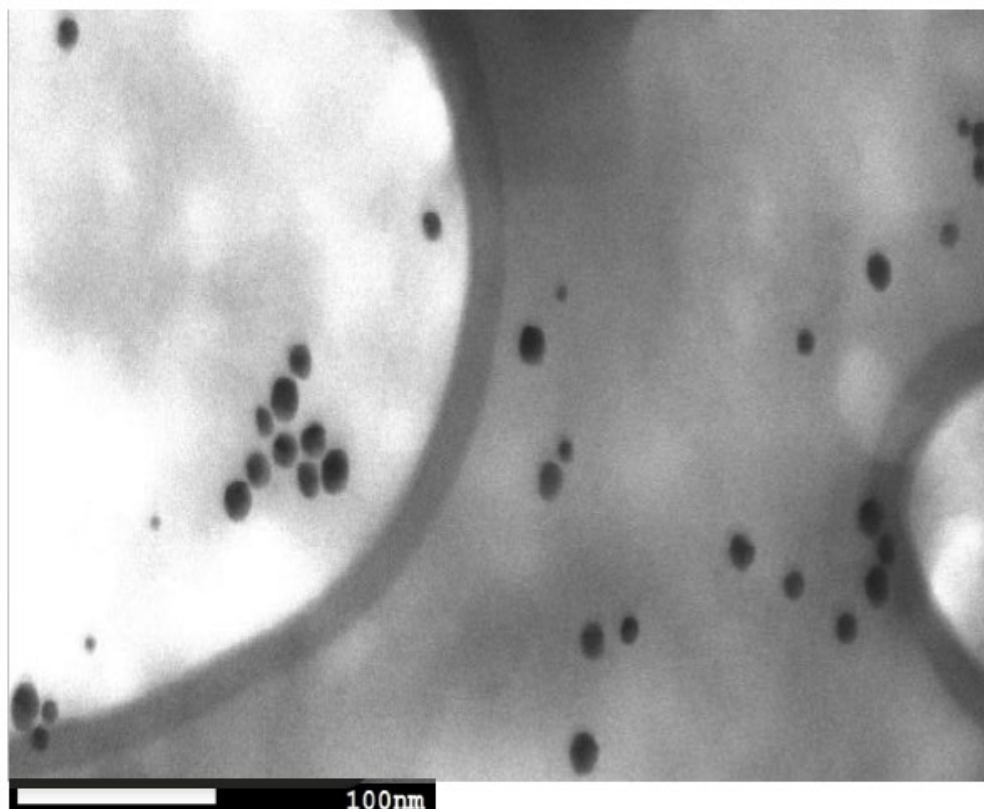


Figura 8. Micrografía SEM de las AuNPs optimizadas y sintetizadas con extracto acuoso de moringa.

CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que el extracto acuoso de moringa (*Moringa oleifera*) es capaz de actuar como agente reductor, reduciendo los iones de oro y promoviendo la formación de AuNPs. El diseño experimental Box-Behnken permitió identificar las condiciones óptimas (precursor 1 mM, agente reductor 5 mL y un tiempo de reacción 15 min) para la síntesis de AuNPs. UV-Visible permitió identificar los compuestos del extracto acuoso de moringa (compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides, antioxidantes) que actuaron como agentes reductores en la síntesis verde. El espectro UV-Visible de las AuNPs presentó una banda de

absorción a 556 nm indicando la presencia del plasmón superficial típico de estos nanomateriales.

El valor de -13.21 Mv de potencial zeta confirmó la estabilidad de las AuNPs optimizadas. Las nanopartículas de oro optimizadas presentaron un tamaño entre 3 y 5 nm y una densidad de 2.43×10^{12} part/mL. SEM mostró la presencia de AuNPs de forma esférica y modispersas. Se concluye que el extracto acuoso de moringa es capaz de actuar como agente reductor en la síntesis verde de AuNPs lo que lo convierte en un agente sostenible en la obtención de nanomateriales.

REFERENCIAS

- Adeyemi, O. S., & Elebiyo, T. C. (2014). Moringa oleifera supplemented diets prevented nickel-induced nephrotoxicity in Wistar rats. *Journal of nutrition and metabolism*, 2014(1), 958621.
- Al Qadi, S., & López, C. R. (2009). Nanopartículas metálicas: oro. In *Nanotecnología farmacéutica: realidades y posibilidades farmacoterapéuticas* (pp. 223-248). Real Academia Nacional de Farmacia.
- Anand, K., Gengan, R. M., Phulukdaree, A., & Chuturgoon, A. (2015). Agroforestry waste Moringa oleifera petals mediated green synthesis of gold nanoparticles and their anti-cancer and catalytic activity. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1105-1111.
- Araújo, C. S., Melo, E. I., Alves, V. N., & Coelho, N. M. (2010). Moringa oleifera Lam. seeds as a natural solid adsorbent for removal of AgI in aqueous solutions. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 21, 1727-1732.
- Bhattacharjee, S. (2013). Moringa oleifera Leaf Extract Mediated Green Synthesis of Stabilized Gold Nanoparticles.
- Bhushan, B. (2017). Introduction to nanotechnology. In *Springer Handbook of Nanotechnology* (pp. 1-19). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bindhu, M. R., Umadevi, M., Esmail, G. A., Al-Dhabi, N. A., & Arasu, M. V. (2020). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles from Moringa oleifera flower and assessment of antimicrobial and sensing properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 205, 111836.
- Bocarando-Guzmán, M. D., Rios-Corripio, M. A., Hernández-Cázares, A. S., Gómez-Merino, F. C., & Servín-Juárez, R. (2020). Caracterización de la oferta de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) en México. *Agro Productividad*, 13(2).
- Bonilla-Nepomuceno, G., Rios-Corripio, M. A., Gómez-Merino, F. C., Méndez-Rojas, M. Á., Arcila-Lozano, L. S., Hernández-Cázares, A. S., & Rojas-López, M. (2021). Analysis by response surface methodology of gold nanoparticles obtained by green chemical reduction using aqueous coffee pulp extract (*Coffea arabica*). *Canadian Journal of Chemistry*, 99(6), 519-530.
- Bouttier-Figueroa, D. C., Loreto-Romero, M. A., Roldan, M. A., González-Gutiérrez, F. H., Cortez-Valadez, M., Flores-Acosta, M., & Robles-Zepeda, R. E. (2024). Green synthesis of gold nanoparticles via Moringa oleifera seed extract: antioxidant, antibacterial and anticarcinogenic activity on lung cancer. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 59(5), 231-240. <https://doi.org/10.1080/10934529.2024.2366736>.
- Choudhary, R., Kumari, A., Kachhwaha, S., Kothari, S. L., & Jain, R. (2024). Moringa oleifera: Biosynthesis strategies for enhanced metabolites and role in green nanoparticle synthesis. *South African Journal of Botany*, 170, 271-287.
- Cruz-Espinoza, J. E., Orduña-Díaz, A., Rosales-Perez, M., Zaca-Morán, O., Delgado-Macuil, R., Gayou, V. L., & Rojas-López, M. (2012). FTIR analysis of phenolic extracts from Moringa oleifera leaves. *J. Biom. Biostat*, 11, 2802.
- De Jesús Jiménez-Martínez, W., & Vázquez-Lira, J. C. (2024). Una revisión de nanopartículas de oro: características fisicoquímicas y su respuesta celular en macrófagos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(33), 1e-16e.
- Echevarría García, N. (2016). Síntesis y caracterización de nanopartículas de oro.
- Espinosa, P. N., A. López L. y J. Martínez S. (2013). Áreas con alto potencial agroecológico para el cultivo de Moringa (*Moringa oleifera* L.) para la producción de biocombustibles en el estado de Chiapas, México. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- Ezeamaku, U., Chike-Onyegbula, C., Iheaturu, N., Onwuka, E., Ezike, C., & Onuchukwu, S. (2018). Treatment of lead contaminated wastewater using aluminium sulphate and Moringa oleifera as coagulants. *Niger J. Polym. Sci. Technol*, 13, 82-92.
- Ezz El-Din Ibrahim M, Alqurashi RM, Alfaraj FY. Antioxidant Activity of Moringa oleifera and Olive Olea europaea L. Leaf Powders and Extracts on Quality and Oxidation Stability of Chicken Burgers. *Antioxidants*. 2022; 11(3):496. <https://doi.org/10.3390/antiox11030496>
- Fatima, Z., Saleem, R., Khan, R. R. M., Liaqat, M., Pervaiz, M., Saeed, Z., ... & Rasheed, S. (2024). Green Synthesis, Properties, and Biomedical Potential of Gold Nanoparticles: A Comprehensive Review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103271.
- Gupta, S., Hemlata, H., & Tejavath, K. (2020). Synthesis, characterization and comparative anticancer potential of phytosynthesized mono and bimetallic nanoparticles using Moringa oleifera aqueous leaf extract. *Beilstein Arch*, 1, 95.
- Haiss, W., Thanh, N. T., Aveyard, J., & Fernig, D. G. (2007). Determination of size and concentration of gold nanoparticles from UV-Vis spectra. *Analytical chemistry*, 79(11), 4215-4221.
- Katas, H., Lim, C. S., Azlan, A. Y. H. N., Buang, F., & Busra, M. F. M. (2019). Antibacterial activity of biosynthesized gold nanoparticles using biomolecules from *Lignosus rhinocerotis* and chitosan. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(2), 283-292.
- Khalid, S., Arshad, M., Mahmood, S., Siddique, F., Roobab, U., Ranjha, M. M. A. N., & Lorenzo, J. M. (2023). Extraction and quantification of Moringa oleifera leaf powder extracts by HPLC and FTIR. *Food Analytical Methods*, 16(4), 787-797.
- King, S. R., Massicot, J., & McDonagh, A. M. (2015). A straightforward route to tetrachloroauric acid from gold metal and molecular chlorine for nanoparticle synthesis. *Metals*, 5(3), 1454-1461.
- Kumar, S., Shukla, A., Singh, S. P., Singh, R. K., Patel, A. K., Verma, P. K., ... & Acharya, A. (2024). Synthesized Gold Nanoparticles with Moringa Oleifera leaf Extract Induce Mitotic Arrest (G2/M phase) and Apoptosis in Dalton's Lymphoma Cells. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 1-17.
- Márquez, E., Hernández, D., Míguez, M., Soler, F., & Pérez, M. (2021). Las nanopartículas y sus aplicaciones biomédicas. *Universidad de Extremadura. España*, 1, 9.
- Mohammed, G. M., & Hawar, S. N. (2022). Green biosynthesis of silver nanoparticles from moringa oleifera leaves and its antimicrobial and cytotoxicity activities. *International Journal of Biomaterials*, 2022(1), 4136641.
- Olagbemi, P. T., & Philip, C. N. A. (2014). Proximate analysis and chemical composition of raw and defatted Moringa oleifera kernel. *Advances in Life Science and Technology*, 24, 92-99.

- Orbe Z. (2021) Una breve introducción a las nanopartículas de oro. *Revista Quiu*. <https://quiurevista.com/una-breve-introduccion-a-las-nanoparticulas-de-oro/>
- Reddy, D. H. K., Ramana, D. K. V., Seshaiyah, K., & Reddy, A. V. R. (2011). Biosorption of Ni (II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. *Desalination*, 268(1-3), 150-157.
- Rockwood, J. L., Anderson, B. G., & Casamatta, D. A. (2013). Potential uses of *Moringa oleifera* and an examination of antibiotic efficacy conferred by *M. oleifera* seed and leaf extracts using crude extraction techniques available to underserved indigenous populations. *International Journal of Phytotherapy Research*, 3(2), 61-71.
- Rosas-Vara, D., Molina-Contreras, J. R., Villalobos-Piña, F., Zenteno, J. C., Buentello-Volante, B., Chacon-Camacho, O. F., ... & Rios-Corripio, M. A. (2020). Point mutation in the TGFBI gene: surface-enhanced infrared absorption spectroscopy (SEIRAS) as an analytical method. *Chemical Papers*, 74(4), 1079-1086.
- Tošović, J., & Marković, S. (2017). Reproduction and interpretation of the UV-vis spectra of some flavonoids. *Chemical Papers*, 71, 543-552.
- Yahaya, M. L., Zakaria, N. D., Noordin, R., & Razak, K. A. (2022). Synthesis of large and stable colloidal gold nanoparticles (AuNPs) by seeding-growth method. *Materials Today: Proceedings*, 66, 2943-2947.

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 9/10/2024

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE *ARTHROSPIRA MAXIMA* EN PRIMAVERA BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN CLIMA SEMITROPICAL

EVALUATION OF THE PRODUCTION PARAMETERS OF *ARTHROSPIRA MAXIMA* IN SPRING UNDER GREENHOUSE CONDITIONS IN A SEMI-TROPICAL CLIMATE

Wenndy López Wong⁽¹⁾
 María Antonieta Ríos Corripio⁽²⁾
 Ma. Rocío Torres López⁽³⁾
 Leticia Mora Soler⁽⁴⁾
 Carlos Fernando Gómez Merino⁽⁵⁾
 Aleida Selene Hernández Cázares^{*(1)}

RESUMEN

El cultivo de espirulina a gran escala sigue teniendo limitaciones de producción, entre ellas los altos costos de la formulación del medio de cultivo. El objetivo de este estudio fue evaluar los parámetros físicos, químicos y cinéticos de crecimiento de la cianobacteria *Arthrospira maxima*, en medio de cultivo Jourdan (MJ) y Zarrouk (MZ) en condiciones de invernadero en clima semitropical de Córdoba, Veracruz, en época de primavera. Se evaluaron los parámetros de pH, temperatura, intensidad de luz, concentración de carbonatos y densidad óptica (670 nm), para determinar parámetros cinéticos. La cinética de crecimiento indicó que el crecimiento máximo para ambos medios fue el día 15, y se consideró como día óptimo de

cosecha. En el medio Zarrouk se encontraron diferencias significativas en los valores de concentración celular máxima de 2.04 ± 0.13 g/L, tasa máxima de crecimiento de 0.14 ± 0.00 d y productividad de 116.76 ± 8.11 mg/Ld con respecto al medio Jourdan con una concentración celular máxima de 1.36 ± 0.08 g/L, una tasa máxima de crecimiento de 0.09 ± 0.00 d y una productividad de 67.24 ± 6.79 mg/Ld. En los valores de pH, luz y temperatura no se encontró diferencias significativas. Se observó una asimilación del carbono de 7.62 ± 2.02 mg/L CaCO₃ para el medio Zarrouk y 4.31 ± 1.04 mg/L CaCO₃ en medio Jourdan. Se concluye que la formulación del medio Jourdan favorece el crecimiento con un rendimiento de biomasa de 57.60%, pero fue 1.5 veces menor en la concentración celular y su tasa de crecimiento que el medio Zarrouk; sin embargo, su uso como medio de cultivo a nivel comercial podría ser una opción rentable.

Palabras Clave: parámetros fisicoquímicos, *Arthrospira maxima*, medios de cultivo, parámetros cinéticos

ABSTRACT

Large-scale cultivations of spirulina still face production limitations, including the high costs associated with culture medium formulation.

⁽¹⁾Colegio de Posgraduados Campus Córdoba - Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. lopez.wenndy@colpos.mx; *aleyse@colpos.mx. ⁽²⁾CONAHCYT- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba- Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, MÉXICO. C.P. 94946. rios.antonieta@colpos.mx. ⁽³⁾Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Avenida Universidad 350, Cuitláhuac, Veracruz, México. C.P. 94910. 20213k101045@utcv.edu.mx. ⁽⁴⁾Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos Carrer del Catedràtic Agustín Escardino Benlloch, 7, 46980 Paterna, València, España. lemoso@iata.csic.es. ⁽⁵⁾Colegio de Posgraduados Campus Montecillo - Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México. fernandg@colpos.mx

This study aimed to evaluate the physical, chemical, and kinetic growth parameters of the cyanobacterium *Arthrospira maxima*, in Jourdan (MJ) and Zarrouk (MZ) culture media under greenhouse conditions in the semitropical climate of Córdoba, Veracruz, during the spring season. The parameters assessed included pH, temperature, light intensity, carbonate concentration, and optical density (670 nm) to determine kinetic parameters. The growth kinetics indicated that the maximum growth for both media was on day 15 considered the optimal harvest day. In the Zarrouk medium, significant differences were found in the maximum cell concentration values of 2.04 ± 0.13 g/L, maximum growth rate of 0.14 ± 0.00 d, and productivity of 116.76 ± 8.11 mg/Ld, compared to the Jourdan medium a maximum cell concentration of 1.36 ± 0.08 g/L, a maximum growth rate of 0.09 ± 0.00 d. and productivity of 67.24 ± 6.79 mg/Ld. No significant differences were observed in pH, light, and temperature values. Carbon assimilation of 7.62 ± 2.02 mg/L CaCO_3 was observed in the Zarrouk medium, and 4.31 ± 1.04 mg/L CaCO_3 in the Jourdan medium. It was concluded that the Jourdan medium formulation supports growth with a biomass yield of 57.60%, but the cell concentration and growth rate were 1.5 times lower than in the Zarrouk medium. However, its use as a culture medium at a commercial level could be a cost-effective option.

Keywords: physicochemical factors, *Arthrospira maxima*, culture media, kinetic parameters

INTRODUCCIÓN

Las cianobacterias son organismos fotosintéticos que en condiciones aeróbicas pueden fijar dióxido de carbono (CO_2) (Kumar et al., 2011) y han sido exploradas recientemente por la capacidad de generar una gran variedad de productos como pigmentos antioxidantes (clorofila, ficocianina), compuestos fenólicos, ácidos grasos esenciales y vitaminas (AlFadhly et al., 2022); así como, por sus aplicaciones en la industria cosmética, biotecnológica, alimentaria, de productos farmacéuticos, y en la agrícola como biofertilizantes, entre otras (Soni et al., 2017). Algunas de estas cianobacterias pertenecen a especies de *Arthrospira*, la más cultivada y consumida a nivel mundial es la espirulina, nombre comercial (Costa et al., 2019; García-Ishimine et al., 2020). Este género destaca por su alto contenido proteico (60-70%) si se cultiva en condiciones no limitadas de nitrógeno

y es ampliamente comercializada para el consumo humano y animal como suplemento alimenticio (Da Rosa et al., 2015). Es apreciada por su elevado valor nutritivo, rica en aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados, carotenoides, vitaminas y hierro (Haoujar et al., 2022). Además de su importancia para la elaboración de alimentos funcionales, asociados a la promoción de la salud y aplicaciones terapéuticas en enfermedades crónico-degenerativas (Grochowicz et al., 2021).

La composición bioquímica de *A. maxima* varía según las condiciones de cultivo, como temperatura óptima (30°C), luz (4000 lux) con un fotoperiodo de 12 h luz/12 h oscuridad, volumen de inoculación (10%), agitación (AlFadhly et al., 2022) y pH alcalino (8.5-10.5) (Sudhakar and Premalatha, 2012); por tanto, resulta importante optimizar estas condiciones fisicoquímicas para obtener compuestos de interés y garantizar su rentabilidad, en aplicaciones comerciales (Padilla, 2018). También es importante considerar la calidad del agua y el contenido de nutrientes (Ahsan et al., 2008), siendo el costo de estos últimos el segundo factor que impacta en el costo de producción de la cianobacteria a escala comercial (Rajasekaran et al., 2016); el más utilizado es el medio Zarrouk, medio que ha servido como estándar durante muchos años (Zarrouk, 1966), por su impacto en la productividad y la generación de otros compuestos de interés en la espirulina (Çelekli et al., 2009). El medio Zarrouk contiene mayor concentración y número de nutrientes y representa aproximadamente el 90% de los costos de producción; por lo tanto, sigue siendo una limitante cuando se requiere en la producción a escala comercial; por lo que se siguen indagando sobre alternativas para reducir los costos, reducir el número de sales o la utilización de otras fuentes de nutrientes (Fanka et al., 2022). Por tanto, en este estudio se evaluaron los parámetros fisicoquímicos y cinéticos de crecimiento de *A. maxima* en dos medios de cultivo, Jourdan (MJ) y Zarrouk (MZ), en condiciones de invernadero en clima semitropical de Córdoba, Veracruz, en época de primavera.

MÉTODOS

La cianobacteria *A. maxima* fue cultivada en fase logarítmica durante 15 días en la época de primavera (mayo-2024), en un invernadero con malla sombra, ubicado en el área experimental del cultivo de espirulina del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Veracruz, México; ubicado a 18°

51° 24' N, 96° 51' 47" W, a 645 m (Fernández-Corte et al., 2022). Se utilizó un volumen de 3L de cultivo, en botes transparentes, con 10 % inoculación de la cepa y una concentración celular inicial de 0.3 g/L, por triplicado. El MZ fue preparado a una

concentración de 260mM y el medio Jourdan con una concentración de 118 mM, en agua purificada, el contenido de sales se muestra en la Tabla 1. Los cultivos se mantuvieron en agitación constante con una bomba de aire con caudal de 2.5 L/h.

Tabla 1. Composición química de los medios de cultivo Zarrouk y Jourdan para el cultivo de espirulina (*Arthospira maxima*).

Compuesto	Medio Zarrouk Control (g/L)	Medio Jourdan Control (g/L)
Bicarbonato de sodio (NaHCO ₃)	16.8	8
Fosfato de potasio (K ₂ HPO ₄)	0.5	----
Fosfato trisódico (Na ₃ PO ₄)	----	0.1
Nitrato de sodio (NaNO ₃)	2.5	
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)	----	2
Cloruro de sodio (NaCl)	1	----
Etilendiaminetetraacetato disódico (EDTA) (C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ *2Na*2H ₂ O)	0.08	----
Sulfato ferroso heptahidratado (FeSO ₄ *7 H ₂ O)	0.01	0.1
Sulfato de magnesio heptahidratado (Mg SO ₄ * 7 H ₂ O)	0.2	0.2
Cloruro de calcio dihidratado (CaCl ₂ * 2H ₂ O)	0.04	
Solución nutritiva (1 mL L ⁻¹)		
Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	2.86	
Molibdato de sodio (Na ₂ Mo ₇ O ₄)	0.0177	
Sulfato de cobre pentahidratado (Cu SO ₄ * 5 H ₂ O)	0.079	
Cloruro de manganeso tetrahidratado (MnCl ₂ *4 H ₂ O)	1.81	
Sulfato de Zinc tetrahidratado (Zn SO ₄ *4 H ₂ O)	0.222	

Fuente: (Zarrouk 1966, tomado de Madkour et al., 2012; Rodríguez-Palacio et al., 2015)

Los parámetros físicos y químicos como la temperatura, pH e intensidad lumínica se midieron diariamente de manera in situ en horario de 7-9 a.m. La medición de la temperatura se realizó con el equipo Water Quality Tester Modelo Número: C-300 Backlights); el pH con medidor de PH/ORP/TEMP marca Hanna modelo: HI-5521-01 Serie: 07350007101 y la intensidad lumínica con sensor digital lux meter marca: RoHS; range up to 200 000 Lote: GS05667 Serie: X0023PVWYJ.

El contenido total de carbono inorgánico (carbonatos, bicarbonatos) se determinó según la metodología de Da Silva Braga et al. (2018), por valoración ácido-base en un volumen de 15 mL de cultivo filtrado. Los cálculos respectivos se realizaron en base al volumen gastado de ácido y se reportaron como mg/L de CaCO₃.

Los parámetros cinéticos de crecimiento en los medios de cultivo evaluados se realizaron a partir del valor de densidad óptica (DO_{λ 670 nm}), según la metodología de Colla et al. (2007) mediante UV-Visible (Thermo Scientific Evolution 600, USA). Donde la concentración celular máxima (C_{x máx}; mg/L) se calculó mediante una curva de regresión lineal relacionando la DO, con el peso de biomasa seca de *A. maxima* y se estimó con la ecuación

$Y = 0.7898x - 0.0126$ (R² = 0.9932), donde **X** es la concentración celular y **Y** es la absorbancia medida por espectro UV a DO (λ 670 nm). La tasa de velocidad máxima de crecimiento (μ; div/d, Ec. (1); el tiempo de duplicación (td; d/div). Ec. (2) y la productividad (P; g/Ld) Ec. (3) se calculó según Ogbonna et al. (1995) y Levasseur et al. (1993):

Tasa máxima de crecimiento

$$\mu m \left(\frac{div}{día} \right) = \frac{\ln(X_2/X_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Productividad

$$P \left(\frac{mg}{Ld} \right) = (X_2 - X_1)/t_m \quad (2)$$

Tiempo de duplicación

$$td \left(\frac{día}{div} \right) = \ln 2 = 0.693/\mu \quad (3)$$

Donde: X_1 =concentración celular al tiempo t_1 (mg/L)
 X_2 = concentración celular al tiempo t_2 (mg/L)
 X_m = concentración celular máxima (mg/L)
 t_1 = tiempo inicial cultivo (días)
 t_2 = tiempo final de cultivo (días)
 t_m = tiempo de cultivo relacionado con la concentración celular máxima (días)

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias entre tratamientos, y se utilizó la comparación de medias por el método de Tukey con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$). Se utilizó el programa SAS Institute Inc. (2002) versión SAS / STAT 9.0 User’s Guide.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento y parámetros físico y químicos

Los parámetros que influyen en la producción de espirulina son la temperatura, la iluminación, el pH, la agitación, partículas disueltas, volumen de inoculación, nutrientes, y calidad del agua (AlFadhly et al., 2022). En la Tabla 2, se presentan los valores de los parámetros físico y químicos obtenidos en este estudio.

El género *Arthrospira* se considera un organismo mesófilo que crece a temperaturas moderadas entre 30 °C y 40 °C con alta actividad fotosintética y por tanto duplicación celular (Borowitzka y Vonshak, 2017). En este estudio se reporta que la temperatura promedio durante el cultivo fue de 30°C (Figura 1), rango de temperatura ideal para el crecimiento y productividad de biomasa. Delrue et al. (2017) mencionan que los procesos

metabólicos, la producción de células y la cantidad de biomasa puede verse afectada por la temperatura, a 25°C se alcanza un máximo crecimiento con mayor contenido de clorofila, mientras que a 30 °C encontraron mayor contenido de biomasa. Soni et al. (2019) indican que, a una temperatura de 32 °C se obtuvo una productividad 856.8 mg/Ld; una concentración celular de 1.2 g/L y un tiempo de duplicación de 5.5 días para el cultivo de *S. platensis* en un reactor abierto en MZ, como se observa estos autores obtuvieron mayor productividad con respecto a lo obtenido en este estudio, posiblemente debido a que utilizaron urea en el medio de cultivo como fuente de nitrógeno y proporciona un mejor rendimiento de biomasa (Susanna et al., 2019). Por otro lado, Soni et al. (2019) también mencionan que, a temperaturas menores a 25°C y mayores de 35°C se produce fotoinhibición; de ahí que posiblemente las tasas de crecimiento y la producción de biomasa fueron menores en este estudio. Es decir, como la cianobacteria al ser dependiente de la luz y de la temperatura para su crecimiento se ve afectado el metabolismo y por tanto la productividad (Jensen y Knutsen, 1993), al disminuir o aumentar estos parámetros se ve afectado óptimo de crecimiento. Acién et al. (2020) indican que existe un mínimo y un máximo de luz requerida para realizar la fotosíntesis, cuando existe irradiación por encima del punto de saturación, se produce la fotoinhibición, lo que provoca un daño reversible al aparato fotosintético.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del cultivo de *A. maxima* en medio Jourdan y Zarrouk en época de primavera 2024.

Parámetros Fisicoquímicos	Medio Zarrouk	Medio Jourdan
Luz (lux)	5154.88±28 ^a	5016.66±29 ^a
Temperatura (°C)	29.52±2.20 ^a	30.22±2.45 ^a
pH	10.23±0.55 ^a	10.21±0.44 ^a
ABS ($\lambda=670\text{nm}$)	0.91±0.48 ^a	0.72±0.26 ^b
Carbono inorgánico total (mg/L)	7.73±2.17 ^a	4.32±1.10 ^b

Los datos se presentan como medias ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($p \geq 0.05$).

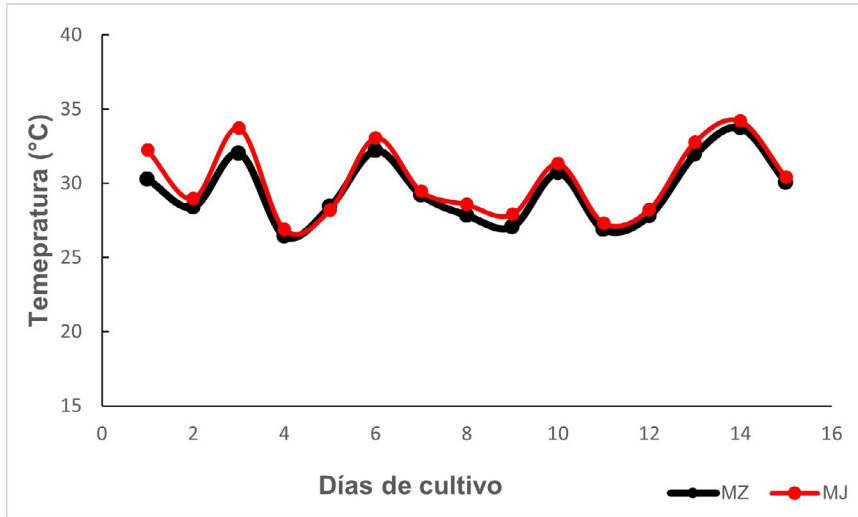


Figura 1. Evolución de la temperatura durante el crecimiento de *A. maxima* en medio de cultivo Zarrouk (●MZ) y Jourdan (●MJ) durante la época de primavera 2024.

Un pH alto favorece el crecimiento, productividad y composición fitoquímica de *A. maxima*. En la Figura 2a se observa que, durante el tiempo de cultivo, este se va alcalinizando con los días, por el consumo de bicarbonato de sodio y se va liberando OH⁻ al medio, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y la solubilidad del CO₂, en el medio y minerales afectando las propiedades fisiológicas de algas (Beyene, 2016). Para este trabajo se obtuvieron valores promedio de 10.23±0.55 para MZ y 10.21±0.44 para MJ sin diferencias

significativas. *A. maxima* es una cianobacteria alcalófila que prospera en condiciones de pH elevado, siendo el óptimo entre 9.5 y 9.8 (Chrimadha et al., 2019). Por arriba de un pH = 11, el cultivo cesa su crecimiento y no soporta cambios bruscos en este parámetro. Jiménez et al. (2003) indican que incluso a pH de 10.5 la tasa de crecimiento disminuye. No obstante, estas condiciones previenen el riesgo por contaminación de otros microorganismos como hongos, bacterias (Fanka et al., 2022).

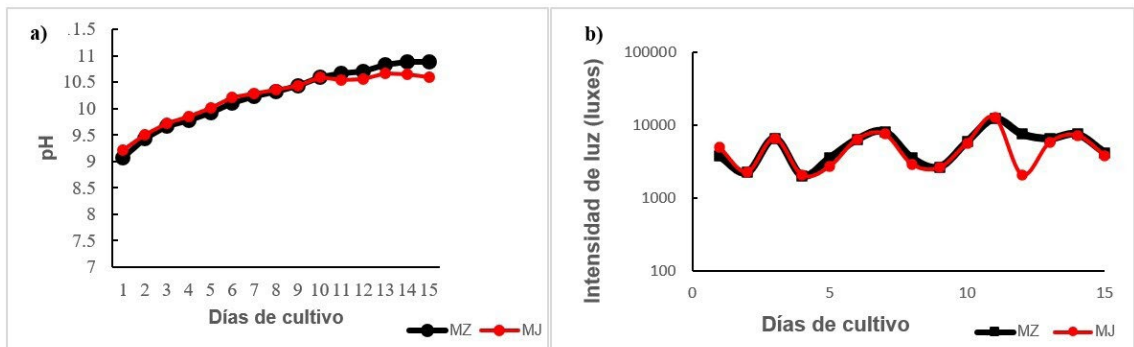


Figura 2. a) pH, b) intensidad de luz *A. maxima* en medio de cultivo Zarrouk (●MZ) y Jourdan (●MJ) durante la época de primavera 2024.

Por otro lado, *A. maxima* es una cianobacteria fotosintética, de ahí la importancia de la calidad y un buen suministro de luz (Habib et al., 2008); un rango óptimo de luz para el crecimiento de espirulina es de 1500 a 3500 lux, cuando se cultiva en un sistema cerrado (Soni et al., 2019). Los valores reportados para este cultivo bajo condiciones de luz natural en invernadero se observó un promedio de intensidad

de luz de 5000 lux (Figura 2b), que favoreció su crecimiento en ambos medios de cultivo. Sin embargo, los parámetros cinéticos del MZ presentaron diferencia significativa con respecto a los del MJ según se muestran en la Tabla 2. El medio MZ promueve mayor crecimiento y productividad, por la concentración de bicarbonato de sodio que utiliza (Tabla 1) como fuente de carbono a diferencia

del MJ. Uebel et al. (2019) indican que el MZ tiene una composición química de nutrientes adecuada para el crecimiento de la cianobacteria, incluso en sistemas de cultivos abiertos y en condiciones de luz y temperatura no controladas como las del invernadero utilizadas para este estudio.

Mirhosseini et al. (2020) reportan valores de los parámetros cinéticos menores a los encontrados para estas condiciones, como la tasa de crecimiento, productividad y tiempo de duplicación, aunque la concentración celular fue ligeramente mayor ($\mu=0.096\text{ d}^{-1}$; $P=98\text{ mg/Ld}$; $C_{\text{máx}}=2.15\text{ g/L}$;) con fuente de luz blanca Led controlada a 5000 lux para

la cepa *Spirulina maxima*. Para el MJ modificado con adición de urea y salinidad de 12 PSU, Claude et al. (2023) reportan para condiciones de invernadero con luz natural, valores de $\mu=0.013\text{ d}^{-1}$; $P=16\text{ mg/Ld}$; concentración celular máxima ($C_{\text{máx}}=0.84\text{ g/L}$), siendo la concentración celular y la productividad menores a lo reportado en este estudio. Además, reportan una tasa de crecimiento ligeramente mayor que podría atribuirse a la salinidad del medio de cultivo y el contenido de nutrientes como la urea o el fosfato de amonio. Markou et al. (2014) indican que el fósforo es uno de los nutrientes necesario esencial para el crecimiento de las cianobacterias para mantener altas tasas de producción.

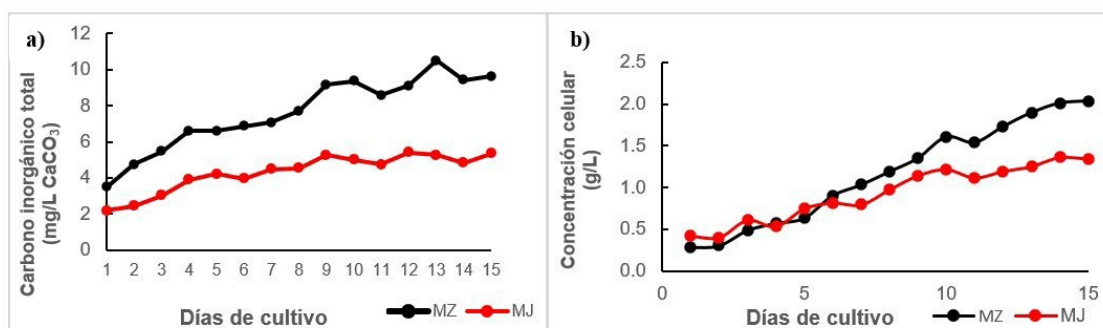


Figura 3. a) Consumo de carbono inorgánico b) crecimiento de *A. maxima* en medio de cultivo Zarrouk (●MZ) y Jourdan (●MJ) durante la época de primavera 2024.

El carbono inorgánico total es la suma de las especies químicas en equilibrio como el CO₂, HCO₃⁻ y CO₂⁻² que se disuelven en el medio de cultivo, y son las fuentes de carbono necesarias para el crecimiento de la cianobacteria (Morales et al., 2016). En la Figura 3a se observa el consumo de carbono y el crecimiento celular reportado como biomasa seca en la Figura 3b. El consumo de carbono inorgánico reportado en la Tabla 2 representa el 0.47% de CO₂ en MZ con diferencia significativa con respecto MJ con el 0.27% de CO₂. Lo que se traduce en un mayor crecimiento de la cianobacteria en MZ, la fuente de carbono es mayor en este medio de cultivo, como se muestra en la Tabla 1, además aumenta su disponibilidad cuando aumenta el pH en el medio. Pereira et al. (2019) indican que, al agregar más bicarbonato de sodio, la espirulina lo consume liberando iones OH⁻ al medio, alcalinizándolo, tal y como se muestra en la Figura 2a donde el pH aumenta a medida que crece la cianobacteria. Morales (2002) indica que la concentración de CO₂ en los cultivos de *Spirulina spp.* varía entre 0.05 – 5% (v/v), la concentración del

carbono en este estudio se encontró dentro de esos rangos, lo que permitió un buen crecimiento. Lu et al. (2019) reportan que con un 3.08% de fijación de CO₂, encontraron $P=58.38\text{ mg/Ld}$; $\mu=0.49\text{ d}^{-1}$ para el cultivo de *Spirulina platensis* en MZ a través de un sistema de compostaje aeróbico, por lo que la fuente de carbono de los medios de cultivo fue asimilada, además las condiciones en invernadero permitieron un buen crecimiento.

Crecimiento y parámetros cinéticos

Los parámetros cinéticos describen cómo cambia la población de la cianobacteria en función del tiempo para las condiciones de cultivo, también permiten identificar las condiciones óptimas bajo las cuales la espirulina crece más rápidamente y produce la mayor cantidad de biomasa (Vásquez-Villalobos et al., 2014). En la Figura 4, se observa que la concentración celular fue mayor en MZ con diferencia significativa de concentración

celular máxima (2.03 ± 0.13 g/L) con respecto al MJ (1.36 ± 0.08 g/L) al día 15 de crecimiento. Esta diferencia se podría explicar porque la fuente de carbono del MZ es el doble de la del MJ; además contiene mayor micronutrientes y salinidad lo que permite una mayor disolución de CO_2 en el medio, siendo este gas la fuente primaria de carbono (Singh y Dhar, 2011).

El crecimiento de biomasa en el MZ fue mayor a lo reportado por Borowitzka y Vonshak, (2017) (1.60 g/L) en condiciones mayores de intensidad de luz; y menor a lo reportado por Fanka et al. (2022) (1.89 g/L) en MZ modificado con menores concentraciones de bicarbonato de sodio, a intensidades de luz mayores.

Mientras que el valor de la biomasa en MJ fue mayor a lo reportado por Claude et al. (2023) (0.84 g/L) en *S. platensis* con MJ modificado con una salinidad de 3.5 % y temperatura de 29°C , en un volumen de 15 L y menor a lo reportado por López-Saldarriaga, (2019) (1.68 g/L) para la cepa *A. maxima* cepa OLEO 5 adicionado con cloruro de sodio (2 g/L) en condiciones controladas de temperatura y luz, en un volumen de 1L. Estas diferencias, se explican debido a que a que, a un volumen más pequeño de cultivo, se logra una mayor productividad (Göksan et al., 2007) dado que la longitud de onda de luz es más corta, favoreciendo el crecimiento (Soni et al., 2019); por lo tanto, las condiciones de luz y temperatura tiene gran influencia sobre el crecimiento.

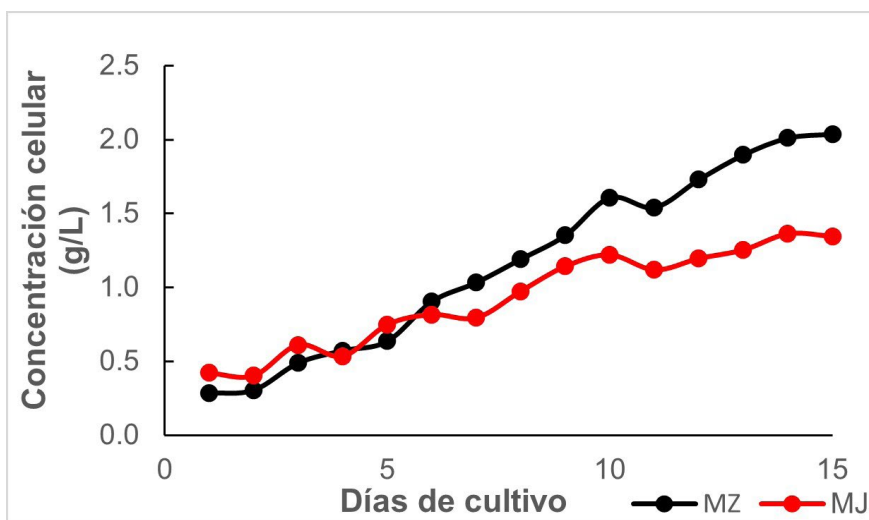


Figura 4. Curva de concentración celular de *A. maxima* en medio de cultivo Zarrouk (●MZ) y Jourdan (●MJ) durante la época de primavera 2024.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros cinéticos del cultivo. El MJ y MZ presentaron diferencias significativas en parámetros como productividad, tasa de crecimiento máxima, tiempo de duplicación y concentración celular máxima. En MZ se observa un crecimiento más rápido (4.94 ± 0.11 div/d) con respecto al MJ, esto se explica porque, el MZ, aparte de la fuente de carbono y nitrógeno contiene solución nutritiva de microelementos como el manganeso, zinc, cobre y cobalto; los cuales, participan en los procesos enzimáticos como cofactores y en la producción de la biomasa (Ho et al., 2018). Goli et al. (2016) indican que la tasa de crecimiento máximo depende de parámetros específicos, como el pH, luz, temperatura y nutrientes, como la fuente de nitrógeno, carbono, fósforo o potasio, que si éstos varían en extremo se pudieran obtener valores de crecimiento celular

bajos; como la formulación limitada de nutrientes del MJ (Tabla 1). La influencia de la temperatura es un factor que promueve densidades celulares mayores al cultivarse en volúmenes pequeños en condiciones de invernadero y están asociadas a tasas de crecimiento más bajas, debido a la limitación de la luz en zonas densas (Vonshak and Richmond, 1981), por lo que sugiere que las temperaturas diurnas influyeron en este comportamiento, porque el registro promedio de temperatura fue de 30°C .

Fanka et al. (2022) reportan valores de productividad de 180 mg/Ld; una tasa máxima de crecimiento de 0.64d^{-1} y un tiempo de duplicación de 1.08 div/d para el cultivo de *Spirulina sp. LEB 18* en MZ en condiciones de invernadero en tanques tipo raceways durante 15 días de crecimiento, en el hemisferio sur en la época de primavera, siendo éstos mayores a los

Tabla 3. Parámetros cinéticos de crecimiento en el cultivo de *A. maxima* en medio Jourdan y Zarrouk, durante la época de primavera 2024.

Parámetros	Medio Jourdan	Medio Zarrouk
Productividad	67.24 ± 6.79 ^b	116.76 ± 8.11 ^a
Tasa de crecimiento máxima	0.09 ± 0.00 ^b	0.14 ± 0.00 ^a
Tiempo duplicación	7.71 ± 0.79 ^a	4.94 ± 0.11 ^b
Concentración celular máxima	1.36 ± 0.08 ^b	2.04 ± 0.13 ^a

Los datos se presentan como medias ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes son significativamente diferentes según la prueba de Tukey (p≥0.05).

reportados en esta investigación para el MZ (Tabla 3); éstos podrían explicarse porque una mayor concentración inicial del inóculo (0.3 g/L), como la utilizada en ésta investigación, podría formar agregados que dificultan la absorción de nutrientes y de dióxido de carbono (Moix et al. 2014). Por lo tanto, afectan el crecimiento relacionado con una tasa de crecimiento más lenta y un tiempo de duplicación mayor. Por otro lado, Magwell et al. (2023) reportan valores de productividad de 120 mg/Ld; una tasa máxima de crecimiento de 0.056 d⁻¹ y una concentración celular máxima 1.01 g/L para 25 días crecimiento de *S. platensis* en medio Jourdan modificado con cloruro de sodio, fosfato de amonio, urea. Estos valores fueron mayores, a los reportados en este estudio (Tabla 3) a excepción de la concentración celular, y esto es debido a que una fuente de nitrógeno como la urea es de fácil asimilación para la espirulina (Danesi et al., 2009); además podría haber influido la salinidad del medio de cultivo, por la adición de las sales como el cloruro de sodio y fosfato de amonio, bien se sabe que la salinidad es un parámetro que afecta directamente la fisiología y el metabolismo de la espirulina, ya que influye en la osmorregulación de la célula y en la absorción de nutrientes esenciales como el carbono y el nitrógeno (Richmond, 2004).

CONCLUSIONES

El crecimiento de la cianobacteria *Arthrospira maxima* con la formulación del medio Jourdan favorece el crecimiento y rendimiento de biomasa de *A. maxima* en un 57.6% en relación con el medio Zarrouk (100%) en la época de primavera en condiciones de invernadero en clima semitropical. Además, aun cuando los parámetros cinéticos de concentración celular y tasa de crecimiento máxima fueron 1.5 veces menores que el medio Zarrouk, el uso del medio Jourdan también es una opción rentable para el cultivo de espirulina (*Arthrospira maxima*) a gran escala o a nivel comercial, al reducir la cantidad de sales en el medio.

REFERENCIAS

- Ación, F.G., Fernández, J.M., Molina, E. (2019) Costs analysis of microalgae production. In: Biomass, Biofuels, Biochemicals, 2nd Edition. Lee DJ, Pandey A, Chang JS, Chisti Y, Soccol C (Eds). Elsevier, New York, NY. pp.551–566.
- Ahsan, M., Habib, B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). A review on culture, production, and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. FAO Fisheries and Aquaculture Circular (FAO), pag. 1034.
- AlFadhly, N. K., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., Cacciola, F., & Narayanankutty, A. (2022). Trends and technological advancements in the possible food applications of Spirulina and their health benefits: A Review. *Molecules*, 27(17), 5584.
- Andrade, B. B., Cardoso, L. G., de Jesús Assis, D., Costa, J. A. V., Druzian, J. I., & da Cunha Lima, S. T. (2019). Production and characterization of Spirulina sp. LEB 18 grown in Zarrouk medium reused in a raceway bioreactor. *Biological Resources, Technology*, 284, 340–348.
- Beyene, E. A. (2016). Evaluation of the Potential of Shala Hotspring Water for the Biomass production of *Arthrospira fusiform*. Ethiopia: addis ababa university.
- Borowitzka, M.A., & Vonshak, A. (2017) Scaling up microalgal cultures to commercial scale. *European Journal of Phycology*, 52,407–418.
- Çelekli, A., Yavuzatmaca, M., & Bozkurt, H. (2009). Modelización de la producción de biomasa por *Spirulina platensis* en función de las concentraciones de fosfato y los regímenes de pH. *Tecnología de recursos biológicos*, 100(14), 3625–3629.
- Chrimadha, T., Mardiaty, Y., Widoretno, M.R. (2009). Uji Coba Kultur Spirulina fusiformis Dalam Fotoreaktor Kolom Tersirkulasi di Tempat Terbuka. Pusat Penelitian Limnologi, LIPI-Cibinong. Bogor
- Claude, S., Oscar, W. F., Ngnikeu, N., Laure, P., Pierre, M., Rodrigue, F., ... & Leopold, L. (2023). International Journal of Sustainable Agricultural Research. *International Journal*, 10(2), 52–63.
- Colla, L. M., Reinehr, C. O., Reichert, C., & Costa, J. A. V. (2007). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource technology*, 98(7), 1489–1493.
- Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Rosa, G. M., Moraes, L., Morais, M. G., & Mitchell, B. G. (2019). Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery. *Bioresource technology*, 292, 121946.
- Da Rosa, G. M., Moraes, L., Cardias, B. B., & Costa, J. A. V. (2015). Chemical absorption and CO2 biofixation via

- the cultivation of *Spirulina* in semicontinuous mode with nutrient recycle. *Bioresource technology*, 192, 321-327.
- Da Silva Braga, V., da Silveira Mastrantonio, D. J., Costa, J. A. V., & de Moraes, M. G. (2018). Estrategia de cultivo para estimular el alto contenido de carbohidratos en la biomasa de *Spirulina*. *Tecnología de recursos biológicos*, 269, 221-226.
- Danesi, E. D. G., Rangel-Yaguí, C. O., Sato, S., & Carvalho, J. C. M. D. (2011). Growth and content of *Spirulina platensis* biomass chlorophyll cultivated at different values of light intensity and temperature using different nitrogen sources. *Brazilian journal of microbiology*, 42, 362-373.
- Delrue, F., Alaux, E., Moudjaoui, L., Gaignard, C., Fleury, G., Perilhau, A., ... y Sassi, J. F. (2017). Optimización del crecimiento de *Arthrospira platensis* (*Spirulina*): desde escala de laboratorio hasta escala piloto. *Fermentación*, 3(4), 59.
- Fanka, L. S., da Rosa, G. M., de Moraes, M. G., & Costa, J. A. V. (2022). Producción al aire libre de biomasa y biomoléculas por *Spirulina* (*Arthrospira*) y *Synechococcus* cultivadas con aporte reducido de nutrientes. *Investigación en Bioenergía*, 15(1), 121-130.
- Fernández-Corte B, Hernández-Cázares AS, Gómez-Merino FC, de Cangas R, Rodríguez-Palacio M, García-Gómez O, Ríos Corripio MA. (2022). Effect of NaCl concentration on the production of *Arthrospira maxima* cultivated in the humid tropics. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2735>
- García-Ishimine, R., Rodríguez-Vega, J., & Mejía-Pinedo, D. (2020). Efecto hepatoprotector, antioxidante y anticancerígeno de la espirulina. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 19(6).
- Göksan, T., Zekeriyaoglu, A., & Ak, İ. (2007). The growth of *Spirulina platensis* in different culture systems under greenhouse conditions. *Turkish Journal of Biology*, 31(1), 47-52.
- Goli, A. Shamiri, A. Talaiekhazani, N. Eshtiaghi, N. Aghamohammadi, and M. K. Aroua, (2016). An overview of biological processes and their potential for CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 183, 41-58.
- Grochowicz, J., Fabisiak, A., & Ekielski, A. (2021). Importance of physical and functional properties of foods targeted to seniors. *Journal of Future Foods*, 1(2), 146-155.
- Habib, M. A. B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). A review on the cultivation, production, and use of spirulina as food for humans and feed for domestic animals. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*. No. 1034. Rome, FAO. 2008. 33p.
- Haoujar, I.; Haoujar, M.; Altemimi, B.A.; Essafi, A.; Cacciola, F. (2022). Nutritional, sustainable source of aqua feed and food from microalgae: A mini review. *International Aquatic Research*, 14,157-167.
- Ho, S. H., Liao, J. F., Chen, C. Y., & Chang, J. S. (2018). Combination of light strategies with recycled medium to improve the economic viability of phycocyanin production with *Spirulina platensis*. *Biological Resources Technology*, 247, 669-675.
- Jensen, S. y Knutsen, G. (1993). Influence of light and temperature on photoinhibition of photosynthesis in *Spirulina platensis*. *Journal of Applied Phycology*, 5(5), 495-504.
- Jiménez, C., Cossío, B. R., & Niell, F. X. (2003). Relationship between physicochemical variables and productivity in open ponds for *Spirulina* production: a predictive model of algal performance. *Aquaculture*, 221(1-4), 331-345.
- Kumar, V., Bhatnagar, A. K., & Srivastava, J. N. (2011). Antibacterial activity of crude extracts of *Spirulina platensis* and its structural elucidation of bioactive compound. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(32), 7043-7048.
- Levasseur, M.; Thompson; Harrison, P.J. (1993). Physiological acclimation of marine phytoplankton to different nitrogen sources. *Revista de Ficología*, 29(5), 587-595.
- López-Saldarriaga, C. D. (2019). Influencia de la salinidad en la producción de biomasa y su incidencia sobre la composición bioquímica de *Arthrospira maxima* (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena. 31p.
- Lu, W., Alam, M. A., Luo, W., & Asmatulu, E. (2019). Integration of *Spirulina platensis* cultivation and aerobic composting exhaust for carbon mitigation and biomass production. *Biological Resources Technology*, 271, 59-65.
- Markou, G., Vandamme, D., & Muylaert, K. (2014). Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. *Water Research*, 65, 186-202.
- Magwell, P. F. R., Djoudjeu, K. T., Minyaka, E., Tavea, M. F., Fotsop, O. W., Tagnikeu, R. F., ... y Lehman, L. G. (2023). El bicarbonato de sodio (NaHCO₃) aumenta el crecimiento, la producción de proteínas y pigmentos fotosintéticos y altera la producción de carbohidratos de *Spirulina platensis*. *Microbiología Actual*, 80(2), 63.
- Mirhosseini, N., Davarnejad, R., Hallajisani, A., Cano-Europa, E., & Tavakoli, O. (2020). Efecto de diferentes LEDs en la cinética de crecimiento de *Spirulina maxima*. 2da. International Conference of Agricultural Engineering, Natural Resources and Environment.
- Moix, M. A., Álvarez, P., Mateucci, R., Bustos, V., & Della Rocca, P. (2014). Factores que influyen en el crecimiento de la biomasa algal. *Proyecciones*, 69.
- Moraes, L., Martins, G.M., Cardias, B.B., Oliveira, L.O., Costa, J.A.V. (2016) Microalgal biotechnology for greenhouse gas control: carbon dioxide fixation by *Spirulina* sp. at different difusers. *Ecological Engineering* 91:426-431.
- Morales, E., Rodríguez, M., García, D., Loreto, C., & Marco, E. (2002). Growth, production of pigments and exopolysaccharides of the cyanobacterium *Anabaena* sp. PCC 7120 as a function of pH and CO₂. *Interciencia*, 27(7), 373-378.
- Ogbonna, J. C., Yada, H., & Tanaka, H. (1995). Kinetic study on batch culture of photosynthetic cells with limited light. *Fermentation and Bioengineering Magazine*, 80(3), 259-264.
- Padilla, E. B. (2018). Microalgas: fuente de compuestos de interés comercial. Doctoral dissertation, Universidad de Huelva, España. 269 pp.
- Pereira, M. I., Chagas, B. M., Sassi, R., Medeiros, G. F., Aguiar, E. M., Borba, L. H., ... y Rangel, A. H. (2019). Mixotrophic cultivation of *Spirulina platensis* in dairy wastewater: Effects on biomass production, biochemical composition, and antioxidant capacity. *PLoS one*, 14(10), e0224294.
- Rajasekaran, C., Ajeesh, C. M., Balaji, S., Shalini, M., Ramamoorthy, S. I. V. A., Ranjan, D. A. S., ... & Kalaivani, T. (2016). Effect of modified Zarrouk's medium on growth of different *Spirulina* strains. *Walailak Journal of Science and Technology*, 13(1), 67-75.
- Richmond, A. (2004). Principles for achieving maximum

- productivity of microalgae in photobioreactors: an overview. In *Asian Pacific Phycology in the 21st Century: Prospects and Challenges: Proceeding of The Second Asian Pacific Phycological Forum*, held in Hong Kong, China. Springer, Países Bajos, pp. 33-37
- Singh, N. K., & Dhar, D. W. (2011). Microalgae as second-generation biofuel. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 605-629.
- Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2017). Spirulina–From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 157-171.
- Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2019). Estudio comparativo sobre el comportamiento de crecimiento de *Spirulina platensis* en medios de cultivo modificadores. *Informes de Energía*, 5, 327-336.
- Sudhakar, K., & Premalatha, M. (2012). Techno economic analysis of microalgal carbon sequestration and oil production. *International Journal of Chemtech Research*, 4(4), 0974–4290.
- Susanna, D., Dhanapal, R., Mahalingam, R., & Ramamurthy, V. (2019). Increasing productivity of *Spirulina platensis* in photobioreactors using artificial neural network modeling. *Biotechnology and Bioengineering*, 116(11), 2960-2970.
- Uebel, L. D. S., Costa, J. A., Olson, A. C., & Morais, M. G. D. (2019). Industrial plant for production of *Spirulina* sp. LEB 18. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36(1), 51-63
- Vasquez-Villalobos, V., Vergaray, D., Suarez, S., Valladares, J., Zamora, A., Gaspar, K., & Escurra, X. (2014). Influencia de la proporción agua de mar y bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina* sp. con iluminación de diodo emisor de luz. *Scientia agropecuaria*, 5(4), 199-209.
- Vonshak, A., & Richmond, A. (1981). Photosynthetic and respiratory activity in *Anacystis nidulans* adapted to osmotic stress. *Plant Physiology*, 68(2), 504-505.
- Zarrouk C, 1966. Contribution a l'étude d'une cyanobacterie: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima* (Setchell et Gardner) Geitler. Ph.D. thesis, University of Paris, France.

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 15/10/2024

FERMENTACIÓN DE GRANOS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*) Y SU EFECTO EN LA CALIDAD EN TAZA EN LATINOAMÉRICA

FERMENTATION OF COFFEE BEANS (*COFFEA ARABICA L.*) AND ITS EFFECT ON CUP QUALITY IN LATINAMERICA

M. Dreidi Bocarando Guzmán⁽¹⁾
 Roselia Servín Juárez⁽¹⁾
 M. Antonieta Ríos Corripio⁽²⁾
 J. Valente Hidalgo Contreras⁽¹⁾
 Esteban Escamilla Prado⁽³⁾
 Aleida Selene Hernández Cázares^{*(1)}

RESUMEN

El café de especialidad representa una oportunidad para que los productores participen en mercados diferenciados, donde estos pueden obtener mayores ganancias. Los investigadores consideran que la fermentación permite que hongos filamentosos, levaduras y bacterias generen metabolitos de interés relacionados con una mayor calidad en taza. El objetivo de este estudio fue analizar las condiciones del proceso de fermentación de café que se han evaluado en Latinoamérica y su efecto sobre la composición química de los granos y la calidad en taza. La búsqueda de información se realizó en la base de datos Web of Science con el conjunto estructurado de palabras claves como "Fermented of coffee beans". Brasil es el principal país latinoamericano donde se ha investigado el

proceso de fermentación en café. Se han desarrollado varios estudios para evaluar y proponer condiciones de fermentación que resulten en mejores perfiles sensoriales en el café, principalmente fermentaciones espontáneas en procesos húmedos. Sin embargo, aún no es posible definir un proceso único capaz de aumentar la calidad del café o desarrollar un patrón sensorial específico en cualquier condición ambiental. Las investigaciones tienden a estudiar el efecto de la altura de las plantaciones, los métodos de procesamiento de café y la microbiota sobre la calidad del café. Estas hacen énfasis en la necesidad de realizar la etapa de fermentación de forma controlada con el uso de cultivos iniciadores para el desarrollo del sabor y compuestos volátiles, así como uniformidad del producto, lo que permita calidad, previsibilidad y reproducibilidad del proceso.

Palabras Clave: café, calidad, fermentación, Latinoamérica.

ABSTRACT

Specialty coffee represents an opportunity for producers to participate in differentiated markets, where they can obtain higher profits. Researchers believe that fermentation allows filamentous fungi, yeasts, and bacteria to generate metabolites of interest related to improved cup quality. The objective of this study was to analyze the fermentation process conditions of coffee that have been evaluated in Latin America and their effect on the chemical composition of the beans and cup

⁽¹⁾Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Carrera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León. C.P. 94946. Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. bocarando.dreide@colpos.mx, roseliasj@colpos.mx, jvhidalgo@colpos.mx, *aleyse@colpos.mx, ⁽²⁾CONAHCYT- Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Carrera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León, C.P. 94946. Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. rios.antonietta@colpos.mx. ⁽³⁾Centro Regional Universitario Oriente, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Huatusco-Xalapa Km 6, C.P. 94100, Huatusco, Veracruz, México. espreschoca@yahoo.com.mx.

quality. The information search was conducted in the Web of Science database using a structured set of keywords such as "Fermented of coffee beans". Brazil is the main Latin American country where the coffee fermentation process has been researched. Several studies have been conducted to evaluate and propose fermentation conditions that result in better sensory profiles in coffee, primarily spontaneous fermentations in wet processing methods. However, it is still not possible to define a single process capable of enhancing coffee quality or developing a specific sensory pattern under any environmental condition. Research tends to focus on the effect of plantation altitude, coffee processing methods, and microbiota on coffee quality. These studies emphasize the need for the fermentation stage to be conducted in a controlled manner, using starter cultures for the development of flavor and volatile compounds, as well as product uniformity, ensuring quality, predictability, and reproducibility of the process.

Keywords: Coffee, quality, fermentation, Latinamerica.

INTRODUCCIÓN

El café es la segunda bebida más consumida a nivel mundial y pertenece a los principales productos comercializados (Pancsira, 2022). Esto se debe principalmente a sus cualidades químicas, sensoriales y efectos fisiológicos (Aguilar-Alvarez et al., 2021). El género *Coffea* cuenta con más de 100 especies, las especies *Coffea arabica* L. (Arábica) y *Coffea canephora* L. (Robusta) tienen mayor importancia comercial, esta última considerada de mayor calidad por sus atributos sensoriales (Guerrero-Peña et al., 2023).

La liberación del mercado internacional del café a finales de 1980 provocó mayor producción y disminución de la calidad del fruto, generando mayor volatilidad de los precios (Ponte, 2002). Por tanto, los productores están buscando alternativas de comercialización donde se valore la calidad y se obtengan mejores precios (Pancsira y Lengyel, 2020). La calidad en taza del café se determina mediante la evaluación de atributos sensoriales como fragancia/aroma, uniformidad, dulzura, sabor, acidez, cuerpo, postgusto o sabor residual, equilibrio, taza limpia y calificación de cata (Lingle y Menon, 2017), esta depende de las características

físicas y bioquímicas del grano. Los catadores Q graders realizan este análisis siguiendo protocolos establecidos, principalmente el de la Specialty Coffee Association (SCA). El café se clasifica en base en la puntuación obtenida, de especialidad mayor a 80 puntos o de calidad comercial puntuación menor a 80 (CBI, 2022).

El café de especialidad nació como un nicho de mercado, donde el precio está determinado por la calidad en taza del café. Starbucks® es el pionero de este concepto en Estados Unidos (Fujigaki, 2020). En México, las cafeterías de especialidad surgieron en la década de 1990, tales como Coffee Factory®, Café Etrusca®, Coffee House® y Gloria Jean's Coffees® (Servín-Juárez et al., 2021).

La calidad en taza están definidas por la genética, condiciones ambientales, geográficas, labores culturales, prácticas de cosecha y manejo postcosecha (Tassew et al., 2021; Getachew et al., 2023). Los factores de precosecha determinan aproximadamente el 40% de los atributos sensoriales y las propiedades físicas y químicas de los granos de café y el 60% de la calidad del café lo establece el procesamiento postcosecha (Musebe et al., 2007). Sualeh et al. (2020) determinaron correlaciones de la composición bioquímica y la calidad en taza del café arábica. Dentro de las correlaciones identificadas se observan el contenido de ácidos clorogénicos con el cuerpo, sabor, acidez y la calidad general en taza, la cafeína con la astringencia y el amargor del café verde, la trigonelina con el sabor, cuerpo y la calidad general de la taza. También, el contenido de ácidos clorogénicos del café tostado se correlacionó con el cuerpo, sabor, acidez y la calidad general en taza (Sualeh et al., 2020).

Los métodos de procesamiento emergentes de café surgen de los procesos comunes; húmedos, secos y semisecos, donde un punto de interés es el proceso de fermentación. El control de este proceso permite cafés con mejores perfiles sensoriales; bajos niveles de alcaloides y altas cantidades de polifenoles (Ferreira et al., 2023). La fermentación se ve influenciada por diversos factores y permite obtener diferentes perfiles en taza; por tanto, es importante conocer cómo se llevan a cabo el proceso de fermentación y qué se ha investigado al respecto. Ante el panorama anterior, el objetivo de este estudio es presentar las condiciones del proceso de fermentación de los granos de café que se ha evaluado en Latinoamérica y su efecto sobre la calidad en taza.

MÉTODOS

El estudio consistió en la consulta de publicaciones en la base de datos Web of Science, sin restricción de fecha. El conjunto estructurado de palabras clave fue: Fermented of coffee beans. La base de datos arrojó 124 publicaciones. Después de esta búsqueda primaria, se analizaron los artículos sobre procesos de fermentación de granos de café en Latinoamérica y arrojaron 34 publicaciones. Posteriormente, se descartó artículos que mencionaran fermentación en granos de café robusta, y dónde no se mencionaran condiciones de fermentación; el análisis final fue de 19 publicaciones. La información se agrupó en fermentación de granos de café y condiciones de fermentación de granos de café en Latinoamérica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fermentación de granos de café

En el método seco, sin lavar o proceso natural, las cerezas se secan de manera natural o artificial hasta alcanzar 10-12 % de humedad (Pereira et al., 2019). Durante el procesamiento seco se han identificado principalmente bacterias del ácido acético y levaduras *Pichia*, *Candida*, *Starmerella* y *Saccharomycopsis* (De Bruyn et al., 2017). Los frutos con menos del 9 % de humedad son quebrados durante el trillado; sin embargo, los frutos con más del 13% están expuestos a deterioros por el crecimiento de hongos y bacterias (Taveira, 2015). Este método tiene un alto riesgo de fermentación secundaria debido al mucílago, ya que los granos son muy higroscópicos al permanecer con la cereza de café (Coste, 2003). Los granos de café que se obtienen con el método de procesamiento natural tienen un mayor cuerpo, son suaves, dulces y presentan sabores complejos.

El método de proceso húmedo o lavado incluye la eliminación mecánica de la piel y mucílago mediante el despulpado, degradación microbiana del mucílago (fermentación), lavado y secado. Druyn et al. (2017) identificaron principalmente bacterias ácido lácticas (*Leuconostoc*, *Lactococcus* y *Lactobacillus*) en la fermentación del método húmedo. Así mismo, encontraron que los granos verdes tenían más ácido cítrico y eritritol y menores concentraciones de fructosa, glucosa, ácido cafeico, cafeína, trigonelina y ácido clorogénico respecto al método seco. El método húmedo permite obtener granos de calidad uniforme con un mínimo de

defectos (Gonzales-Ríos et al., 2007). El método semiseco tiende a condiciones más controladas de fermentación con conservación de mucílago (Pereira et al., 2017), y los cafés son similares a los obtenidos por el método húmedo. El proceso lavado se caracteriza por generar tazas brillantes y limpias, y tener menos cuerpo respecto a los cafés naturales (Haile y Kang, 2019).

El proceso de fermentación ocurrido en los métodos de beneficiado se ha relacionado con la calidad en taza. Este puede ocurrir simultáneamente con el secado (método vía seca) o puede ser inducida antes del secado (método vía húmeda). El tipo de tratamiento de las cerezas (natural o despulpada), tipo de ambiente (aeróbico o anaeróbico), adición de agua (estado sólido o sumergido) y utilización del cultivo iniciador determinan la fermentación, lo cual se ve reflejado en los perfiles sensoriales (Pereira et al., 2022). Las cerezas del café tienen microorganismos epífitos y proporcionan sustratos para el desarrollo de bacterias, levaduras y hongos filamentosos, aportándoles fuentes de carbono y nitrógeno, ya que cuentan con celulosa, hemicelulosa, pectina, azúcares reductores, sacarosa, almidón, aceites, proteínas, ácidos y cafeína (Pereira et al., 2021). Estos microorganismos producen enzimas como poligalacturonasas y pectiniliasas necesarias para despolimerizar e hidrolizar la pectina rica en polisacáridos presente en el mucílago (Esquivel y Jiménez, 2012). La eliminación del mucílago facilita el secado del grano y produce metabolitos que se difunden al interior de los granos de café y reaccionan con sustancias responsables del sabor y aroma de la bebida final (Lee et al., 2015).

La microbiota presente en las fermentaciones varía según las características geográficas, composición del fruto de café y el método de procesamiento (De Bruyn et al., 2017), generalmente los microorganismos epífitos son mesófilos (Bastian et al., 2021). El crecimiento de microorganismos y la producción de metabolitos dependen del metabolismo celular, aeróbico o anaeróbico (Pereira et al., 2021). La respiración aeróbica produce más ATP (adenosín trifosfato), CO₂ y agua, promoviendo un mayor crecimiento. Por otro lado, el metabolismo anaeróbico produce menos ATP y más subproductos de ácidos orgánicos y compuestos volátiles que son relevantes para cambios en los perfiles sensoriales. Existen microorganismos facultativos como *Sacharomyces cerevisiae*, que produce principalmente etanol bajo condiciones anaeróbicas, mientras que en condiciones

semianaeróbicas y aeróbicas genera compuestos como ácido succínico, ácido láctico, gluconato, 1,2-propanodiol, isobutanol, y 2,3-butanodiol (Gambacorta et al., 2020). Por tanto, esto genera que los perfiles sensoriales del café cambien.

Cardoso et al. (2021) y Bastian et al. (2021) mencionan que la actividad metabólica de los granos de café y de la microbiota causa disminución del pH (6.0-5.5 a 4.0-3.5) y de la actividad del agua (0.9 a 0.7-0.8). Estos son indicadores de finalización del proceso de fermentación. La fermentación del café en finca y el beneficio húmedo generalmente se realiza por 12 y 36 h (Das, 2021). Sin embargo, estudios recientes han demostrado los beneficios y mejoras que ofrecen a nivel sensorial las fermentaciones prolongadas del café (72 h y 96 h), donde las producciones de metabolitos esenciales y compuestos precursores de sabor y aroma son mayores debido a la variación significativa de los microorganismos (Da silva et al., 2023; Sánchez-Riaño et al., 2024).

Condiciones de fermentación de granos de café en Latinoamérica

En el análisis de la información se identificó que el método de procesamiento húmedo es ampliamente adoptado por varios países Latinoamericanos, tal como lo mencionan Dias et al. (2012). Algunos factores que favorecen el uso de este método son: las características genéticas de las plantas de café, las condiciones climáticas de cultivo, el área de producción e infraestructura de las fincas (Pereira et al., 2021). Generalmente, el método húmedo se relaciona con procesos de fermentación. En Latinoamérica se ha observado que la fermentación del café se realiza de forma espontánea y no controlada, produciendo granos de café con una calidad inconsistente e impredecible. Por tanto, durante la última década se está investigando sobre las condiciones de estos procesos y su efecto en la calidad (Peñuela-Martínez et al., 2023; Meira et al., 2024), tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Investigaciones relacionadas con la fermentación de granos de café y su efecto en la calidad en taza en Latinoamérica.

Condiciones del proceso de fermentación	Efecto en la calidad en taza
<p>Minas Gerais, Brasil, 750–800 m s.n.m. Los granos fueron fermentados y secados por el método natural; permanecieron en una plataforma de concreto durante 25 días hasta alcanzar 11–12% de humedad. El objetivo fue investigar la fermentación microbiana natural de las cerezas de café, aislar y caracterizar los microorganismos involucrados y evaluar las características bioquímicas del café durante la fermentación, secado y almacenamiento (Silva et al., 2008).</p>	<p>Al inicio de la fermentación predominan las bacterias de la familia Enterobacteriaceae y las especies del género Bacillus, después de 10 días disminuyen a <10% del total. <i>Debaryomyces hansenii</i> representó el 42.6% del total de aislamientos de levaduras. Los hongos que más prevalecieron fueron Aspergillus, Penicillium, Fusarium y Cladosporium (42.6% del total).</p>
<p>Minas Gerais, Brasil. Los granos fueron despulpados y fermentados durante 48 h de acuerdo con el método local. El objetivo fue la identificación y selección de nueve cepas de levaduras autóctonas de café y su uso potencial como cultivos iniciadores para mejorar el sabor de la bebida de café (De Melo Pereira et al., 2014).</p>	<p><i>Pichia fermentans</i> YC5.2 produjo altas concentraciones de compuestos éster, y <i>Saccharomyces</i> sp. YC9.15 de pectinasas. Estas tienen potencial como cultivos iniciadores en el procesamiento húmedo del café. Los granos inoculados con <i>P. fermentans</i> tuvieron mayor puntaje, y presentaron aroma afrutado, mantecoso y fermentado debido a compuestos como 2,3-butanodiona (sabor a mantequilla), acetaldehído (sabor a fruta), hexanal (sabor a judías verdes), etanol (sabor alcohólico) y ésteres como acetato de etilo y acetato de isoamillo (sabor a fruta).</p>
<p>Minas Gerais, Brasil, 1,270 m s.n.m. Los granos de café fueron inoculados con <i>P. fermentans</i> YC5.2 y sacarosa al 2 % (p/v). Estos se sometieron a fermentaciones espontáneas de granos de café despulpados en tanques de concreto. El objetivo fue la implementación de <i>P. fermentans</i> YC5.2 durante el procesamiento húmedo (De Melo Pereira et al., 2015).</p>	<p>La inoculación aumentó la producción de compuestos aromáticos (etanol, acetaldehído, acetato de etilo y acetato de isoamillo) y disminuyó el ácido láctico durante la fermentación. La sacarosa no interfirió con el crecimiento de <i>P. fermentans</i> YC5.2, pero mantuvo altos niveles de bacterias silvestres, y una producción de ácido láctico similar al proceso espontáneo. Esta cepa proporcionó 85 puntos en taza y generó notas a vainilla y aromas florales.</p>

Cerrado Mineiro, Brasil. El café se obtuvo mediante vía húmeda con un proceso de fermentación espontánea de 48 h en tanques de concreto. El objetivo fue evaluar la diversidad de levaduras y las características fisicoquímicas de los granos (De Carvalho Neto et al., 2017).

La población de levaduras estuvo representada por *Saccharomyces sp.*, *Torulospora delbrueckii*, *Pichiakluhyveri*, *Hanseniaspora uvarum*, *Hanseniaspora vineae* y *Meyerozyma caribbica*. Se identificaron 25 compuestos orgánicos volátiles con predominio de hidrocarburos (9 compuestos) y alcoholes superiores (6 compuestos). Los principales minerales presentes en el café verde y tostado fueron potasio, fósforo y calcio.

Minas Gerais, Brasil. Los cafés se obtuvieron mediante fermentación espontánea adicionando agua. Se empleó un enfoque de secuenciación de alto rendimiento para estudiar la diversidad y dinámica de las bacterias asociadas con la fermentación del café. El muestreo se realizó a las 0, 12 y 24 h de fermentación. El objetivo fue caracterizar las comunidades bacterianas asociadas con la fermentación del grano de café (De Carvalho Neto, 2018).

Se identificó más de 80 géneros bacterianos, algunos detectados por primera vez, tales como: Fructobacillus, Pseudonocardia, Pedobacter, Sphingomonas e Hymenobacter. Los géneros abundantes fueron: Proteobacteria (Erwinia, Pseudomonas y Methylobacterium) y Firmicutes (Bacillus, Fructobacillus, Leuconostoc y Lactococcus). El análisis temporal mostró un fuerte predominio de las bacterias del ácido láctico, principalmente Leuconostoc y Lactococcus.

Brasil. Evaluación de granos sometidos a un proceso natural, inoculados con levaduras. El método consistió en una aspersión directamente en una terraza suspendida y en balde. El objetivo fue evaluar el comportamiento de levaduras (*S. cerevisiae* CCMA 0543, *Candida parapsilosis* CCMA 0544 y *Torulospora delbrueckii* CCMA 0684) como cultivos iniciadores para el café procesado en seco (Bressani et al., 2018).

El café inoculado con levadura *S. cerevisiae* CCMA 0543 en el balde obtuvo mayor puntaje en taza, 84.00. Éste presentó 23.84 g/kg de ácidos totales y sabor a plátano, anacardo y cítricos.

São Paulo, Brasil, 1,400 m s.n.m. Se inocularon frutos de café maduros e inmaduros con *P. fermentans* y *P. acidilactici*. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de los inóculos sobre los metabolitos producidos durante la fermentación y la composición volátil de los granos de café (Da Silva Vale et al., 2019).

La inoculación combinada con *P. fermentans* (levadura) y *P. acidilactici* (bacteria) de granos de café maduros aumentó el consumo de azúcar de la pulpa y la producción de ácido láctico, etanol y acetato de etilo. Así mismo, esta mejoró la complejidad del aroma de los granos de café por la presencia de bencenoacetaldehído, 2-heptanol y alcohol. En cafés inmaduros la inoculación con *P. fermentans* mejoró la formación de metabolitos durante la fermentación. Se identificaron 30 compuestos volátiles: alcoholes superiores (7 compuestos), aldehídos (6 compuestos) y terpenos (3 compuestos). Entre estos, bencílico 1-hexanol, 2-heptanol, alcohol fenilético y bencenoacetaldehído; compuestos aromáticos deseados relacionados con mayor calidad en taza.

Ecuador, 1,329 m s.n.m. Los granos se despulparon y fermentaron de manera espontánea en tanques de concreto, la fermentación fue con agua. Estos se dejaron fermentar a 0,4,8,12,16,24,36,48 y 64 h. Después, los granos se lavaron y dejaron remojar durante 24 h, por último, se secaron al sol. El objetivo fue descifrar la cadena completa de procesamiento húmedo del café arábico bajo diferentes prácticas operativas, comenzando desde la cosecha, se evaluó la microbiota del café, composición del grano y calidad en taza del grano (Zhang et al., 2019).

La microbiota epífita de los granos de café fueron bacterias ácido lácticas. La fermentación estándar (16 h de fermentación) estuvo caracterizada por enterobacterias, Leuconostoc, Lactococcus y bacterias del ácido acético; la fermentación prolongada por Leuconostoc y Lactobacillus. Al inicio de la fermentación, los microorganismos consumen sacarosa, ácido cítrico y ácido málico. Después de 12 h de fermentación, predominó la glucosa, fructosa, ácido láctico, ácido acético y manitol hasta el final de la fermentación prolongada. Se consumieron aminoácidos como arginina, glutamina, valina, isoleucina y leucina hacia el final de la fermentación prolongada. Los ésteres frutales (3-metilbutanoato de etilo) ocuparon la mayor parte de los compuestos volátiles hacia el final de la fermentación prolongada. El linalool, terpineol, citral y D-limoneno proporcionan notas cítricas y florales. Los ácidos clorogénicos y trigonelina del proceso de fermentación estándar podrían contribuir al mayor amargor y astringencia de la taza. Concentraciones altas de ácido láctico generaron mayor acidez.

Brasil. Los métodos de procesamiento del grano de café fueron natural y húmedo. La fermentación se realizó durante 72 h. Se evaluó la influencia de diferentes altitudes (800, 1,000, 1,200 y 1,400 m s.n.m.) sobre la microbiota epífita de granos de café durante la fermentación y la calidad sensorial y química del café (Martínez et al., 2020).

Durante la fermentación de cafés despulados hubo un aumento del ácido láctico a partir de 1200 m. En café natural presentó un aumento de ácido láctico en todas las altitudes. La mayor diversidad de bacterias mesófilas y levaduras se identificó a los 1400 y 1000 m en el método natural, y a 1,200 y 800 m para café despulado. El atributo floral se detectó a 1400 m. Los atributos de caramelo, chocolate y almendra se detectaron en diferentes altitudes y procesamientos. Por lo tanto, el procesamiento del café despulado fue más adecuado a baja altitud, a mayor altitud ambos procesos pueden llevarse a cabo.

Minas Gerais, Brasil, 1,270 m s.n.m. Los granos de café fueron fermentados con agua en un biorreactor de tanque agitado que permitió el crecimiento del cultivo iniciador de levadura *P. fermentans* YC5.2. EL objetivo fue investigar el efecto sobre los parámetros cinéticos fermentativos y la calidad química y sensorial de la bebida de café (De Carvalho Neto et al., 2020).

Los géneros de bacterias ácido lácticas con alta frecuencia fueron: *Fructobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* y *Lactobacillus*, con un fuerte predominio de la familia *Leuconostocaceae*. A las 2 y 12 h de fermentación el pH incrementó con la disminución del contenido de ácido cítrico (0.65 a 0.147 g/L). Los granos de café tenían altas concentraciones de compuestos volátiles (D-limoneno, fenilacetaldehído, alcohol fenilético, acetato de fenilético, salicilato de etilo, ácido butanoico, 2-etilo y furfural, 5-metilo) y mayor calidad en taza, puntajes mayores a 90. El biorreactor de tanque agitado optimizó la fermentación del café con cultivos iniciadores.

Gramado, Brasil, 1,100–1,250 m s.n.m. El procesamiento de café natural consistió en fermentar frutos maduros de café en biorreactores estáticos de acero inoxidable. El procesamiento natural despulado consistió en remover mecánicamente la cáscara, pulpa y parte del mucílago de la fruta antes de fermentar en biorreactores. La fermentación se llevó a cabo por 27 h y el café se trasladó a terrazas suspendidas para su secado hasta alcanzar 11.5% de humedad. Se evaluó la persistencia del inóculo (*Meyerozyma caribbica* - CCMA 0198, *S. cerevisiae* - CCMA 0543, *Candida parapsilosis* - CCMA0544 o *Torulaspota delbrueckii* - CCMA 0684), la temperatura, los cambios en los metabolitos microbianos y la calidad en taza del café (Bressani et al., 2021).

Los tratamientos inoculados con *S. cerevisiae* (CCMA 0543) tuvieron el puntaje más alto en los dos métodos, 84.75 y 84.92, respectivamente. Estos presentaron acidez, dulzor medio a alto y cuerpo denso a medio. El ácido málico predominó en el café natural y el ácido cítrico en el café natural despulado. También se notaron frutos cítricos, azúcares caramelizados y acabado extendido a medio. Los ácidos cítrico, málico y succínico estuvieron presentes de forma natural en el café. En los tratamientos se detectaron ácidos lácticos, isobutírico e isoaléxico al final de la fermentación.

Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, 1583–1759 m s.n.m. Los granos fueron cosechados, despulados y colocados en un tanque de concreto, se les adicionó agua hasta cubrir y se tomaron muestras a las 0,6,12,18,24,30 y 36 h. El estudio tuvo como objetivo la caracterización de la diversidad microbiana en el proceso de fermentación del café y su influencia en la calidad de taza (Cruz-O'Byrne et al., 2021).

La mayor diversidad microbiana ocurre en las primeras 6 h de la fermentación. La comunidad microbiana estuvo dominada por *Leuconostoc* (bacterias ácido lácticas), *Acetobacter* (bacterias del ácido acético), *Lactobacillus*, *Kazachstania* (levaduras) y dos hongos no identificados. El café de 36 h de fermentación fue de especialidad, mayor a 85 puntos; caracterizado por un sabor dulce (panela, miel, caramelo y nata), acidez media-alta, notas de chocolate, frutales (melocotón, naranja, frutos secos, frutas de hueso y maracuyá) y florales (rosas y limoncillo).

Brasil. Los frutos de café fueron despulados bajo fermentación anaeróbica autoinducida. El objetivo fue evaluar el efecto de la altitud en la comunidad microbiana asociada con sus perfiles bioquímicos de ácidos, volátiles y antioxidantes (Martínez et al., 2021).

Los géneros bacterianos más abundantes fueron *Gluconobacter* (800 m), *Weissella* (1,000 m) y *Leclercia* (1,200 y 1,400 m). Las levaduras dominaron las fermentaciones naturales despuladas; *Cystofilobasidium infirmominatum*, *Wickerhamomyces anomalus* y *Meyerozyma caribbica*. Los cítricos, alcoholes y cafeína fueron los compuestos más dominantes en sistemas de fermentación autoinducida. Los cafés de mayor altura favorecen los grupos de fenólicos totales, aldehídos y ésteres, mientras que los cafés de baja altitud favorecen los alcoholes volátiles.

Brasil. La fermentación de café natural y despulpado se realizó con método convencional (despulpado, fermentado, lavado y secado) y bajo fermentación anaeróbica autoinducido. Los tiempos del fermentado fueron de 0, 27 y 87 h. El objetivo fue evaluar el impacto del método de fermentación anaeróbica autoinducida en la calidad química y sensorial del café natural y despulpado (Batista et al., 2022).

La fermentación anaeróbica autoinducida contribuyó a la cantidad máxima de ácido cítrico (2.534 mg/g) en café despulpado, y ácido acético (6.04 mg/g) y ácido láctico (2.533 mg/g) en cafés naturales. El furano fue la principal clase química detectada, seguida de cetonas y pirazinas. El café natural y despulpado sometido a la fermentación anaeróbica presentaron la mejor calidad en taza, 82.33 y 84.83 puntos, respectivamente.

Brasil, 800, 1,000, 1,200, 1,400 m s.n.m. Las cerezas fueron procesadas por fermentación anaeróbica inducida sin la adición de agua, vía natural y húmeda (despulpados). Se evaluó el efecto de la altitud y las comunidades microbianas en el perfil de compuestos bioquímicos (ácidos, volátiles y antioxidantes) y la calidad en taza (Martínez et al., 2022 a).

Las bacterias ácido lácticas dominaron las fermentaciones en todas las altitudes. Los cafés de altura favorecieron el contenido de ácido cítrico, málico, succínico y acético, así como los grupos de alcoholes, aldehídos y ésteres. Los cafés de baja altitud prefieren los fenoles. La naturaleza microbiota se mantuvo con el método. La capacidad antioxidante en café tostado aumentó con la altitud en cafés despulpados (2,685.71, 2,724.03 y 3,847.14 μM trolox/g); mientras tanto, se observó lo contrario en cafés naturales. La altitud de 1,200 m es adecuada para las modulaciones de compuestos mediante el método de fermentación anaeróbica inducida. Los géneros *Leuconostoc* y *Pichia* mostraron potencial como cultivos iniciadores de café, ya que se correlacionaron con los principales precursores volátiles de sabores: ácido láctico y acético. El puntaje más alto fue obtenido por el café natural cosechado a 1,400 m s.n.m.; 88.13 puntos. Este tuvo descriptores de frambuesa, cacao, ron, lichi, pera, rosas y lúpulo.

Caparaó, Brasil, 800, 1,000, 1,200 y 1,400 m s.n.m. Luego de despulpar los frutos, los granos se fermentaron en biorreactores de polipropileno de 20 L con tapa, sin agua bajo un sistema de fermentación anaeróbica inducido. La fermentación se realizó por 72 h. Se evaluó el efecto de la altitud (800, 1,000, 1,200 y 1,400 m s.n.m.) y las comunidades microbianas en el perfil de compuestos bioquímicos (ácidos, volátiles y antioxidantes) (Martínez et al., 2022b).

El café de 800 m presentó la mayor riqueza bacteriana (7 géneros), cafés de 1,000 m presentaron la mayor riqueza fúngica (126 especies). Los cafés cosechados a mayor altura presentaron mayores concentraciones de ácido cítrico, málico, acético, láctico, succínico y clorogénico, así como cafeína. Los cafés de menor altitud tuvieron concentraciones altas de trigonelina (3.66 g/kg). Las altitudes de 800, 1,000 y 1,400 m mostraron perfiles de actividad fenólica y antioxidante similares, excepto el perfil de 1200 m, donde se presentó el contenido fenólico total más alto (197.00 mg/g). La concentración de alcoholes y aldehídos fue mayor en todas las alturas. El ácido láctico se correlacionó positivamente con los géneros *Leuconostoc*, *Weissella* y *Ochrobactrum*; el ácido cítrico, málico y succínico con los géneros *Curtobacterium* y *Pluralibacter* a 1,400 m; el grupo de alcohol, piranos y ácido acético con *Leclercia* a los 1,200 m. Además, el ácido tartárico se agrupó con los géneros *Yersinia* y *Rosenbergiella* a 1,200 m.

Minas Gerais, Brasil, 850 m s.n.m. Los granos se procesaron con fermentación anaeróbica autoinducida con cultivos iniciadores para café natural y despulpado. El objetivo fue evaluar los efectos de los cambios fisiológicos en la viabilidad de las semillas y la calidad sensorial de la bebida (Martínez-Jiménez et al., 2023).

El proceso de fermentación del café con inoculación de levadura afectó la viabilidad embrionaria y dañó la membrana celular del grano de café, pero no cambió la calidad sensorial de la bebida, lo que indica que el uso de iniciadores de levadura por fermentación anaeróbica inducida favorece la producción de cafés especiales. Los cafés fermentados presentaron ácido cítrico, málico y succínico, y tuvieron puntajes superiores a 80. *Torulospira delbrueckii* obtuvo la mayor puntuación, 86.50 puntos, en el café despulpado, y la *Candida parapsilosis* generó 85.90 puntos para el café natural. Los cafés se caracterizaron por aromas y sabores a cítricos, caramelo, miel, chocolate y castaña.

Quindío, Colombia, 1,179-1,832 m s.n.m. Los granos se beneficiaron mediante fermentación espontánea (24 h), fermentación espontánea prolongada (72 h), fermentación espontánea donde se mezcla diferentes lotes cosechados (72 h), fermentación espontánea submarino donde se incorpora agua para cubrir los granos (24 h) y fermentación anaeróbica inducida (72-92 h) adicionando lixiviado al proceso. El objetivo fue describir la microbiota existente y su relación con los procesos de fermentación y su efecto en la calidad (Peñuela-Martínez et al., 2023).

La familia Enterobacteriaceae dominó al inicio de la fermentación, los géneros *Leuconostoc*, *Lactobacillus*, *Gluconobacter* y *Acetobacter* dominaron al final. Se identificaron 167 familias de hongos, *Saccharomyceaceae* dominó desde el principio. Los alcoholes y ésteres fueron los principales compuestos del café verde. El 66.7% de las muestras presentaron de 80 a 81 puntos. Muestras con menor puntaje fueron relacionadas con *Gluconobacter*, *Acetobacter*, *Candida*, *Hanseniaspora* y *Meyerozyma*. Los defectos sensoriales presentes son los sabores terrosos, fenólicos y fermentados. La mayor calidad en taza se obtuvo a 72 h de fermentación anaeróbica inducida con presencia de *Lactobacillus*. Compuestos volátiles como 2,3-butanodiol, acetato de etilo y salicilato de metilo son importantes para el perfil aromático.

Minas Gerais, Brasil. Los cafés se beneficiaron por la vía seca. Los tiempos de fermentación fueron 48 y 96 h. Los cafés fueron inoculados con *Lactiplantibacillus plantarum* y 24 h después con *S. cerevisiae*. El objetivo fue evaluar el tiempo total de fermentación de frutos de café mediante doble inoculación y su efecto sobre la calidad en taza y composición química (perfil de ácidos orgánicos, compuestos bioactivos y perfil de ácidos grasos) de los granos de café verde (Meira et al., 2024).

El mayor puntaje en taza, 87.57, correspondía a granos con inoculación secuencial y fermentación de 48 h, así como cafés inoculada solo con *S. cerevisiae* y fermentada durante 96 h, la cual presentaba mayor acidez, dulzura y cuerpo. El puntaje mostró una relación inversa con el contenido de ácidos láctico, oxálico y acético. El contenido de ácidos grasos y de compuestos bioactivos no mostró cambios respecto al tiempo, excepto los ácidos grasos insaturados (ácido oleico, linoleico, linoléico y gordo).

Fuente: Elaboración propia.

Brasil es el principal país latinoamericano que investiga el efecto de las condiciones de fermentación sobre la calidad en taza, enfocadas a variedades de alta calidad en taza como la Catuaí amarillo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo, Bourbon y Typica. En los últimos años, la investigación sobre la fermentación en café se ha basado en el mapeo de microbiota epífita o cultivos iniciadores en los métodos de fermentación conocidos y evaluar su efecto en la composición bioquímica y sensorial de los granos de café (De Carvalho Neto, 2018; Bressani et al., 2021).

Cada tipo de procesamiento postcosecha proporciona diferentes condiciones para la fermentación, lo que resulta en diferentes características químicas y sensoriales de los granos (Peñuela-Martínez et al., 2023). Incluso, un café puede tener el mismo puntaje en taza y diferentes perfiles sensoriales. Sin embargo, no es posible definir un solo proceso capaz de incrementar la calidad del café o desarrollar un producto con un patrón sensorial específico en cualquier condición ambiental, por eso, este proceso suele ser complejo, tal como lo mencionan Ferreira et al. (2023). Se observa que los cafés de excelente calidad pueden obtenerse mediante fermentación espontánea, a pesar de la ausencia de control. Sin embargo, la reproducibilidad de los resultados es

difícil, ya que la microbiota actual puede verse alterada por las prácticas culturales realizadas en el cafetal de un ciclo cafetalero a otro y las diferencias climáticas.

Elhalis et al. (2020) mencionan que para transferir la fermentación del café a un proceso industrial más controlado se puede utilizar cultivos iniciadores definidos. El uso de cultivos iniciadores contribuye al control del proceso al promover el predominio de la microbiota. El inóculo puede promover un cambio en el desarrollo de la microbiota epífita durante la fermentación, y es posible seleccionar aquellas que favorezcan la mejora en la calidad final del café (De Melo et al., 2014). Incluso cuando no provoca un aumento de la puntuación en taza, el uso de cultivos iniciadores puede desarrollar diferentes perfiles sensoriales, lo cual es interesante para ampliar las posibilidades de atender al mercado. Sin embargo, es esencial comprender la contribución de los grupos y especies microbianas individuales al proceso de fermentación y su efecto sobre la calidad de los granos de café.

Los sistemas de fermentación anaeróbica inducida podrían ser utilizados por el productor para conseguir una mayor diferenciación sensorial y control de la calidad del café (Martínez et al., 2022b);

Batista et al., 2022). La aplicación de protocolos de fermentación con parámetros de procesamiento definidos podría ser utilizado para aumentar la calidad, previsibilidad y reproducibilidad en el procesamiento del café. Actualmente las herramientas de control de calidad se realizan principalmente al final del proceso, imposibilitando la toma de decisiones preventivas para la calidad del grano de café durante el proceso (Ferreira et al., 2023). Por esta razón, más compuestos deseables o indeseables deben identificarse para ser utilizados como indicadores de calidad.

CONCLUSIONES

Diversas investigaciones demuestran el papel de la fermentación para la obtención de cafés de especialidad, ya que este optimiza la formación de metabolitos volátiles y precursores del sabor. Brasil es el principal país latinoamericano que investiga las condiciones de fermentación y su efecto en las características químicas y sensoriales del grano. Las condiciones de fermentación en los métodos de procesamiento varían de un país a otro, incluso de una región a otra, por ello suelen ser resultados diferentes. Sin embargo, estos procesos deben ser monitoreados, ya que las diferentes condiciones del método pueden conducir a la formación de volátiles y sabores indeseables. La aplicación de un proceso de fermentación con microorganismos iniciadores podría ser una técnica potencial para la modulación del sabor del café. Esto no solo podría mantener constante y controlada la calidad del proceso de fermentación, sino que también proporcionaría un método de procesamiento novedoso para apuntar y mejorar la composición de los metabolitos en los granos de café verde para la modulación del sabor del café. Sin embargo, falta por investigar y difundir conocimiento sobre condiciones específicas del proceso de fermentación y su efecto sobre la generación de metabolitos y calidad en taza del café en Latinoamérica. También, es importante evaluar la apropiación de esta transferencia tecnológica por parte de los productores.

REFERENCIAS

- Aguilar-Alvarez, M. E., Saucedo-Castañeda, G., Durand, N., Perraud-Gaime, I., González-Robles, R. O., & Rodríguez-Serrano, G.M. (2021). The variety, roasting, processing, and type of cultivation determine the low
- OTA levels of commercialized coffee in Chiapas State, Mexico. *Food Control*, 126, 108088. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108088>
- Batista, Da M.M. C. B., Batista, N. N., Ribeiro, D. D., & Freitas, S. R. (2022). Impact of microbial self-induced anaerobiosis fermentation (SIAF) on coffee quality. *Food Bioscience*, 47, 101640. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101640>
- Bastian, F., Hutabarat, O.S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T.B., & Simal-Gandara, J. (2021). From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing. *Foods*, 10, 2827. <https://doi.org/10.3390/foods10112827>
- Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Evangelista, S. R., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2018). Characteristics of fermented coffee inoculated with yeast starter cultures using different inoculation methods. *Food Science and Technology*, 92, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.029>
- Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Sarmiento, A. B. I., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2021). Influence of yeast inoculation on the quality of fermented coffee (*Coffea arabica* var. Mundo Novo) processed by natural and pulped natural processes. *International Journal of Food Microbiology*, 343, 109107. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109107>
- Cardoso, W. S., Agnoletti, B. Z., Freitas, R., & Pinheiro, F. A. (2021). Biochemical aspects of coffee fermentation. In L. L. Pereira, & T. R. Moreira (Eds.), *Quality Determinants In Coffee Production* (1st ed., pp. 149–208). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_4
- CBI. (2022). What requirements must coffee comply with to be allowed on the European markets?. <https://www.cbi.eu/market-information/coffee/what-requirements-should-your-product-comply>.
- Cruz-OByrne, R., Piraneque-Gambasica, N., & Aguirre-Forero, S. (2021). Microbial diversity associated with spontaneous coffee bean fermentation process and specialty coffee production in northern Colombia. *International Journal of Food Microbiology*, 354, 109282. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109282>
- Das, S. (2021). Review post-harvest processing of coffee: An overview. *Coffee Science*, 16, p. e161976, 2022. DOI:10.25186/v16i.1976
- da Silva Vale, A., Balla, G., Rodrigues, L. R. S., de Carvalho Neto, D. P., Soccol, C. R., & de Melo Pereira, G. V. (2022). Understanding the effects of self-induced anaerobic fermentation on coffee beans quality: Microbiological, metabolic, and sensory studies. *Foods*, 12(1), 37. <https://doi.org/10.3390/foods12010037>
- De Carvalho Neto, D. P., De Melo Pereira, G. V., De Carvalho, J. C., Soccol, V.T., & Soccol, C.R. (2018). High-throughput rRNA gene sequencing reveals high and complex bacterial diversity associated with Brazilian coffee bean fermentation. *Food Technology and Biotechnology*, 56(1), 90. DOI: 10.17113/ftb.56.01.18.5441
- De Carvalho Neto, D. P., De Melo Pereira, G. V., Finco, A. M. O., Rodrigues, C., Carvalho, J. C. D., & Soccol, C. R. (2020). Microbiological, physicochemical, and sensory studies of coffee beans fermentation conducted in a yeast bioreactor model. *Food Biotechnology*, 34(2), 172-192. <https://doi.org/10.1080/08905436.2020.1746666>
- De Carvalho Neto, D. P., De Melo Pereira, G. V., Tanobe, V. O., Soccol, V.T., G. Da Silva, B. J., Rodrigues,

- C., & Soccol, C. R. (2017). Yeast diversity and physicochemical characteristics associated with coffee bean fermentation from the Brazilian Cerrado Mineiro region. *Fermentation*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.3390/fermentation3010011>
- De Bruyn, F., Zhang, S.J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A.V., & De Vuyst, L. (2017). Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1), 1–16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>
- De Melo Pereira, G. V., Neto, E., Soccol, V. T., Medeiros, A. B. P., Woiciechowski, A. L., & Soccol, C. R. (2015). Conducting starter culture-controlled fermentations of coffee beans during on-farm wet processing: Growth, metabolic analyses, and sensorial effects. *Food Research International*, 75, 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.06.027>
- De Melo Pereira, G. V., Soccol, V. T., Pandey, A., Medeiros, A. B. P., Lara, J. M. R. A., Gollo, A. L., & Soccol, C. R. (2014). Isolation, selection, and evaluation of yeasts for use in fermentation of coffee beans by the wet process. *International journal of food microbiology*, 188, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.008>
- Dias, E. C., Borém, F. M., Pereira, R. G. F. A., & Guerreiro, M.C. (2012). Amino acid profiles in unripe Arabica coffee fruits processed using wet and dry methods. *European Food Research and Technology*, 234, 25-32. DOI 10.1007/s00217-011-1607-5
- Elhalis, H., Cox, J., Frank, D., & Zhao, J. (2020). The crucial role of yeasts in the wet fermentation of coffee beans and quality. *International Journal of Food Microbiology*, 333, 108796. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108796>
- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee byproducts. *Food Research International*, 46, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- Ferreira, L. J. C., de Souza Gomes, M., de Oliveira, L. M., & Santos, L. D. (2023). Coffee fermentation process: A review. *Food Research International*, 112793. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793>
- Fujigaki, A. H. (2020). Consumo de Café en México y el Papel de las Cafeterías. Available online: https://vinculando.org/empresas/consumo_de_cafe_en_mexico_importancia_de_las_cafeterias.html (accessed on 4 July 2020).
- Gambacorta, F. V., Dietrich, J. J., Yan, Q., & Pflieger, B. F. (2020). Rewiring yeast metabolism to synthesize products beyond ethanol. *Current Opinion in Chemical Biology*, 59, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.08.005>
- Getachew, M., Verheyen, K., Tolassa, K., Tack, A. J., Hylander, K., Ayalew, B., & De Frenne, P. (2023). Effects of shade tree species on soil biogeochemistry and coffee bean quality in plantation coffee. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108354. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108354>
- Gonzalez-Rios, O., Suarez-Quiroz, M. L., Boulanger, R., Barel, M., Guyot, B., Guiraud, J. P., & Schorr-Galindo, S. (2007). Impact of “ecological” post-harvest processing on coffee aroma: II. Roasted coffee. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(3-4), 297-307. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.12.004>
- Guerrero-Peña, A., Vázquez-Hernández, L., Bucio-Galindo, A., & Morales-Ramos, V. (2023). Chemical and NIR spectroscopy in the determination of the origin, variety, and roast time of Mexican coffee. *Heliyon*, 9, e18675. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18675>
- Haile, M., & Kang, W. H. (2019). The harvest and post-harvest management practices’ impact on coffee quality. *Coffee-Production and Research*, 1-18. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82913>.
- Jiménez, M. E. J., Machado, M.P.M., de Oliveira, V. A. L., Batista, N. N., Franco, D.S. D., Ribeiro, D. D., & Freitas, S. R. (2023). Influence of anaerobic fermentation and yeast inoculation on the viability, chemical composition, and quality of coffee. *Food Bioscience*, 51, 102218. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102218>
- Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Coffee fermentation and flavor – An intricate and delicate relationship. *Food Chemistry*, 185, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.124>
- Lingle, T. R., & y Menon, S. N. (2017). Cupping and grading discovering character and quality. En: *The craft and science of coffee* pp. 181–203.
- Martinez, P. M. M., Batista, N. N., Miguel, M. G. D. C. P., Simão, J. B. P., Soares, J. R., & Schwan, R. F. (2020). Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees. *Food Research International*, 129, 108872. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108872>
- Martinez, S. J., Batista, N. N., Bressani, A. P. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022a). Molecular, chemical, and sensory attributes fingerprinting of self-induced anaerobic fermented coffees from different altitudes and processing methods. *Foods*, 11(24), 3945. <https://doi.org/10.3390/foods11243945>
- Martinez, S. J., Bressani, A. P. P., Simão, J. B. P., Pylro, V. S., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022b). Dominant microbial communities and biochemical profile of pulped natural fermented coffees growing in different altitudes. *Food Research International*, 159, 111605. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111605>
- Martinez, S. J., Simão, J. B. P., Pylro, V. S., & Schwan, R. F. (2021). The altitudinal coffee cultivation causes shifts in the microbial community assembly and biochemical compounds in natural induced anaerobic fermentations. *Frontiers in Microbiology*, 12, 671395. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.671395>
- Meira, B.F. M., Sances, R. M. H., de Carvalho A.A.P., Mendes, S. C., Soares, P.R., Nakajima, M., & Sugino, R. (2024). Fermentation of coffee fruit with sequential inoculation of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae*: effect on sensory attributes and chemical composition of the beans. *Food Chemistry*, 446, 138820. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138820>
- Musebe, R., Agwanda, C. H. A. R. L. E. S., & Mekonen, M. (2007). Primary coffee processing in Ethiopia: patterns, constraints and determinants. https://www.researchgate.net/publication/228470404_Primary_coffee_processing_in_Ethiopia_patterns_constrains_and_determinants.
- Pancsira J. (2022). International Coffee Trade: a literature review. *Journal of Agricultural Informatics*, 13(1). <https://doi.org/10.17700/jai.2022.13.1.654>
- Pancsira, J. & Lengyel, P. (2020). A nemzetközi kávékereskedelem hálózatának vizsgálata. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. <https://doi.org/10.21791/ijems.2020.1.33>
- Peñuela-Martínez, A. E., Velásquez-Emiliani, A. V., & Angel, C.

- A. (2023). Microbial diversity using a metataxonomic approach, associated with coffee fermentation processes in the department of quindío, Colombia. *Fermentation*, 9(4), 343. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040343>.
- Pereira, L. L., Júnior, D. B., Sousa, L. H. B. P., Santos Gomes, W., Cardoso, W. S., Guarçoni, R. C., & ten Caten, C. S. (2021). Relationship Between Coffee Processing and Fermentation. In L. L. Pereira, & T. R. Moreira (Eds.), *Quality Determinants In Coffee Production*, 1st ed., 255–301. Cham: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-54437-9_6.
- Pereira, T.S., Batista, N. N., Santos, Pimentá, L. P., Martinez, S. J., Ribeiro, L. S., Oliveira, Naves, J.A & Schwan, R. F. (2022). Self-induced anaerobiosis coffee fermentation: Impact on microbial communities, chemical composition and sensory quality of coffee. *Food Microbiology*, 103, Article 103962. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103962>
- Pereira, G. V. d. M., Neto, D. P. D.C., Júnior, A. I. M., Vasquez, Z. S., Medeiros, A. B. P., Vandenberghe, L.P.S & Soccol, C. R. (2019). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee bean – A review. *Food Chemistry*, 272, 441–452. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>
- Pereira, G.V.M., Soccol, V.T., Brar, S.K., Neto, E., & Soccol, C.R. (2017). Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing. *Critical Reviews in Food ScienceandNutrition*, 57, 2775–2788. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067759>
- Ponte, S. (2002). The ‘Latte Revolution’? Regulation, Markets, and Consumption in the Global Coffee Chain. *World Dev.* 30, 1099–1122. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00032-3)
- Sánchez-Riaño, A. M., Vega-Oliveros, C., Ladino-Garzón, W. L., Orozco-Blanco, D. A., Bahamón-Monje, A. F., Gutiérrez-Guzmán, N., & Amorocho-Cruz, C. M. (2024). Effects of cherries Sanitization methods and fermentation times on quality parameters of coffee beans. *Heliyon*, 10(13). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33508>
- Servín-Juárez, R., Trejo-Pech, C.J, Pérez-Vásquez, A.Y., & Reyes-Duarte, Á. (2021). Specialty coffee shops in Mexico: factors influencing the likelihood of purchasing high-quality coffee. *Sustainability*, 13(7), 3804. <https://doi.org/10.3390/su13073804>
- Silva, C. F., Batista, L. R., Abreu, L. M., Dias, E. S., & Schwan, R. F. (2008). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica*) fermentation. *Food microbiology*, 25(8), 951-957. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.07.003>
- Sualeh, A., Tolessa, K. & Mohammed, A. (2020). Biochemical composition of green and roasted coffee bean and their association with coffee quality from different districts of southwest Ethiopia. *Heliyon*, 6, e05812. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05812>
- Tassew, A. A., Yadessa, G. B., Bote, A. D., & Obso, T. K. (2021). Influence of location, elevation gradients, processing methods, and soil quality on the physical and cup quality of coffee in the Kafa Biosphere Reserve of SW Ethiopia. *Heliyon*, 7(8). DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07790
- Taveira, J. D. S., Borém, F. M., Da Rosa, S. D. V., Oliveira, P. D., Giomo, G. S., Isquierdo, E. P., & Fortunato, V. A. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1039291>
- Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Torres, J., Falconi, C., Moccand, C., ... & De Vuyst, L. (2019). Following coffee production from cherries to cup: Microbiological and metabolomic analysis of wet processing of Coffea arabica. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(6), e02635-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.02635-18>.

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 18/10/2024

CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES A BASE DE PURÉ DE COCO (*COCOS NUCIFERA L.*) COMO UNA ALTERNATIVA DE EMPAQUE

CHARACTERIZATION OF EDIBLE FILMS BASED ON COCONUT PUREE (*COCOS NUCIFERA L.*) AS A PACKAGING ALTERNATIVE

Bernardo Vázquez Ovando⁽¹⁾
 Rosalinda Ovando Cáceres⁽¹⁾
 Julia Griselda Cerón Bretón⁽¹⁾
 Rosa María Cerón Bretón⁽¹⁾
 Marcela Rangel Marrón^{*(1)}

RESUMEN

Las películas comestibles son un material delgado que tienen la finalidad de actuar como una barrera a la transferencia de solutos en los alimentos, en su elaboración se incorporan plastificantes que reducen la fragilidad propia de la película. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la concentración de alginato de sodio y la mezcla de dos plastificantes: glicerol y sorbitol sobre algunas propiedades físicas (color, contenido de humedad, solubilidad), mecánicas (fuerza de ruptura y porcentaje de elongación), barrera (permeabilidad al vapor de agua y rancidez oxidativa) de películas comestibles a base de puré de coco. Se utilizó un diseño de superficie de respuesta Box Behnken para diseñar, formular y evaluar las películas comestibles. Se generaron 15 formulaciones a partir de alginato (0.7-1.4%

p/p), glicerol (1-1.5% p/p) y sorbitol (0.5-1 % p/p). Las películas se obtuvieron utilizando el método de vaciado en placa a 40 °C por 24h. Los resultados obtenidos mostraron que la concentración de sorbitol afecta el color y el contenido de humedad de las películas, pero no así la solubilidad. La menor fuerza de ruptura fue 0.351 MPa cuando aumenta la concentración de alginato. El alginato, glicerol y sorbitol afectaron significativamente ($p < 0.05$) el porcentaje de elongación. La concentración de glicerol repercutió en la permeabilidad al vapor de agua. Por otra parte, se obtuvo un efecto protector de todas las formulaciones en la rancidez oxidativa con respecto al control. Los resultados sugieren que las películas comestibles a base de puré de coco pueden ser una alternativa para ser incorporadas en un alimento.

Palabras Clave: Películas comestibles, puré de coco, plastificantes, empaque

ABSTRACT

Edible films are thin materials whose purpose is to act as a barrier to the transfer of solutes in foods, and plasticizers are incorporated in their preparation to reduce the fragility of the film. The objective of this research was to determine the effect of the concentration of sodium alginate and the mixture of two plasticizers, glycerol and sorbitol, on some physical (color, moisture content, solubility), mechanical (puncture strength and elongation percentage), barrier

⁽¹⁾Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56 No. 4 Esq. Avenida Concordia. Col. Benito Juárez C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, México. bernardovazquez122@gmail.com, rosy_caceres@outlook.com, jbreton@delfin.unacar.mx, rceron@pampano.unacar.mx, *mrangel@pampano.unacar.mx.

(water vapor permeability and oxidative rancidity) properties of edible films based on coconut puree. A Box–Behnken response surface design was used to design, formulate, and evaluate the edible films. This design generated fifteen formulations from alginate (0.7-1.4% w/w), glycerol (1-1.5% w/w), and sorbitol (0.5-1 % w/w). The films were obtained using the plate casting method at 40 °C for 24h. The results obtained showed that the concentration of sorbitol affect the color, and moisture content of the films but not the solubility. The lowest puncture strength was 0.351 MPa with increasing alginate concentration. Alginate, glycerol, and sorbitol significantly ($p < 0.05$) affected the elongation percentage. The concentration of glycerol affected water vapor permeability. On the other hand, a protective effect of all formulations on oxidative rancidity was obtained concerning the control. The results suggest that edible films based on coconut puree can be an alternative to be incorporated into food.

Keywords: Edible films, coconut puree, plasticizers, packing

INTRODUCCIÓN

Las películas (PC) y recubrimientos comestibles (RC) a base de biopolímeros son una innovación en el empaque de alimentos, ya que generan pocos materiales no biodegradables por lo anterior, han llegado a ser utilizados por ser amigables con la naturaleza. (Phan et al., 2005; Sorrentino et al., 2007). En la industria alimentaria su principal función es reducir la permeabilidad al vapor de agua, ser una barrera a las condiciones ambientales, tales como al oxígeno, humedad, sabores y aromas. Y al mismo tiempo, retardar el intercambio de solutos, aceites y grasas de un alimento cubierto con el objetivo de incremental la vida de anaquel de este (Phan et al., 2005, Rojas-Graü et al., 2006, Barbosa-Cánovas, 2012). También tienen la bondad de poder incorporar en su matriz polimérica, antioxidantes, antimicrobianos, plastificantes o mezclas de compuestos que sean reconocidos como seguros (GRAS) con el fin de mejorar su integridad y funcionalidad (Devlieghere et al., 2004).

Las PC y RC deben ser inocuos, libres de alérgenos, fáciles de producir y poseer una estabilidad estructural, transparentes, flexibles, resistentes e hidrosolubles además de poseer buenas propiedades adhesivas (Chavan et al., 2023). Los principales

componentes para obtener PC y RC se pueden dividir en tres grupos: polisacáridos, proteínas y lípidos o bien mezcla de grupos denominados composites (Barbosa-Cánovas, 2012). El alginato es un polisacárido encapsulante que puede formar geles en presencia de cationes divalentes como calcio (Rhim, 2004). Para la industria alimentaria, el alginato es importante por sus propiedades gelificantes, espesantes, emulsificantes y ligantes de moléculas de agua (Rojas-Graü et al., 2006).

Las propiedades mecánicas se hacen más eficientes cuando los polisacáridos se combinan con plastificantes como glicerol, sorbitol, propilenglicol entre otros polioles, los cuales mejoran la flexibilidad y resistencia a la ruptura previniendo la fragilidad de las PC, también aumentan la transferencia de vapor de agua y la permeabilidad al gas (McHugh y Krochta, 1994, Rhim, 2004, Ballesteros-Martínez et al., 2020). Urbizo-Reyes et al. (2020), desarrollaron PC a base de semilla de chia con una mezcla de polioles (glicerol y sorbitol), observaron que a mayor contenido de sorbitol (2.67g) las PC presentaron resistencia a la tracción y una menor permeabilidad de agua, por otro lado. Liu et al. (2014) evaluaron el uso de sorbitol (2% p/v) en PC a base de quitosano (2% p/v) con diferentes grados de acetilación (85 y 95°), observando que la concentración del plastificante reduce el contenido de humedad y la permeabilidad al vapor de agua. Los estudios anteriores demuestran que, el glicerol y el sorbitol promueven estructuras ordenadas lo que hace obtener películas más resistentes.

Se han desarrollado diversas investigaciones de PC elaboradas a base de frutas y vegetales ricas en nutrientes, PC a base de puré de manzana han incorporado aceites esenciales como antimicrobianos (Rojas-Graü et al., 2006) y lípidos para disminuir la transferencia al vapor de agua (McHugh y Senesi, 2000). Han reportado una reducción de la permeabilidad al vapor de agua en un 21% para PC a base de puré de plátano maduro adicionados con nanopartículas de quitosano (Martelli et al., 2012). Rangel et al. (2019) obtuvieron PC a base de puré de papaya conteniendo alginato de sodio, glicerol y ácido cítrico obteniendo una elongación máxima del 11%. Por lo anterior, se concluye que los azúcares presentes en las frutas actúan como plastificantes naturales generando películas flexibles.

El consumo de coco (*Cocos nucifera L.*), el agua y la pulpa aportan beneficios a la salud como: antioxidante natural, antidiabético, antimicrobiano,

antiinflamatorio entre otros y destaca su uso en el tratamiento de enfermedades importantes, tales como malaria (Roopan, 2016). La mejor forma de explotar el coco es mediante la venta del coco fresco, aunque también destacan productos como fibras textiles, recipientes, combustibles entre otros (SAGARPA.2022). Tomando en cuenta la calidad nutritiva del coco para utilizarlo como un nuevo ingrediente que permita mejorar la funcionalidad de una película comestible, la presente investigación tiene el objetivo de Determinar efecto de la concentración de alginato de sodio y la mezcla de dos plastificantes glicerol y sorbitol sobre algunas propiedades físicas, mecánicas y rancidez oxidativa de películas comestibles a base de puré de coco.

MÉTODOS

1.1 Caracterización de la materia prima Acidez titulable

Se determinó la acidez titulable del puré de coco (PC) por el método 22.058 de la AOAC (1995), para lo cual se utilizó una solución valorada de NaOH 0.1 N, hasta alcanzar el vire del indicador fenolftaleína.

pH

Se midió con un potenciómetro digital Thermo Scientific Orion (EE.UU) mediante inmersión directa del electrodo en el puré de la fruta.

Sólidos solubles totales (°Bx)

Se determinaron siguiendo el método 22.024 de la AOAC (1995), se utilizó un refractómetro digital ATAGO (0-32 °Bx) modelo PAL-1 (Japón).

1.2 Materiales

Se utilizó puré de coco (*Cocos Nucifera L.*) con un contenido inicial de sólidos solubles de 8.57 °Bx y se ajustó a 20° Bx con sacarosa comercial, el puré es el ingrediente primario de la solución formadora de película (SFP). Se utilizó alginato de sodio (FMC Biopolymer, México) como biopolímero, glicerol y sorbitol (Merck Inc. Corp. Whitehouse Station, NJ, EE. UU) como plastificantes. Para formar un polímero insoluble se utilizó CaCl₂ (2% p/v) (RBM, México).

1.3 Diseño experimental

Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (Myers y Montgomery, 1995) por medio de un diseño Box Behnken para diseñar, formular y evaluar las películas comestibles de puré de coco (PCPC) cómo se muestra en la tabla 1. Se generaron 15 formulaciones a partir de alginato (0.7-1.4% p/p), glicerol (1-1.5% p/p) y sorbitol (0.5-1 % p/p). Las respuestas evaluadas fueron: color, contenido de humedad, solubilidad, fuerza de ruptura (FR) y porcentaje de elongación (%E), permeabilidad al vapor de agua (PVA) y rancidez oxidativa expresada como índice de peróxidos (IP)

Tabla 1. Formulación de películas comestibles a base de puré de coco

Orden de corrida	Formulación (F)	Alginato (% p/p)	Glicerol (% p/p)	Sorbitol (% p/p)
1	1	0.70	1.25	1.00
2	2	1.05	1.25	0.75
3	3	1.05	1.50	1.00
4	4	0.70	1.50	0.75
5	5	1.40	1.25	1.00
6	6	1.05	1.00	0.50
7	7	1.05	1.25	0.75
8	8	1.40	1.00	0.75
9	9	0.70	1.25	0.50
10	10	1.05	1.25	0.75
11	11	1.40	1.50	0.75
12	12	1.05	1.00	1.00
13	13	1.40	1.25	0.50
14	14	0.70	1.00	0.75
15	15	1.05	1.50	0.50

1.4 Preparación de las soluciones formadoras de películas comestibles

Para preparar las soluciones formadoras de películas comestibles (SFP), se utilizaron 700 g de solución de alginato disuelto en agua con agitación y calentamiento a 70°C, hasta obtener su completa disolución. Posteriormente, se adicionó la cantidad de glicerol y sorbitol de acuerdo con el diseño experimental reportado en la tabla 1. Enseguida se incorporó puré de coco 26% p/p (260 g de puré) (McHugh y Senesi, 2000). Se homogeneizó por 5 min y se desgasificó a 5°C por 24 h con el objetivo de eliminar las burbujas de aire. Posteriormente, se vertieron 5 mL de la SFP en moldes de silicón y se secaron a 40 °C por 24 h. A las películas ya secas, se realizó el proceso de reticulación como lo describe Rhim (2004), se les adicionó 5 mL de CaCl₂ y se mantuvieron por 2 min, en seguida se eliminó el exceso de CaCl₂ y se dejaron secar por una hora a 40°C. Las películas secas se acondicionaron al 56% HR hasta su análisis.

1.5 Caracterización de las películas comestibles

Color

Se utilizó un colorímetro Konica Minolta (Minolta, Inc., Tokyo, Japón) para medir el color de las PCPC para cada tratamiento se determinaron seis réplicas de los valores de L*, a* y b* de la escala CIELab. De estos valores, se obtuvo el Tono (H) siendo el arcotangente (b/a) y la cromaticidad (c) se calcula a partir de la raíz cuadrada de la diferencia de a²-b² La calibración del instrumento se realizó con un mosaico blanco (L*= 94.43, a* = -1.10, b* = 0.84).

Contenido de humedad

Se determinó a través de la pérdida de peso de la película en forma de cuadros de 2 x 2 cm², los cuales se sometieron a 105°C durante 24 h a presión atmosférica (Osés et al., 2009).

Solubilidad en agua

Es el porcentaje de película seca de 2 x 2 cm² a 103 °C durante 24 h y su posterior solubilización después de 24 h en agitación en agua destilada. De acuerdo con (Zahedi et al. (2010).

Fuerza de ruptura y Porcentaje de Elongación

Se determinaron de acuerdo con Soradech et

al. (2012). Se utilizó un analizador de textura Texture Analyzer TA.XT2 (Stable Micro Systems, Godalming, UK). Las películas se colocaron en arillos de acrílico que tienen un orificio de 0.8 cm de diámetro, y fueron ensayadas con una aguja cilíndrica de 1.3 cm de diámetro a una velocidad de 1 mm/s y una celda de carga de 25 kg. La FR y el %E se calcularon a partir de cinco mediciones por cada formulación.

Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La PVA se determinó gravimétricamente a 25 °C como lo describe Rhim (2004). Las películas se montaron en pesafiltros de vidrio con 9 ml agua destilada, posteriormente, se colocaron en un desecador de vidrio que contenía una solución de cloruro de magnesio acondicionada a una HR del 33%. El sistema anterior, se mantuvo a una temperatura de 25 °C. Se registró el cambio de peso con respecto al tiempo en un intervalo de 60 min por un periodo de 8 h. Primero se obtuvo la velocidad de transmisión al vapor de agua (VTVA) a través de la pendiente del análisis de regresión de la pérdida de peso de la película como una función del tiempo (g/s) y se relacionó con la permeabilidad al vapor de agua (PVA) como lo describe Kaya y Kaya (2000) de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2.

$$VTVA = m_1 / A = g/m^2s \quad (1)$$

$$WVP = L \times VTVA / (p_i - p_a) \quad (2)$$

Donde A es el área expuesta, p_i y p_a son las presiones de vapor del aire saturado y del aire a 33% RH a 25°C respectivamente. L es el espesor promedio (mm).

Rancidez oxidativa

Se adaptó el método reportado por Osés et al., 2009 para evaluar el efecto protector de cada película formulada. Se utilizaron frascos de vidrio que contenían 9 mL de aceite de oliva extra virgen (Carbonell, España). Para cada frasco, la PC comestible realizó la función de tapa, la cual se ajustó con anillos elásticos, se dejó 1 cm de espacio de cabeza entre el aceite y la PC. Los

sistemas generados se almacenaron a 25°C en una estufa (LabLine, EE.UU) en ausencia de luz. Se almacenaron tres sistemas por cada tratamiento con y sin PC, siendo esta última la muestra control. Cada 20 días se registró el índice de peróxidos (IP) durante 60 días de acuerdo con la NMX-F-154-1987 para grasas y aceites. Se registraron los mililitros de solución de tiosulfato de sodio 0.01 N gastados en la titulación. Los resultados se expresaron en miliequivalentes de peróxido contenidos en un kilogramo de aceite por muestra mediante la ec 3.

$$I.P=(A- A_1) \times N \times \frac{100}{M} \tag{3}$$

Donde I.P= índice de peróxidos, A= mililitros gastados en la titulación de la muestra, A1= mililitros gastados en la titulación del blanco, N= normalidad de la solución de tiosulfato de sodio, M=masa de la muestra en gramos.

1.6 Análisis estadístico

Las respuestas de las variables de estudio y los términos del diseño experimental se ajustaron a un polinomio de segundo orden representado por ecuación (4), el cual describe el efecto de las variables estudiadas y sus interacciones sobre las respuestas (Y) de estudio.

$$Y= \beta_0+\beta_1X_1+ \beta_2X_2+ \beta_3X_3+ \beta_{11}X_1^2+ \beta_{22}X_2^2+ \beta_{33}X_3^2+ \beta_{12}X_1X_2+ \beta_{13}X_1X_3+ \beta_{23}X_2X_3 \tag{4}$$

Donde Y es la respuesta predicha, β_0 es el coeficiente de la constante, β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes de regresión de los términos lineales; β_{11} , β_{22} y β_{33} son los efectos cuadráticos; y β_{12} , β_{13} y β_{23} las interacciones. Se generaron gráficos de contorno con el fin de visualizar la relación entre la respuesta y los niveles de las variables de estudio y concluir sobre las concentraciones óptimas de la formulación. El ajuste del polinomio se evaluó mediante el coeficiente de regresión y la prueba de falta de ajuste. La significancia del modelo se evaluó con un análisis de varianza ($p<0.10$). La matriz del diseño experimental y el análisis de datos se generaron en el paquete estadístico Minitab 16.0 (Minitab, Inc., State College, PA, EE. UU).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la materia prima

La pulpa de coco presentó un contenido de sólidos solubles de 8.57 ± 0.15 °Brix, pH de 6.77 ± 0.06 y una acidez titulable expresada como porcentaje de ácido cítrico de $0.56\pm 0.08\%$. Los resultados son similares a los reportado por DebMandal y Mandal (2011) y Yong et al. (2009) para Cocos nucifera L.

Caracterización de las películas comestibles

Color

Las PCPC presentaron un color blanco opaco como se observa en la figura. 1. Las tonalidades variaron de 95.11 a 105.84°. En la tabla 2 se observa que, las concentraciones de sorbitol y alginato afectaron significativamente ($p<0.10$) el tono de las PCPC.

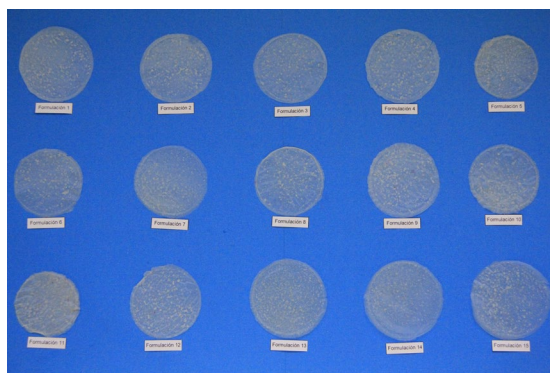


Figura 1. Formulaciones de películas comestibles a base de puré de coco

En la gráfica de contorno para el tono de las PCPC se observó que, a las concentraciones de alginato 1.0 -1.3 % p/p y concentraciones de sorbitol por arriba del 0.9% p/p se obtienen PC más transparentes (Figura 2A). Por otra parte, si se desea obtener PCPC más blancas (Figura 2B) se deberán formular concentraciones inferiores del 1.0% p/p y 0.7% p/p para alginato y sorbitol, respectivamente,

tal y como se reporta para la saturación de color (CROMA) donde se obtuvieron valores alrededor de 3.12 a 11.02 resumidos en la tabla 2. El análisis de varianza mostrado en la tabla 3 corroboró que el termino lineal y cuadrático del alginato afectan significativamente ($p < 0.05$) la saturación del color blanco, pero no así la concentración de glicerol y sorbitol.

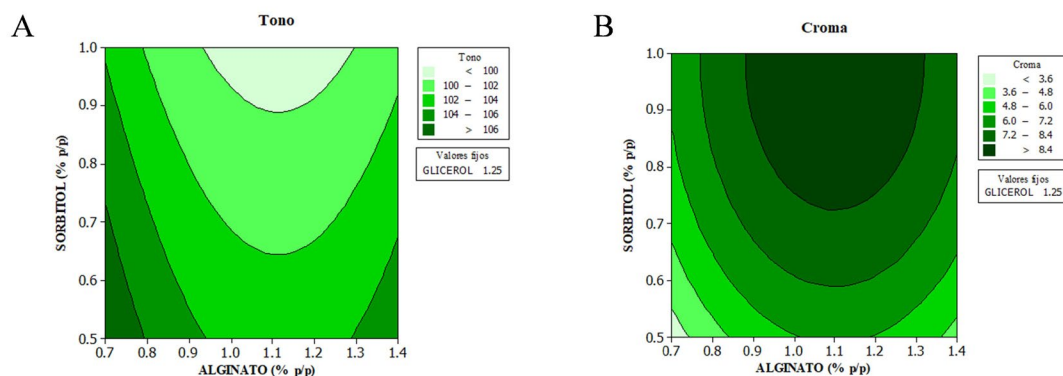


Figura 2. Gráfica de contorno para el efecto de las concentraciones de alginato y sorbitol sobre el Tono (A) y Cromo (B) de las películas comestibles a base de puré de coco.

Tabla 2. Valores experimentales para el color y contenido de humedad de las PCPC

F	A	G	S	Tono °	Croma	CH (%)	Solubilidad (%)
1	0.70	1.25	1.00	104.50 ± 2.47	6.58 ± 0.9	9.29 ± 0.18	19.12 ± 4.45
2	1.05	1.25	0.75	98.85 ± 1.61	10.44 ± 1.0	11.19 ± 0.90	23.32 ± 2.26
3	1.05	1.50	1.00	103.41 ± 0.73	7.78 ± 0.8	13.05 ± 1.01	15.99 ± 1.33
4	0.70	1.50	0.75	105.17 ± 1.45	5.41 ± 0.7	12.75 ± 0.25	10.98 ± 3.32
5	1.40	1.25	1.00	102.63 ± 1.60	7.09 ± 1.3	11.64 ± 1.16	46.25 ± 7.06
6	1.05	1.00	0.50	104.06 ± 0.95	6.87 ± 1.1	12.21 ± 0.50	24.43 ± 1.40
7	1.05	1.25	0.75	99.92 ± 0.57	9.73 ± 0.3	13.51 ± 1.46	4.05 ± 2.80
8	1.40	1.00	0.75	104.02 ± 1.36	5.01 ± 0.8	14.92 ± 0.63	51.02 ± 7.91
9	0.70	1.25	0.50	107.73 ± 5.24	3.12 ± 0.1	8.03 ± 1.19	87.32 ± 5.83
10	1.05	1.25	0.75	103.23 ± 4.16	5.41 ± 2.2	9.19 ± 0.56	60.77 ± 3.88
11	1.40	1.50	0.75	100.79 ± 0.89	9.14 ± 1.4	9.52 ± 0.11	64.27 ± 3.60
12	1.05	1.00	1.00	95.44 ± 3.63	11.02 ± 1.4	9.65 ± 0.28	70.56 ± 1.35
13	1.40	1.25	0.50	106.04 ± 2.05	4.41 ± 0.8	8.49 ± 0.78	59.84 ± 7.40
14	0.70	1.00	0.75	105.84 ± 2.33	5.07 ± 0.6	8.93 ± 0.58	63.79 ± 9.64
15	1.05	1.50	0.50	104.10 ± 1.64	5.24 ± 0.6	8.96 ± 0.11	50.67 ± 2.68

Datos expresados en media ± desviación estándar (n=5)

F: Formulación. A: Alginato (% p/p), G: Glicerol (% p/p), S: Sorbitol (% p/p)

Contenido de humedad

En la tabla 2 se presentan la media de los triplicados del contenido de humedad (CH) de las PCPC. El CH varió de 8.03 a 14.92%. El menor CH se obtuvo en la F9 (8.03± 1.19%) que corresponde a las concentraciones de 0.71, 1.25 y 0.5 % p/p para

alginato, glicerol y sorbitol, respectivamente. En términos generales se observó que el CH de las PCPC aumenta conforme incrementa la concentración de sorbitol (>0.75% p/p) como se observa en la figura 3A.

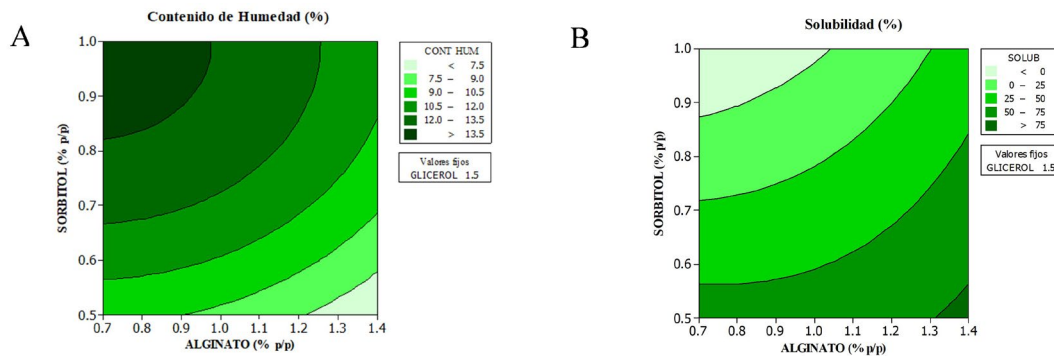


Figura 3. Gráfica de contorno de PCPC para el efecto de las concentraciones de alginato-sorbitol sobre el contenido de humedad (A) y alginato-glicerol para solubilidad (B).

El comportamiento obtenido, se puede atribuir a la matriz de la PC, la cual tiende a ser más hidrófila por la presencia de grupo hidroxilo de los plastificantes (Zhang et al., 2016). Además, los plastificantes como el glicerol y sorbitol tienen la habilidad de reducir los enlaces hidrógeno, mientras incrementan los espacios intermoleculares (McHugh y Krochta, 1994), por lo tanto, se observa en la tabla 3 que, las interacciones entre ellos afectan el CH de las PCPC evidenciado en el análisis de varianza, en donde el termino lineal de alginato, así como las interacciones de alginato-glicerol y glicerol-sorbitol afectan significativamente ($p < 0.05$) el

contenido de humedad de las PCPC.

Solubilidad

Las PCPC alcanzaron una solubilidad mayor del 50% independientemente de la concentración de alginato y sorbitol (tabla 2). En la figura 3B se representa la interacción alginato-sorbitol y una concentración fija de sorbitol al 1% p/p, se puede observar que independientemente de la concentración de alginato y concentraciones de sorbitol menores al 0.6% p/p las PCPC se solubilizaran el 70%.

Tabla 3. Coeficientes de regresión del análisis de varianza de las PCPC

Coeficientes	Tono °	Croma	Contenido de humedad (%)	Solubilidad (%)
X ₀	138.38	-26.49	3.65	180.20
Lineal				
X ₁	-60.93	43.11*	47.35*	-430.10
X ₂	2.23	-1.27	-30.52	44.30
X ₃	-8.14*	26.31	0.51	247.48
Cuadrático				
X ₁ * X ₁	27.35*	-19.59*	-5.92	59.24
X ₂ * X ₂	-	0.43	15.31	-13.60
X ₃ * X ₃	-	-13.26	-19.41	2.48
Interacción				
X ₁ * X ₂	-	-	-26.35*	188.77
X ₁ * X ₃	-	-	-	103.33
X ₂ * X ₃	-	-	25.38*	-323.264
R ² (%)	62.02	60.80	82.08	64.17
Falta de ajuste (P)	0.57	0.86	0.97	0.36
X ₁ ALGINATO, X ₂ GLICEROL, X ₃ SORBITOL *p<0.05				

Los resultados sugieren que la solubilidad en agua de las PCPC está en función de la composición química del puré del coco, el cual es rico ácidos grasos saturados, insaturados (ácido oleico C18:1 y linolénico C18:2) los cuales constituyen < 5%

p/p (Dave et al., 2019; Appaiah et al., 2014) y los ácidos grasos de cadena corta y mediana (Láurico C12 y mirístico C14) los cuales representan el 70% p/p del total de ácidos grasos presentes (Appaiah et al., 2014). Por lo anterior, los ácidos grasos van a

umentar la polaridad de la película. En análisis de varianza reportado en la tabla 3 demostró que las interacciones, los términos cuadráticos y sus interacciones no tuvieron un efecto significativo ($p > 0.05$) en la solubilidad. Por lo que, los altos valores en la solubilidad de la PCPC, se debe al carácter hidrófilo de los plastificantes.

Fuerza de ruptura y Elongación

La Fuerza de Ruptura (FR), varió de 0.351 a 2.450 MPa (tabla 4) cuando aumentan las concentraciones de glicerol a partir de 1.4% p/p y sorbitol de 0.9% p/p (figura. 4A). El análisis de varianza reportado

en la tabla 5 demostró que la interacción glicerol-sorbitol afecta significativamente ($p < 0.05$) la FR de las películas, obteniendo PC más flexibles. Este comportamiento se puede atribuir a que los plastificantes empleados, tienen la característica de aumentar la flexibilidad de las PC debido a su capacidad para reducir los enlaces de hidrógeno internos entre las cadenas de los polímeros mientras aumentan el espacio molecular (Paul et al., 2007). Por otra parte, el porcentaje de elongación (%E) de las PCPC variaron de 117.75 – 150.80% (tabla 4). Se favorece el %E cuando aumentan las concentraciones de glicerol (1.5% p/p) y sorbitol (1.0% p/p) para la mayoría de las formulaciones realizadas (figura. 4B).

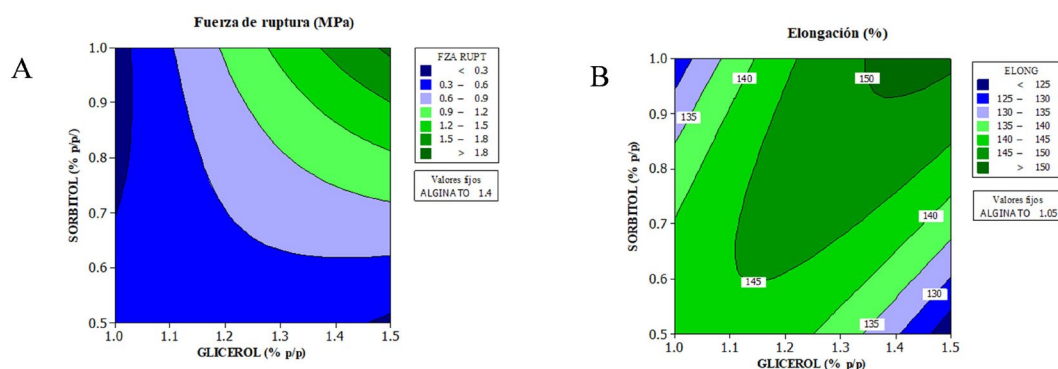


Figura 4. Gráfica de contorno de PCPC para el efecto de las concentraciones de glicerol-sorbitol sobre la fuerza de ruptura (A) y porcentaje de elongación (B).

Tabla 4. Valores experimentales para la Fuerza de Ruptura, Porcentaje de elongación, Permeabilidad al Vapor de Agua e Índice de peróxidos de las PCPC

F	A	G	S	Fuerza de Ruptura* (MPa)	Elongación* (%)	PVA** (gmm/kPahm ²)	IP*** (meq O ₂ / kg)
1	0.70	1.25	1.00	0.66 ± 0.07	142.16 ± 0.40	3.26 ± 0.36	20.06 ± 0.19
2	1.05	1.25	0.75	1.24 ± 0.21	145.06 ± 3.18	3.31 ± 0.39	20.71 ± 0.98
3	1.05	1.50	1.00	2.45 ± 0.15	150.81 ± 5.58	3.36 ± 0.53	23.15 ± 0.33
4	0.70	1.50	0.75	1.13 ± 0.09	146.03 ± 10.93	2.85 ± 0.31	20.38 ± 0.33
5	1.40	1.25	1.00	1.41 ± 0.20	144.79 ± 2.01	4.20 ± 0.45	20.77 ± 0.35
6	1.05	1.00	0.50	0.58 ± 0.18	141.16 ± 2.87	2.99 ± 0.46	19.77 ± 0.24
7	1.05	1.25	0.75	0.70 ± 0.09	142.10 ± 4.86	4.19 ± 0.26	21.17 ± 0.33
8	1.40	1.00	0.75	0.35 ± 0.08	143.85 ± 4.69	2.88 ± 0.36	19.76 ± 0.25
9	0.70	1.25	0.50	0.50 ± 0.04	144.14 ± 4.40	3.14 ± 0.07	19.56 ± 0.02
10	1.05	1.25	0.75	1.27 ± 0.27	148.39 ± 3.01	3.21 ± 0.17	19.32 ± 1.36
11	1.40	1.50	0.75	0.52 ± 0.16	117.75 ± 7.42	3.08 ± 0.32	19.98 ± 0.31
12	1.05	1.00	1.00	0.44 ± 0.12	122.68 ± 6.65	3.50 ± 0.51	22.66 ± 0.21
13	1.40	1.25	0.50	0.54 ± 0.10	123.59 ± 1.24	3.81 ± 0.26	19.75 ± 0.22
14	0.70	1.00	0.75	0.50 ± 0.29	126.85 ± 4.57	2.30 ± 0.16	22.86 ± 0.17
15	1.05	1.50	0.50	0.71 ± 0.13	125.36 ± 1.26	3.13 ± 0.52	21.35 ± 0.23
Control				-	-	-	24.76 ± 0.72

Datos expresados en media ± desviación estándar (n=5)* (n=3)** (n=4, 60 días de almacenamiento)***

F: Formulación. A: Alginato (% p/p), G: Glicerol (% p/p), S: Sorbitol (% p/p)

El análisis de varianza resumido en la tabla 5 demostró que, las concentraciones de alginato, glicerol y sorbitol, así como los términos cuadráticos de alginato y glicerol y sus interacciones afectaron significativamente ($p < 0.05$) el %E, por lo que se obtienen PC más elongables, considerando que las PCPC contienen agua y mezcla de glicerol-sorbitol, lo que generó una disminución de la atracción intermolecular entre las cadenas poliméricas adyacentes, provocando un incremento de flexibilidad en la película (Jun, 2000). Además, el

grado de saturación de los ácidos grasos presentes en el puré de coco proporcionaron una mayor flexibilidad (Dave et al., 2019).

Permeabilidad al vapor de agua

La PVA varió de 2.30 a 4.20 g mm/kPahm2 como se observa en la tabla 4. Los valores obtenidos de PVA en la presente investigación se encuentran dentro del intervalo para películas comestibles a base de puré de frutas y vegetales (Otoni et al. 2017).

Tabla 5. Coeficientes de regresión del análisis de varianza para las propiedades mecánicas y permeabilidad al vapor de agua de PCPC

Coefficientes	Fuerza de Ruptura	Elongación	PVA	IP
X ₀	0.51	-60.76	-12.40	48.7
Lineal				
X ₁	6.11	174.48*	4.61	-0.1
X ₂	-0.71	303.74*	23.42*	-45.8
X ₃	-9.66	-197.93	-5.36	-0.5
Cuadrático				
X ₁ * X ₁	-2.90	-41.47	-1.78	-5.50
X ₂ * X ₂	-1.39	-124.59*	-9.22*	16.4
X ₃ * X ₃	1.03	-62.39	3.99	5.0
Interacción				
X ₁ * X ₂	-	-121.5*	-	7.70
X ₁ * X ₃	-	71.66*	-	1.49
X ₂ * X ₃	7.55*	183.5*	-	-4.3
R ² (%)	78	93	77	64.2
Falta de ajuste (P)	0.45	0.47	0.97	0.332

X₁ ALGINATO, X₂ GLICEROL, X₃ SORBITOL * $p < 0.05$

Se observó que la PVA incrementa cuando la concentración de glicerol alcanza 1.25 % p/p, comprobando que el efecto lineal y la interacción cuadrática de este plastificante afectan significativamente ($p < 0.05$) la PVA, pero no así

para el sorbitol (tabla 5). Probablemente a que el sorbitol es menos efectivo que el glicerol en la reducción de enlaces hidrógeno intermoleculares entre las moléculas del alginato (Olivas y Barbosa-Cánovas, 2008).

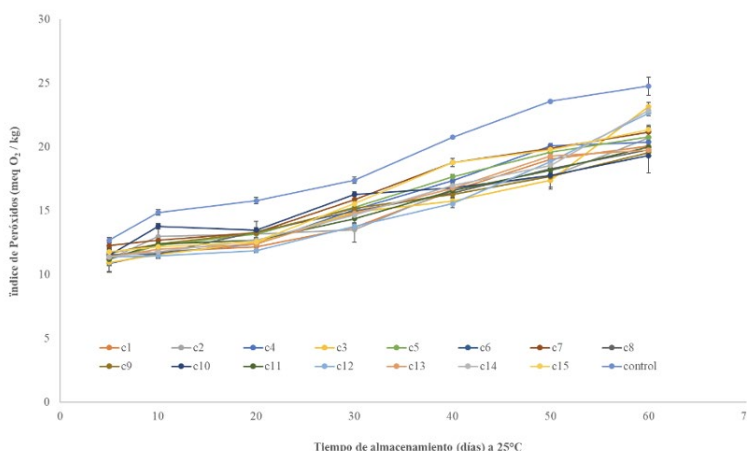


Figura 5. Comportamiento del aceite de oliva almacenado a 25°C durante 60 días

Rancidez oxidativa (Índice de peróxidos)

Para determinar el nivel de oxidación de una grasa destaca el índice de peróxidos, el cuál irá en aumento hasta alcanzar un máximo (peróxidos e hidroperóxidos) y luego comenzarán a disminuir. Se evaluó el comportamiento del aceite de oliva durante 60 días a 25°C y 71% HR, se alcanzaron valores de 19.32 a 23.15 meq O₂/Kg como se observa en la figura 5. En promedio para todas las formulaciones alcanzaron 20.75 meq O₂/Kg valor inferior a la muestra control (24.76±0.72 meq O₂/Kg) reportado en la tabla 4. El análisis de varianza mostrado en la tabla 5 corroboró que los términos lineales, cuadráticos y sus interacciones no afectaron significativamente ($p>0.05$) la rancidez oxidativa a los 60 días de almacenamiento.

CONCLUSIONES

La caracterización de las PCPC fue de suma importancia para garantizar la eficiencia de éstas de acuerdo con sus propiedades. Las concentraciones de glicerol y sorbitol afectaron la tonalidad de las películas comestibles de puré de coco. El porcentaje de elongación se ve afectado por las concentraciones de alginato, glicerol y sorbitol, sugiriendo que disminuye la dureza y aumenta la elasticidad. No se observaron diferencias significativas ($p>0.05$) de los efectos principales en la solubilidad en agua. La PCPC lograron mantener la rancidez oxidativa del aceite de oliva inferior a los 24.76±0.72 meq O₂/Kg con respecto al control.

REFERENCIAS

- Appaiah, P., Sunil, L., Kumar, P. K. P., & Krishna, A. G. G. (2014). Composition of Coconut Testa, Coconut Kernel and its Oil. *Journal Of The American Oil Chemists Society*, 91(6), 917-924. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2447-9>
- Association Of Official Analytical Chemists. (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*.
- Ballesteros-Mártinez, L., Pérez-Cervera, C., & Andrade-Pizarro, R. (2020). Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS Journal*, 20, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.06.002>
- Barbosa-Cánovas, G. V. (2012). Películas y recubrimientos comestibles en contexto con otras tecnologías novedosas de conservación y procesado de alimentos. *Películas y Recubrimientos Comestibles: Propiedades y*
- Aplicaciones en Alimentos. Mexico City: AM Editores, 13-20.
- Chavan, P., Lata, K., Kaur, T., Jambrak, A. R., Sharma, S., Roy, S., Sinhmar, A., Thory, R., Singh, G. P., Aayush, K., & Rout, A. (2023). Recent advances in the preservation of postharvest fruits using edible films and coatings: A comprehensive review. *Food Chemistry*, 418, 135916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135916>
- Dave, A. C., Ye, A., & Singh, H. (2019). Structural and interfacial characteristics of oil bodies in coconuts (*Cocos nucifera* L.). *Food Chemistry*, 276, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.125>
- DebMandal, M., & Mandal, S. (2011). Coconut (*Cocos nucifera* L.: Areaceae): In health promotion and disease prevention. *Asian Pacific Journal Of Tropical Medicine*, 4(3), 241-247. [https://doi.org/10.1016/s1995-7645\(11\)60078-3](https://doi.org/10.1016/s1995-7645(11)60078-3)
- Devlieghere, F., Vermeiren, L., & Debevere, J. (2004). New preservation technologies: Possibilities and limitations. *International Dairy Journal*, 14(4), 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.07.002>
- Jun, C. L. (2000). Reactive blending of biodegradable polymers: PLA and Starch. *Journal Of Polymers And The Environment*, 8(1), 33-37. <https://doi.org/10.1023/a:1010172112118>
- Kaya, S., & Kaya, A. (2000). Microwave drying effects on properties of whey protein isolate edible films. *Journal Of Food Engineering*, 43(2), 91-96. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(99\)00136-3](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(99)00136-3)
- Liu, M., Zhou, Y., Zhang, Y., Yu, C., & Cao, S. (2014). Physicochemical, mechanical and thermal properties of chitosan films with and without sorbitol. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 70, 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.039>
- Martelli, M. R., Barros, T. T., De Moura, M. R., Mattoso, L. H. C., & Assis, O. B. G. (2012). Effect of Chitosan Nanoparticles and Pectin Content on Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of Banana Puree Films. *Journal Of Food Science*, 78(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.03006.x>
- McHugh, T. H., & Krochta, J. M. (1994). Sorbitol- vs Glycerol-Plasticized Whey Protein Edible Films: Integrated Oxygen Permeability and Tensile Property Evaluation. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 42(4), 841-845. <https://doi.org/10.1021/jf00040a001>
- McHugh, T., & Senesi, E. (2000). Apple Wraps: A Novel Method to Improve the Quality and Extend the Shelf Life of Fresh-cut Apples. *Journal Of Food Science*, 65(3), 480-485. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16032.x>
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (2002). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley-Interscience.
- Norma Mexicana NMX-F-154-1987. Alimentos. Aceites y grasas vegetales o animales. Determinación del índice de peróxido. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. Gobierno de México.
- Olivas, G. I., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2008). Alginate-calcium films: Water vapor permeability and

- mechanical properties as affected by plasticizer and relative humidity. *LWT*, 41(2), 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.015>
- Osés, J., Niza, S., Ziani, K., & Maté, J. I. (2009). Potato starch edible films to control oxidative rancidity of polyunsaturated lipids: effects of film composition, thickness and water activity. *International Journal Of Food Science & Technology*, 44(7), 1360-1366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01965.x>
- Otoni, C. G., Avena-Bustillos, R. J., Azeredo, H. M. C., Lorevice, M. V., Moura, M. R., Mattoso, L. H. C., & McHugh, T. H. (2017). Recent Advances on Edible Films Based on Fruits and Vegetables—A Review. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 16(5), 1151-1169. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12281>
- Phan T.D., F. Debeaufort, D. Luu and A. Voilley. 2005. Functional properties of edible agar-based and starch-based films for food quality preservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(4):973-981.
- Rangel-Marrón, M., Mani-López, E., Palou, E., & López-Malo, A. (2019). Effects of alginate-glycerol-citric acid concentrations on selected physical, mechanical, and barrier properties of papaya puree-based edible films and coatings, as evaluated by response surface methodology. *LWT*, 101, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.005>
- Rhim, J. W. (2004). Physical and mechanical properties of water resistant sodium alginate films. *LWT*, 37(3), 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.09.008>
- Rojas-Graü, M. A., Avena-Bustillos, R. J., Friedman, M., Henika, P. R., Martín-Belloso, O., & McHugh, T. H. (2006). Mechanical, Barrier, and Antimicrobial Properties of Apple Puree Edible Films Containing Plant Essential Oils. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 54(24), 9262-9267. <https://doi.org/10.1021/jf061717u>
- Roopan, S. M. (2016). An Overview of Phytoconstituents, Biotechnological Applications, and Nutritive Aspects of Coconut (*Cocos nucifera*). *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 179(8), 1309-1324. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2067-y>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022, 9 marzo). Producción de copra y coco en México. www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-de-copra-y-coco-en-mexico
- Soradach, S., Nunthanid, J., Limmatvapirat, S., & Luangtananan, M. (2012). An approach for the enhancement of the mechanical properties and film coating efficiency of shellac by the formation of composite films based on shellac and gelatin. *Journal of Food Engineering*, 108, 94-102.
- Sorrentino A., G. Gorrasi and V. Vittoria. 2007. Potential perspectives of bionanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology* 18(2):84-95.
- Urbizo-Reyes, U., Martín-González, M. F. S., García-Bravo, J., & Liceaga, A. M. (2020). Development of chia seed (*Salvia hispanica*) mucilage films plasticized with polyol mixtures: Mechanical and barrier properties. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 163, 854-864. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.023>
- Yong, J. W., Ge, L., Ng, Y. F., & Tan, S. N. (2009). The Chemical Composition and Biological Properties of Coconut (*Cocos nucifera* L.). *Water. Molecules*, 14(12), 5144-5164. <https://doi.org/10.3390/molecules14125144>
- Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B., & Sedaghat, N. (2010). Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids. *Journal Of Food Engineering*, 100(1), 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.033>
- Zhang, P., Zhao, Y., & Shi, Q. (2016). Characterization of a novel edible film based on gum ghatti: Effect of plasticizer type and concentration. *Carbohydrate Polymers*, 153, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.082>

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 10/10/2024

BARRAS NUTRITIVAS CON MERMELADA A BASE DE MARACUYÁ

NUTRITION BARS WITH PASSION FRUIT JAM

Vanessa Irais RomeVega⁽¹⁾
 Johana Ramírez Hernández⁽¹⁾
 Guadalupe Gabriela Bárcena Vicuña⁽¹⁾
 Adelfo García Ceja⁽²⁾

RESUMEN

En un mundo cada vez más consciente sobre la importancia de llevar un estilo de vida saludable, la elección por los consumidores se ha inclinado por alimentos nutritivos. La producción de estos, abarca procedimientos para crear nuevas formulaciones que sean aceptables para el consumidor. A través de los años, el estilo de vida de las personas ha cambiado drásticamente, teniendo un ritmo de vida más acelerado, orillando a la industria alimentaria a generar una mayor cantidad de productos procesados y poder satisfacer la demanda que ha estado en constante aumento. Los “snacks” se posicionan como la mejor alternativa, ya que pueden aportar grasas saludables, proteínas, fibra, por mencionar algunos. La presentación de “snacks” en barras ha ganado popularidad, por ser práctica a la

hora de su consumo y satisfacer el hambre. Como objetivo de este proyecto, se examinarán los aspectos clave en cada etapa del proceso de la producción de barras nutritivas con mermelada a base de maracuyá, debido a sus propiedades benéficas para la salud y que compite con los límites de la innovación alimentaria, buscando potenciar la variedad de sabores en el mercado, además, se evaluarán las características de la calidad del alimento, tomando en cuenta sus atributos tangibles (color y olor) e intangibles (sabor, textura y sensación de la masticación).

Palabras Clave: Barra Nutritiva, Maracuyá, Mermelada, Variedad de sabores

ABSTRACT

In a world increasingly aware of the importance of leading a healthy lifestyle, consumer choice has shifted towards nutritious foods. The production of these includes procedures to create new formulations that are acceptable to the consumer. Over the years, people's lifestyle has changed drastically, having a faster pace of life, leading the food industry to generate a greater number of processed products and be able to satisfy the demand that has been constantly increasing. Snacks are positioned as the best alternative, since they can provide healthy fats, proteins, and fiber, to name a few. The presentation of snack bars has gained popularity, as it is practical when it comes to consumption

⁽¹⁾Instituto Tecnológico Superior de Atlixco (ITSA), Calle Heliotropo 1201, Unidad 8 Norte Nueva Xalpatlaco Col. Vista Hermosa, C.P. 74218 Atlixco, Puebla, México, e-mail: ib211095@itsatlixco.edu.mx, johana.ramirez@itsatlixco.edu.mx, guadalupe.barcena@itsatlixco.edu.mx. ⁽²⁾Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Ave. Tecnológico S/N, Col. El Huasteco, C.P. 73049, Ciudad Lázaro Cárdenas, Puebla, México, e-mail: adelfo.ceja@itsvc.edu.mx

and satisfy hunger. As the objective of this project, the key aspects will be examined in each stage of the production process of nutritional bars with passion fruit-based jam, due to its beneficial properties for health and that competes with the limits of food innovation, seeking to enhance the variety of flavors on the market, in addition, the quality characteristics of the food will be evaluated, taking into account its tangible attributes (color and smell) and intangible attributes (flavor, texture and chewing sensation).

Keywords: Nutritious Bar, Passion Fruit, Jam, Variety of flavors

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos motivos que han llevado a las personas a tener un ritmo de vida más acelerado, principalmente por los cambios en el mercado laboral y el aumento de la expectativa para mejorar la calidad de vida, originando un mayor interés por obtener alimentos saludables, al igual que una estabilidad económica, que encamina a los trabajadores a dar una mayor inversión de tiempo y adaptabilidad, obteniendo horarios de trabajo más largos ocasionando dificultad para llevar una alimentación correcta y balanceada, debido a que los alimentos hechos en casa llevan un tiempo de preparación considerable, en comparación de los alimentos procesados, que en el momento de su adquisición están listos para su consumo, provocando que la población opte por adquirir productos procesados.

Debido a las situaciones actuales, los alimentos procesados han tenido una gran demanda, pero su elaboración incluye adicionar otros ingredientes para su conservación. A nivel industrial, debido a la demanda, los alimentos procesados son fabricados con ingredientes de baja calidad, grasas y azúcares, esto para facilitar la venta del producto y obtener mayor ganancia. Poveda (2016), demostró que también contienen cantidades altas de conservadores, grasas saturadas, sodio, entre otros, es por esta razón que surge la necesidad de regularizar un alimento que sea fácil de obtener, práctico a la hora de comer en cualquier lugar y que cubra las necesidades nutricionales de manera puntual.

La industria de alimentos saludables se ha enfocado en ofrecer pequeñas presentaciones con porciones que contengan un valor nutricional favorable, por esta razón, las barras nutritivas han emergido

como el alimento que cumple estas características. Gonzáles et al. (2019).

La producción de “snacks” saludables, como lo son las barras, no solo satisfacen la opción de merienda saludable, sino que también tienen la posibilidad de desafiar constantemente a la innovación alimentaria. Además, estas barras empacadas con nutrientes, proteínas, vitaminas y minerales se han convertido en un compañero indispensable para personas con agendas ocupadas y deportistas, esto también se debe a que es un alimento con un costo accesible en la mayoría de veces y de un consumo práctico. Detrás de cada barra nutritiva hay un proceso de producción que combina la ciencia de la nutrición con la creatividad culinaria, desde la selección cuidadosa de ingredientes hasta la formulación de recetas equilibradas y la implementación de técnicas de fabricación avanzadas. La producción de barras es un campo en constante evolución que busca ofrecer opciones saludables para una sociedad cada vez más consciente de la alimentación.

En las últimas décadas, UNICEF señaló que, en México, a pesar de los avances tecnológicos, culturales y sociales, se ha perdido la importancia en la forma en que se alimentan adecuadamente. Existe una gran población que subsiste con una dieta poco saludable porque no tienen otra opción, pero no se trata de que la población solo se alimente, sino de que se alimente adecuadamente. UNICEF (s/f).

Consecuentemente, como objetivo de este proyecto, se examinarán los aspectos clave en cada etapa del proceso de la producción de barras nutritivas con mermelada a base de maracuyá y se evaluarán las características de la calidad del alimento, tomando en cuenta sus atributos tangibles (color y olor) e intangibles (sabor, textura y sensación de la masticación).

El uso de frutas en barras nutritivas como el mango y guayaba son muy frecuentes en este mercado porque poseen propiedades medicinales, las cuales son atribuidas principalmente al conjunto de compuestos fenólicos contenidos, carotenoides totales y a su capacidad antioxidante. Corrales et al. (2014). La fruta de la pasión granadilla (*Passiflora ligularis*), es de importancia productiva y económica en América Latina, contiene vitaminas, minerales, antioxidantes y compuestos carotenoides por arriba del 10% del valor diario recomendado, lo cual la convierte no sólo en la base económica de diversas regiones, sino en fuente de salud y bienestar. López

et al. (2006). Posicionándose como una alternativa llamativa para incorporar la futa en la mermelada.

La mermelada a base de maracuyá presente en estas barras tiene un valor nutrimental respaldado que proviene de moléculas grandes y complejas como lo son las proteínas, cumpliendo funciones en el cuerpo, sustancias y vitaminas que son necesarias para el funcionamiento celular, así como los minerales necesarios para mantener el buen funcionamiento del cuerpo. Sin embargo, la elaboración del producto estará beneficiado por la aportación de nutrientes saludables que ofrece el maracuyá al consumidor, complementada con su practicidad y energía agregando avena. Según Ortiz et al. (2013) “el beneficio de consumir avenas para los humanos se debe a sus proteínas, lípidos, carbohidratos, fibra, vitaminas, minerales y antioxidantes”. Además de la linaza por la reducción en el riesgo del desarrollo de enfermedades cardiovasculares, cáncer y actividad anti inflamatoria. Lenzi et al. (2008).

Las barras nutritivas con mermelada a base de maracuyá toman una gran relevancia para que el consumidor pueda adquirir un producto que cumpla con los requerimientos que el cuerpo necesita.

MÉTODOS

El diseño de la investigación es un estudio experimental, con un enfoque metodológico mixto:

- Cualitativa: para recopilar información sobre los factores que influyen en la alimentación inadecuada, contemplando también la experiencia en la dificultad para adquirir un alimento innovador.
- Cuantitativa: el uso de encuestas para determinar el porcentaje de aceptación del producto.

Selección de la muestra

Se seleccionó una muestra de 50 personas en total (no especializados), en los cuales participaron alumnos y personal del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco.

Instrumentos de recopilación

Se aplicó una encuesta de 5 preguntas cerradas durante una semana para evaluar el color, sabor, textura y la sensación de la masticación del producto. El análisis sensorial fue en escala hedónica del 1 al 5.

Procedimiento de recopilación de datos: encuesta escrita aplicada de manera física, en grupos pequeños de 5 a 10 personas, con una duración de hasta 20 minutos en el laboratorio de alimentos del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco.

La localización del proyecto se centra en la ciudad de Puebla, específicamente en el municipio de Atlixco, donde se identifica que existen personas con estilos de vida acelerado como estudiantes y profesionales con tiempos prolongados fuera de casa, deportistas y personas que cuidan su alimentación.

Análisis de datos

Los resultados se interpretaron de acuerdo con los objetivos planteados en la investigación.

Parte experimental

Método

La elaboración de la mermelada incluye: la extracción de la pulpa de maracuyá, la preparación de la masa y la integración, como se muestra en el diagrama de flujo (figura 1).



Figura 1. Diagrama de flujo explicativo con los pasos principales para la elaboración de mermelada y las barras

- Técnica: Se utilizaron técnicas de licuado, amasado y horneado para producir las barras.
- Materia prima: Se adquirió con productores de la República Mexicana en mercados indirectos y directos.

Procedimiento de elaboración de la mermelada

Se prepararon las condiciones necesarias para la producción y así asegurar que sea un alimento inocuo, comenzando por el lavado y desinfección de los materiales y utensilios a utilizar, en este caso, licuadora, báscula, balanza analítica, cacerolas, boudoir, cucharas, chuchillos, rodillo, tabla de picar, colador, charolas, mesa de trabajo. Para disminuir los factores de riesgo en la higiene personal en todo momento se utilizó bata de laboratorio, zapato cerrado, cubre bocas, cofia y guantes.

Los ingredientes que se utilizaron fueron el maracuyá (Proveedor: Mejor orgánico), premix para preparar la masa (Marca: “Artesanal multiusos”, Proveedor: Fleischmann), avena (Marca: “Groat”, Proveedor: Agrotop), linaza (Marca: “Linaza entera”, Proveedor: Mayoreo online), miel de abeja (Marca: “Mutiflora”, Proveedor: Miel de oro), sacarosa (Marca: “Zulka”, Proveedor: Zucarmex) y pectina (Marca: “Jaune”, Proveedor: Sosa ingredients).

Una vez que el maracuyá se desinfectó, se extrajo la pulpa del fruto, colocándolo en un recipiente, para posteriormente licuarse y llevarse a fuego medio hasta alcanzar una temperatura de 75° a 90° Celsius entre 30 a 40 minutos para agregar los conservadores, de acuerdo con la NOM-218-SSA1-2011, la cantidad de benzoato de sodio, ácido cítrico y el gelificante (pectina) fue de 0.1 gramos por kilogramo de producto terminado. (Secretaría de Salud, 2012).

En la preparación de la masa, se tomó un recipiente para adicionar la harina, con sal y agua, amasándolo hasta obtener una mezcla homogénea. Con papel para hornear se colocó mezcla y transcurridos 90 minutos, se situó en refrigeración durante 3 horas enrollado en papel film. Después de que la pulpa se dejó reposar se vertió a una cacerola y se posicionó a una temperatura entre 60° a 70° hasta obtener la consistencia de una mermelada, dejándolo enfriar.

Una vez lista la masa, en una mesa totalmente limpia, se esparció con ayuda de un rodillo hasta tener una capa delgada. Posteriormente se agregó canela y en seguida se hicieron cortes para darle forma de barras nutritivas. Una vez obtenidos los cortes, se le adicionó la mermelada de maracuyá para unirlos.

En el horno de convección forzada (País de origen: México, Proveedor: Rsu Labsupply S. A. DE C.V., Marca: “Binder”, Modelo: ED53UL), se estableció

la rejilla con la avena y linaza a una temperatura de 150-160°C por un tiempo de 10 minutos para obtener un tostado ligero. Enseguida, se mezclaron la avena y linaza en una cacerola a baja temperatura hasta alcanzar un color dorado para así, dividirla en piezas como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Muestra de las uniones durante el procedimiento de elaboración para las barras nutritivas con mermelada de maracuyá.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente proyecto se logró obtener una barra nutritiva con mermelada a base de maracuyá, que cumple con los aspectos clave como los puntos críticos de control:

1. Licuado

a) Específicamente la temperatura óptima del agua potable en un rango de 20-25°C para evitar crecimiento bacteriano.

b) Para la mermelada, un tiempo de 15 a 20 minutos, hasta obtener una mezcla homogénea con características de un fluido no newtoniano (viscosidad variable), que caracteriza a una mermelada.

2. Amasado

a) El tiempo para conseguir una textura elástica (desarrollo del gluten necesario para la estructura del pan) fue de 10 a 15 minutos.

3. Horneado

a) Temperatura para las barras: de 180-250°C por un tiempo de 20-40 minutos con posición de las bandejas que permitió la circulación de aire, adquiriendo un color dorado en las barras.

b) Temperatura para la avena y linaza: de 150-160° durante 10 minutos.

Garantizando la obtención de un producto inocuo y de calidad, la NOM-122-SSA1-1994, menciona que no debe de existir presencia de contaminantes físicos (cuerpos sólidos como vello facial, plásticos o metales). (Secretaría de Salud, 1994).

De acuerdo con la NOM-251-SSA1-2009, en los productos de panificación, establece que los ingredientes deben ser autorizados y en proporciones específicas (utilización de un premix certificado). (Secretaría de Salud, 2005).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las encuestas de análisis sensorial (figura 3), donde se analizaron los datos del sabor, olor,

apariencia, textura y la sensación de la masticación, con el apoyo de 50 personas no entrenadas de la comunidad del tecnológico de Atlixco. La utilización de maracuyá como ingrediente principal para la mermelada permitió resaltar el sabor de esta fruta además de proporcionarle consistencia, vitaminas y minerales.

En el diagrama adjunto, se puede observar que, en el aspecto de la apariencia, es el que tiene mayor porcentaje de aceptación con un 24%, en segundo lugar, con un porcentaje de aceptación del 21% el sabor, resaltando lo agrídulce de la materia prima como un punto positivo para un “snack” equilibrado, con un contenido de sacarosa mínimo de 60% de sólidos solubles, mínimo 30% del contenido de fruta fresca, un máximo de 1.5% de pectina y la clasificación de la mermelada “de fruta sola”, en este caso que fue elaborada de una sola fruta (maracuyá). En tercer lugar la textura con un porcentaje del 20%, en cuarto lugar se encuentra con el 19% el olor y el 16% representa la sensación de la masticación. Abriendo puertas para la mejora continua del producto, especialmente en el olor y la sensación de la masticación.

Barra de pastel

Análisis sensorial para mostrar la comparación entre los aspectos evaluados: sabor, olor, apariencia, textura y la sensación de masticación con un panel de 50 personas.

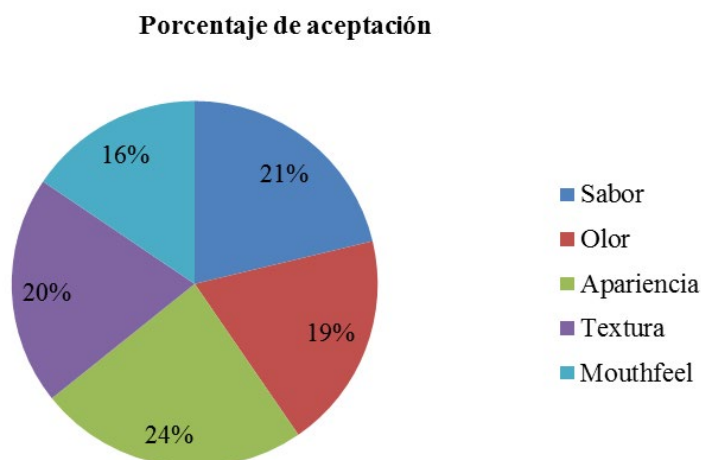


Figura 3. Porcentajes de aceptación de cada aspecto evaluado por el panel y analizado para la mejora continua del producto a futuro.

Como resultado del seguimiento de la formulación tal como lo menciona López et al. (2011), con una consistencia favorable al momento de incorporar los ingredientes, se obtuvo un sabor y textura de mayor dureza, sin perder el sabor agrídulce que caracteriza al maracuyá. Además, resaltando los beneficios nutricionales de esta fruta, como su contenido de vitaminas A, B, C Y E, minerales como el magnesio, fósforo, y potasio, esencial para el sistema

inmunológico, la salud de la piel, salud cardiovascular y la regulación de la presión arterial. La pulpa contiene fibra “dietary”, que ayuda a la digestión, control de colesterol y es antioxidante, evitando el estrés oxidativo en el cuerpo. Potenciando la barra con la combinación de otros ingredientes naturales como la avena y linaza Figura 4, que enriqueció con un 10-40% de proteínas y el 7% de grasas saludables. Ortega et al. (2016).



Figura 4. Barras nutritivas con mermelada a base de maracuyá, producto final con linaza y avena.

Con los resultados obtenidos hasta ahora se sugiere este producto como una alternativa dirigida a personas que mantienen una alimentación saludable, resaltando el interés de consumo por los deportistas y personas con estilos de vida activos como los estudiantes y trabajadores.

Se destaca que este proyecto contribuye a la promoción de la utilización de frutas no tan comunes en el consumo diario de las personas, como el maracuyá, debido a que es muy común encontrar sabores muy repetitivos como la fresa, piña, durazno, zarzamora, en el caso de las frutas, sin resaltar los sabores que predominan en el mercado como el chocolate y la vainilla en la elaboración de productos alimenticios en la industria. Logrando la innovación en el mercado con un sabor diferente a lo rutinario.

CONCLUSIONES

Como conclusión, esta investigación demostró que

la elaboración de las barras nutritivas con mermelada a base de maracuyá es un proceso que involucra la selección de ingredientes naturales con alto valor nutricional (maracuyá, miel, linaza, semilla de girasol y avena), beneficiando la alimentación para personas que realicen actividades físicas que les consumen una alta cantidad de energía y con poca disponibilidad de tiempo, ya que el maracuyá contiene propiedades relajantes y ansiolíticas, además de ser rico en carbohidratos y electrolitos que generan la reposición de energía e hidratación. Con estrés y atletas

Por otro lado, se estableció como un punto crítico de control el tiempo de licuado y amasado esto con el fin de obtener una mezcla homogénea de los ingredientes, lo cual permitió llevar a cabo una correcta manipulación al momento de elaborar la presentación en barra. La selección de los ingredientes se basó en la búsqueda de nutrientes esenciales que complementarían la riqueza nutricional del maracuyá. La avena, la linaza y la semilla de

girasol se seleccionaron por su alto contenido de fibra, proteínas y grasas saludables, aumentando el valor nutricional en la barra. La miel de abeja se utilizó como edulcorante natural para agregar sabor sin aumentar el contenido de azúcares añadidos y resaltando que tiene propiedades antibacterianas y expectorantes, añadiendo un ingrediente más que resulta clave en este tipo de alimentos aportando mayor sabor y color. La extracción de la pulpa se realizó mediante el prensado, evitando así la manipulación excesiva.

Los resultados obtenidos en este proyecto demuestran que es posible elaborar un alimento en el contexto de “snack” en la presentación de barras con mermelada a base de maracuyá con buen sabor y favorable a la salud. Es así como esta barra con mermelada a base de maracuyá se posiciona como saludable, nutritiva y con gran potencial para ser comercializada.

REFERENCIAS

- Corrales-Bernal A., Maldonado, M. E. Urango, L. A. Franco M. C. & Rojano, B. A. (2014) Mango de azúcar (*Mangifera indica*), variedad de Colombia: características antioxidantes, nutricionales y sensoriales. *Revista Chilena de Nutrición*. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182014000300013
- González-Otoya Martínez, C. C., Mori Chacaltana, M., Orellana Urteaga, L. N., Choy Chávez, E. A., & Rosario Mendoza, J. F. (2019). Barras energéticas nutritiva Premium Vita Bars. Trabajo de fin de grado, Universidad. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/bfd4ac1-09c3-4afe-b6e7-c1ceaa09030>
- Lenzi de Almeida, K. C., Spreafico Fernandes, F., Teles Boaventura, G., & Guzmán-Silva, M. A. (2008). Efecto de la semilla de linaza (*Linum Usitatissimum*) en el crecimiento de ratas wistar. *Revista Chilena de Nutrición*. <https://www.redalyc.org/comocitar.oi?id=46935407>
- López Castro, M., Beltrán Cifuentes, M. C., Cardona Lancharos, J. E., & Yepes Giraldo, H. F. (2006). La fruta de la pasión, potencial contribución de la naturaleza a la seguridad alimentaria. *Investigaciones Andina*. <https://www.redalyc.org/pdf/2390/239017506007.pdf>
- López Orozco, M., Mercado Flores, J., Martínez Soto, G., & Magaña Ramírez, J. L. (2011). Formulación de una mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas (*Opuntia* spp.) elaborada a nivel planta piloto. *Acta Universitaria*, 21(2), 31-36. <https://www.redalyc.org/pdf/416/41619838004.pdf>
- Ortega, M., Barboza, Y., Piñero, M. P., & Parra, K. (2016). Formulación y evaluación de una galleta elaborada con avena, linaza y pseudofruto del cauñil como alternativa de un alimento funcional. *Multiciencias*, 16(1), 76-86. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90450808010.pdf>
- Ortiz-Robledo, F., Villanueva-Fierro, I., Oomah, B. D., Lares-Asef, I., Proal-Nájera, J. B., & Nívar-Chaidez, J. J. (2013). Avenanthramides y componentes nutricionales de cuatro variedades mexicanas de avena (*Avena sativa* L.) *Agrociencia*. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30226978002.pdf>
- Poveda, A. (2016). Impacto del sistema de alertas “semáforo” del contenido de azúcar, sal y grasa en etiquetas de alimentos procesados: enfoque cualitativo. *Universitas-XXI: Revista de Ciencias Sociales y Humanas*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5968440>
- Secretaría de Salud. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-122-SSA1-1994, Alimentos y bebidas no alcohólicas. Criterios para evaluar la presencia de cuerpos extraños. *Diario Oficial de la Federación*. <https://www.gob.mx/salud#393>
- Secretaría de Salud. (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2005, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas y productos alimenticios. *Diario Oficial de la Federación*. <https://www.gob.mx/salud#393>
- Secretaría de Salud. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-218-SSA1-2011, Productos y servicios. Bebidas saborizadas no alcohólicas, sus congelados, productos concentrados para prepararlas y bebidas adicionadas con cafeína. *Diario Oficial de la Federación*. <https://www.gob.mx/salud#393>
- UNIFEC. (2019). La mala alimentación está perjudicando la salud de la infancia mundialmente. <https://www.unicef.org/mexico/comunicados-prensa/la-mala-alimentacion%C3%B3n-est%C3%A1-perjudicando-la-salud-de-la-infancia-mundialmente>

Fecha de recepción: 8/08/2024

Fecha de aprobación: 7/11/2024

