



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

VOLUMEN XIX | NÚMERO ESPECIAL | PUBLICACIÓN CONTINUA 2025



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

SPECIAL ISSUE

Latin**Food2024**

**11th Food Science,
Biotechnology & Safety Congress**
Asociación Mexicana de Ciencia de los Alimentos A.C.
MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE



EDITORES RESPONSABLES:

Dra. Esther Pérez-Carrillo

Dr. César Ozuna-López

Dra. Jazmín Leticia Tobías-Espinoza



Revista adherida a la
Declaración de San Francisco



Crossref



Latin**REV**
Red Latinoamericana de Revistas Académicas
en Ciencias Sociales y Humanidades



DORA



DOAJ



LOCKSS

MIAR

Matriz de Información para el
Análisis de Revistas



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias



Latin Food 2024

11th Food Science, Biotechnology & Safety Congress

Asociación Mexicana de Ciencias de los Alimentos A.C.

MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE

*Developing sustainable food systems as
a contribution to zero hunger*

TUXTLA GUTIÉRREZ

CHIAPAS

MÉXICO | NOVEMBER 13-15, 2024

Congress areas:

1. POSTHARVEST TECHNOLOGIES AND MINIMALLY PROCESSED FOODS.
2. TRADITIONAL AND ENDEMIC FOOD.
3. SUSTAINABLE FOOD PROCESS AND NOVEL TECHNOLOGIES.
4. FUNCTIONAL AND NUTRACEUTICAL FOODS.
5. HEALTH, NUTRITION, AND NUTRIGENOMICS.

Call for papers: 18 March to 30 June 2024.

Detailed information from 1 February 2024 on the official AMECA website.



UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



IBERO
PUEBLA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Universidad
Autónoma
de Coahuila

www.amecamex.mx

Save the date!!

membresia.ameca@gmail.com / amecaregistro@gmail.com

Proyecto
AMECA
+ CONAHCYT



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

Editores Responsables del Número Especial:

Dra. Esther Pérez-Carrillo

Dr. César Ozuna-López

Dra. Jazmín Leticia Tobías-Espinoza



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX No. Especial, 2025



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

TECNOCENCIA CHIHUAHUA (Vol. 19, Número Especial 2025). Es una publicación anual continua, editada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua. (C. Escorza núm. 900, Col. Centro, Chihuahua, Chihuahua, México. C.P. 31000) <https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnociencia>; tecnociencia.chihuahua@uach.mx Teléfono: (614) 4 39 18 22, ext. 2222. Editor responsable: Armando Quintero Ramos. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2018-070312595700-203. ISSN 1870-6606, ISSN-e: 2683-3360 otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dirección de Investigación y Posgrado.

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i4>

Todos los contenidos de TECNOCENCIA CHIHUAHUA se publican bajo la licencia de [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), y pueden ser usados gratuitamente para fines no comerciales, dando los créditos a los autores y a la revista, como lo establece esta licencia.



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX No. Especial, 2025



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Autoridades Institucionales

Mtro. Luis Alfonso Rivera Campos

Rector

**C.P. Jesús Ignacio
Rodríguez Bejarano**

Secretario General

**Lic. Martha Lorena Mier
Calderón**

Directora Académica

**Dr. Luis Carlos Hinojos
Gallardo**

*Director de Investigación y
Posgrado*

**L.A.E. Alberto Eloy
Espino Dickens**

Director Administrativo

**Dra. Ruth del Carmen
Grajeda González**

*Directora de Extensión y
Difusión Cultural*

**M.A.P. Marcela Herrera
Sandoval**

*Directora de Planeación y
Desarrollo Institucional*



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA
Revista de ciencia y tecnología

Equipo Editorial

Editor responsable

Dr. Armando Quintero Ramos, Universidad Autónoma de Chihuahua, México. (SNII III)

Asistente editorial

M.E.S. Nancy Karina Venegas Hernández, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Editores Asociados

Dr. Rubén Francisco González Laredo, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel III)

Dra. Luz Araceli Ochoa Martínez, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel II)

Dr. Gerardo Méndez Zamora, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. (SNII, Nivel I)



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX No. Especial, 2025

Comité Científico

Alimentos y biotecnología

Dr. Benjamín Ramírez Wong, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. (SNII, Nivel III).

Dr. José Alberto Gallegos Infante, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNII, Nivel III)

Dr. José Rafael Minjares-Fuentes, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México. (SNII, Nivel I)

Dra. María Marcela Rodríguez, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarría, Argentina.

Dra. Valeria Soledad Eim Iznardo, Universidad de las Islas Baleares, Islas Baleares, España.

Efrén Delgado, Ph.D., New Mexico State University, Las Cruces, NM. Estados Unidos de Norteamérica.

Dra. Elizabeth Carvajal Millán, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Hermosillo, Sonora, México. (SNII, Nivel III).

Dr. Fernando Martínez Bustos, CINVESTAV, Unidad Querétaro, Querétaro, México. (SNII, Nivel III)

Dr. José de Jesús Zazueta Morales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán México. (SNII, Nivel I)

Dra. Deborah Murowaniecki Otero, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahía, Brasil.

Dr. René Renato Balandrán Quintana, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (SNII, Nivel I)

Agricultura y Agropecuaria

Dr. Guillermo Fuentes Dávila, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

Dr. Víctor Arturo González Hernández, Colegio de Posgraduados. Estado de México, México (SNII, Nivel III)

Dra. Yolanda Salinas Moreno, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Departamento de Genética, México. (SNII, Nivel III)

Química y Recursos Naturales

Nadezhda Traycheva Petkova, PhD., University of Food Technologies, Technological Faculty, Department of Organic Chemistry and Inorganic Chemistry, Bulgaria.

Dra. Carmen Oralia Melendez Pizarro, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel II)

Dr. David Morales Morales, Universidad Nacional Autónoma de México (SNII, Nivel III).

Prasenjit Ghosh, Ph.D., Indian Institute of Technology Bombay: Mumbai, Maharashtra, IN

Dr. Johan Mendoza Chacón, Universidad Autónoma de Chihuahua (SNII, Nivel I)

Salud y Cultura Física

Dr. Julián Esparza Romero, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C (CIAD). Unidad Hermosillo, Sonora. México (SNII, Nivel II)

Dra. Jazmín Leticia Tobías Espinoza, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Candidato a Investigador)

Dra. Silvia Giono Cerezo, Instituto Politécnico Nacional. (SNII, Nivel II)

Dra. Susana Aideé González Chávez, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel II)

Dra. Mercedes Bermúdez Cortés, Universidad Autónoma de Chihuahua. (SNII, Nivel I)

Ingeniería

Dr. Francisco Paraguay Delgado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Chihuahua, México. (SNII, Nivel III)

Dr. Vladimir Villarreal Contreras, Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá

Dr. Humberto González Rodríguez, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. (SNII, Nivel II)

Dra. Melida Gutierrez, Missouri State University, Springfield, MO, USA.

Dr. Sergio Valle Cervantes, Instituto Tecnológico de Durango (SNII, Nivel I)

Tecnología

M.C. Ricardo Talamás Abbud, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México



Definición de la revista

TECNOCIENCIA CHIHUAHUA, es una revista multidisciplinaria, de publicación anual continua, que publica artículos y notas científicas, así como artículos de revisión originales e inéditos, en español e inglés, en formato electrónico de acceso abierto diamante.

El objetivo de *TECNOCIENCIA CHIHUAHUA* es divulgar los resultados y avances de investigación originales e inéditas en las áreas temáticas de Alimentos, Biológica, Salud, Agropecuaria, Cultura Física, Ingeniería y Tecnología, Química y Recursos Naturales, dirigidos a investigadores, académicos, estudiantes y público con interés científico.

El contenido científico y calidad de los artículos son evaluados a través de un proceso de arbitraje de forma anónima en la modalidad de doble ciego por al menos tres árbitros especializados en la materia.

La revista *TECNOCIENCIA CHIHUAHUA* es editada y financiada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. La revista está adherida a la Declaración de San Francisco a través de DORA (Declaration on Research Assessment) se encuentra indexada en portales especializados como DOAJ (Directory of Open Access Journals), ROAD (Directory of Open Access Scholarly Resources), MIAR (Matriz de Información para el Análisis de Revistas), Latindex 2.0, Periódica, LatinREV y en Redes Académicas como Biblat, Google Académico y Academia. La revista cuenta con el DOI (Digital Object Identifier) a través de la organización internacional Crossref.



Contenido

Alimentos

Improving kinetic model fitting for total titratable acidity in bananas using genetic algorithms e1847

Mejora del ajuste del modelo cinético de la acidez titulable total en bananos mediante algoritmos genéticos

Alejandro Kevin Méndez-Castillo, Elizabeth Contreras-López, Jesús Guadalupe Pérez-Flores, Laura García-Curiel, Emmanuel Pérez-Escalante, Karla Soto-Vega, Carlos Ángel-Jijón, Alicia Cervantes-Elizarrarás

Efecto de varios niveles de leche de coco (Coco nucífera) sobre la estabilidad fisicoquímica y aceptabilidad sensorial de un licor crema con pulpa de mango (Mangífera indica) e1848

Effect of various levels of coconut milk (Coco nucifera) on the physicochemical stability and sensory acceptability of a cream liqueur with mango pulp (Mangífera indica)

María Belén Barberán Hernández, Jordan Javier García Mendoza, José Patricio Muñoz Murillo, Steven Leonardo Proaño Conforme

Sustitución parcial con harina de garbanzo extrudida en galletas de harina de trigo para mejorar cantidad y calidad proteica e1917

Partial Substitution with Extruded Chickpea Flour in Wheat Flour Cookies to Improve Protein Quantity and Quality

Edgar Roberto Perez-Gaytan, Erick Heredia-Olea, Vicente Antonio Miron-Merida, Esther Perez Carrillo

Effect of incorporation of candelilla wax oleogel on the structural properties of cake-type bread e1919

Efecto de la incorporación de oleogel de cera de candelilla sobre las propiedades estructurales de pan tipo panqué

Gilda Avendaño-Vásquez, Bryan Ochoa-Martínez, Karen Aylin Vargas-García, Juan René González-Romero, Miguel Angel García-Muñoz, Elizabeth del Carmen Varela-Santos



Impacto de la sustitución parcial de harina de trigo refinada por harinas extruidas de grano entero de lenteja y sorgo rojo sobre la textura y composición proximal de galletas

e1980

Effect of using extruded whole lentil and sorghum flour on the texture and proximal composition of wheat biscuits

Sara Guajardo Flores, Erick Heredia Olea, Ana Antonieta Chew Guevara, Esther Pérez Carrillo

Agropecuaria

Comparación entre diferentes métodos de pretratamiento para la producción de azúcares fermentables a partir de rastrojo de amaranto

e1765

Comparison between different pretreatment methods to obtain fermentable sugars from amaranth stubble

María de Jesús García Gómez, Dalia Yvette Chávez Valerio, Oscar Núñez Gaona , Cirilo Nolasco Hipólito, Jesús Carrillo Ahumada

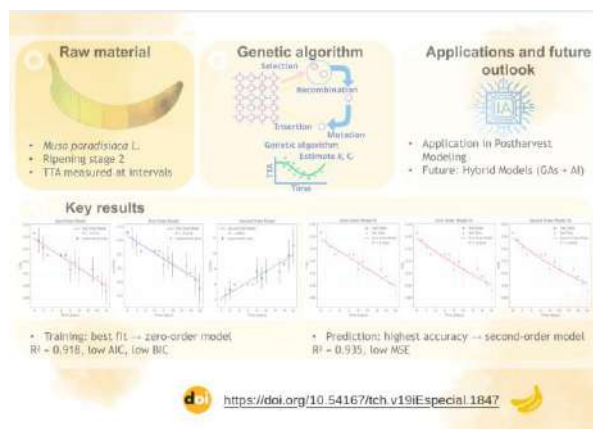


UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

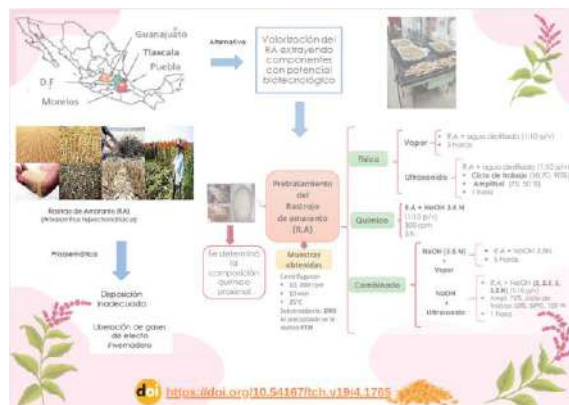
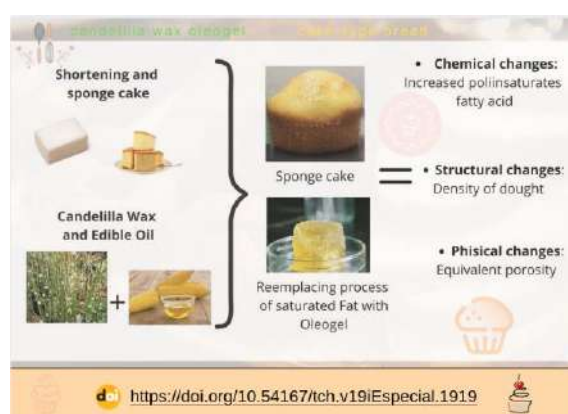
•

Vol. XIX No. Especial, 2025



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

•

Vol. XIX No. Especial, 2025

Improving kinetic model fitting for total titratable acidity in bananas using genetic algorithms

Mejora del ajuste del modelo cinético de la acidez titulable total en bananos mediante algoritmos genéticos

Alejandro Kevin Méndez-Castillo¹, Elizabeth Contreras-López¹, Jesús Guadalupe Pérez-Flores^{2,3*}, Laura García-Curiel², Emmanuel Pérez-Escalante¹, Karla Soto-Vega¹, Carlos Ángel-Jijón¹ y Alicia Cervantes-Elizarrarás³

¹ Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

² Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Circuito Ex Hacienda La Concepción S/N, Carretera Pachuca-Actopan, 42060 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

³ Área Académica de Nutrición, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Circuito Ex Hacienda La Concepción S/N, Carretera Pachuca-Actopan, 42060 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

*Corresponding author email: jesus_perez@uaeh.edu.mx (Jesús Guadalupe Pérez-Flores)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1847>

Recibido: 21 de febrero de 2025; Aceptado: 22 de mayo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. César Ozuna-López

Abstract

This research aimed to automate the fitting of kinetic models using genetic algorithms (GAs) to optimize the estimation of kinetic parameters—the reaction rate constant (k) and the initial value of total titratable acidity (TTA, C_0)—and enhance predictive accuracy. Experimental data were collected from bananas (*Musa paradisiaca* L.) at ripening stage 2 on Von Loesecke scale, measuring TTA at specific intervals, and three kinetic models—zero-order, first-order, and second-order—were fitted. For optimization, Python-based GA was used to minimize the mean squared error (MSE) and evaluate performance based on R^2 , AIC, and BIC. Results indicated that while the zero-order model provided the best statistical fit ($R^2 = 0.918$, lowest AIC and BIC), validation on unseen data favored the second-order model, which exhibited superior predictive accuracy (test $R^2 = 0.9349$, lowest test MSE). The integration of GAs enhanced the robustness of kinetic fitting by effectively navigating parameter space and avoiding local minima, outperforming traditional optimization methods, demonstrating their ability to refine parameter estimation and improve model generalization. Future

research should explore hybrid models that combine mechanistic kinetic equations with machine learning techniques (e.g., neural networks, or support vector regression), to better capture the biochemical processes underlying acidity changes in bananas.

Keywords: ripening kinetics, genetic algorithms, parameter estimation, post-harvest modeling, TTA decreasing, food quality.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo automatizar el ajuste de modelos cinéticos mediante algoritmos genéticos (AG) para optimizar la estimación de los parámetros cinéticos — constante de velocidad de reacción (k) y valor inicial de la acidez total titulable (ATT, C_0)—, y mejorar la precisión predictiva. Se obtuvieron datos de ATT de plátanos (*Musa paradisiaca* L.) en etapa 2 de maduración, según la escala de Von Loesecke, y se ajustaron los modelos cinéticos de orden cero, de primer y segundo orden. Se implementó AG en Python para minimizar el error cuadrático medio (MSE) y evaluar el desempeño en función de R^2 , AIC y BIC. Los resultados muestran mejor ajuste ($R^2 = 0.918$, menor AIC y BIC) en el modelo de orden cero, mientras que la validación con datos no vistos favoreció al de segundo orden ($R^2 = 0.9349$, menor MSE). La integración de AG mejoró la robustez del ajuste cinético, demostrando mejor estimación de parámetros y la generalización del modelo. Investigaciones futuras deberían explorar modelos que combinan ecuaciones cinéticas mecanicistas con técnicas de aprendizaje automático (por ejemplo, redes neuronales o regresión de vectores de soporte), para capturar mejor los procesos bioquímicos subyacentes a los cambios de acidez en plátanos.

Palabras clave: cinética de maduración, algoritmos genéticos, estimación de parámetros, modelado poscosecha, disminución de TTA, calidad de los alimentos.

1. Introduction

The kinetic analysis allows for monitoring and predicting food quality changes during storage, making it highly valuable in food research and industry. By using kinetic models to study parameters like total titratable acidity (TTA), scientists can quantify quality loss and establish shelf-life based on the degradation of food products (Contreras-López *et al.*, 2022; Poonnakasem *et al.*, 2018; Olivera *et al.*, 2013). These models effectively describe changes in texture and color in various foods, providing insights into degradation rates and the effects of environmental factors (Yang and Xu, 2021; Jaimez-Ordaz *et al.*, 2019). Additionally, integrating kinetic models with sensory evaluations and quality assessments enables the development of comprehensive tools for quality management, helping the industry meet regulatory standards and consumer expectations (Kaczmarek and Muzolf-Panek, 2021; Stangierski *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2018). This predictive capability ensures product quality, enhances consumer satisfaction, and supports the industry's commitment to safety, innovation, and sustainability by reducing postharvest losses and improving resource efficiency through informed decision-making. TTA, in particular, is a relevant quality indicator because it reflects changes in organic acid content. These changes influence flavor, freshness perception, and microbial stability and are directly associated with ripeness and senescence (Odediran *et al.*, 2023; De Souza *et al.*, 2022). However, despite the growing interest in

modeling quality changes in fruits, limited studies have focused on automating the parameter optimization process using genetic algorithms (GAs) specifically for titratable acidity kinetics in climacteric fruits. This study addresses this gap by presenting a replicable and structured computational framework for fitting kinetic models, applied to bananas as a representative system.

Bananas (*Musa sapientum* L.) are an excellent model for studying food systems due to their high perishability and the extensive biochemical changes they undergo during storage. As climacteric fruits, bananas continue ripening after harvest, with processes such as starch breakdown into simple soluble sugars and increased soluble pectin contributing to fruit softening and flavor enhancement (Dos Santos *et al.*, 2019; Kaka *et al.*, 2019; Zomo *et al.*, 2015). Organic acids, such as malic acid, fluctuate throughout the ripening process, initially increasing and subsequently declining as senescence approaches, which is closely linked to TTA (Gutierrez-Aguirre *et al.*, 2023; Coelho De Queiroz *et al.*, 2019), as malic acid—the predominant acid in bananas—is progressively metabolized through enzymatic decarboxylation and transamination reactions. During ripening, increased activity of enzymes such as NADP-malic enzyme and malate dehydrogenase contributes to malic acid degradation, reducing the total acid content and decreasing TTA (Zhou *et al.*, 2023; Onik *et al.*, 2019). These chemical transformations also involve changes in pH and Total Soluble Solids (TSS), both critical quality attributes during ripening. The gradual reduction in acidity, alongside an increase in TSS and sugar content, imparts the characteristic sweetness and flavor of ripe bananas, making them more appealing to consumers (Nguyen *et al.*, 2023; Aquino *et al.*, 2017; Zomo *et al.*, 2015). Additionally, the interplay between pH and the catalytic activity of cell wall enzymes can influence the fruit's texture, color, and stability during storage. Monitoring these biochemical changes—such as variations in pH, TSS, color, firmness, and TTA—allows for understanding ripening dynamics, optimizing postharvest treatments, and extending the shelf-life of bananas (Novita *et al.*, 2024; Dos Santos *et al.*, 2019).

Several studies have demonstrated that TTA is closely related to other physicochemical parameters during fruit ripening and storage. In bananas, TTA has shown a direct correlation with TSS during early ripening stages, and an inverse correlation with firmness and skin color development, reflecting progressive senescence (Coelho De Queiroz *et al.*, 2019; Aquino *et al.*, 2017). TTA also tends to decline after an initial increase, indicating metabolic transformations such as the conversion of organic acids and sugar accumulation. Similar relationships have been reported in other climacteric fruits, where TTA is inversely associated with pH and firmness, and directly with respiration rate and ethylene production (Odediran *et al.*, 2023). These correlations highlight the role of TTA as an integrative indicator of postharvest quality. Therefore, improving the prediction of TTA through kinetic modeling contributes to a better understanding of ripening dynamics in banana and similar fruit systems.

Performance metrics such as coefficient of determination (R^2), Mean Squared Error (MSE), Akaike Information Criterion (AIC), and Bayesian Information Criterion (BIC) are determinants for evaluating the quality of kinetic model fitting by balancing accuracy and simplicity. R^2 quantifies the variance explained by the model, with higher values indicating better fit (De-Graft H., 2017), while MSE measures the average squared residual error, with lower values reflecting improved accuracy (Collenteur, 2021). AIC and BIC, on the other hand, penalize model complexity to prevent overfitting, with AIC favoring models that balance fit and parameter usage and BIC imposing stricter penalties to promote simplicity (Hoekstra *et al.*, 2023; Corrales *et al.*, 2015). Together, these metrics ensure robust model selection, where R^2 and MSE assess goodness-of-fit, and AIC and BIC enhance

interpretability and generalizability. The integrated use of these criteria has been theoretically supported in model selection literature (Vrieze, 2012), and applied in food systems such as drying kinetics modeling (Souza *et al.*, 2019). More recently, their continued relevance has been demonstrated in predictive modeling and longitudinal data analysis across various disciplines (Hoekstra *et al.*, 2023; Zhang & Meng, 2023).

Kinetic models, including zero-order, first-order, and second-order, are frequently used in food science to understand and model quality product changes, allowing preservation optimization. Also, these models enable describing the flavor development and evaluating nutrient stability (Contreras-López *et al.*, 2022; Hazrat *et al.*, 2022; Buehler and Mesbah, 2016). While these models have broad applications, traditional parameter estimation methods like ordinary least squares (OLS) face limitations, including assumptions of error normality and challenges in parameter identifiability for nonlinear systems (Chai *et al.*, 2024; Manzhula *et al.*, 2024). Advanced techniques, such as Bayesian optimization, provide robust alternatives for addressing these challenges and improving model validation (Luciano and Svoboda, 2024; Taylor *et al.*, 2023; Jorayev *et al.*, 2022). These techniques have demonstrated significant predictive accuracy and efficiency advantages, particularly in systems with complex or non-linear behaviors. For instance, Bayesian optimization has been shown to reduce the number of required evaluations by over 90 % compared to grid or random search methods, while improving convergence toward optimal solutions (Taylor *et al.*, 2023). Additionally, in multi-objective optimization scenarios, Bayesian approaches have increased parameter estimation accuracy, such as conversion and yield in chemical processes, by up to 10–20 %, while reducing processing times by several hours (Jorayev *et al.*, 2022). These outcomes support the relevance of Bayesian optimization in enhancing the reliability and performance of predictive models in food and biological systems.

GAs are automated tools for kinetic model fitting in food science, offering advantages over traditional methods like ordinary least squares (OLS). Inspired by natural selection, GAs evolve populations of candidate solutions through operations such as selection, crossover, and mutation, iteratively optimizing model parameters based on a defined fitness function (Xu, 2022; Fischer *et al.*, 2021). Unlike gradient-based approaches, which are often limited by local minima and sensitivity to outliers such as OLS, GAs explore complex, multidimensional parameter spaces globally by maintaining diverse solution populations and evaluating multiple performance metrics simultaneously (Wrzecionek *et al.*, 2021; Turgut, 2018; Umbarkar *et al.*, 2015), ensuring a thorough search for the global optimum (Wrzecionek *et al.*, 2021; Zarejousheghani *et al.*, 2016). This robustness has enabled the successful application of GAs in modeling nonlinear and multistep reaction kinetics, including optimized kinetic parameters for enzymatic biodiesel production (Zarejousheghani *et al.*, 2016), and polycondensation and triglyceride epoxidation reactions (Kousaalya *et al.*, 2019).

In food-related applications, GAs have been used to optimize fermentation kinetics in cocoa processing, where they effectively estimated key parameters such as the maximum specific growth rate ($\mu_{\max}$) and saturation constants (K_s), yielding reliable predictions of metabolite production and supporting process scale-up and control (López-Pérez *et al.*, 2018). Additionally, they are increasingly applied in food engineering tasks such as thermal degradation modeling, drying optimization, and process control (Koop *et al.*, 2024). GAs have also been employed to model the polycondensation of citric acid with glycerol, a reaction relevant to developing edible coatings and biodegradable food packaging matrices. These examples highlight the flexibility and robustness of GAs in modeling complex reaction systems in food science (Wrzecionek *et al.*, 2021).

GAs and other predictive tools have been increasingly employed to model post-harvest changes' kinetics in climacteric and non-climacteric fruits under controlled temperatures. These methods help predict quality attributes, optimize storage protocols, and explore the genetic basis of post-harvest traits. Tools such as artificial neural networks, fuzzy logic, adaptive neuro-fuzzy inference systems, and GAs have been applied to model parameters like chilling injury, moisture loss, and firmness (Salehi, 2020). Predictive models have also distinguished ripening behaviors in melons and tracked changes in texture and physiology during storage (Tijskens *et al.*, 2008). In blueberries, GAs have supported breeding strategies by identifying traits linked to superior post-harvest quality (Casorzo *et al.*, 2024), while in barley, they have been used to monitor fungal development (Wawrzyniak, 2023). In climacteric fruits, strategies to delay ethylene-driven ripening have benefited from physiological, molecular, and computational approaches, reinforcing the utility of predictive modeling for quality control (Alonso-Salinas *et al.*, 2024). Altogether, these studies highlight the growing relevance of GAs and machine learning in post-harvest quality prediction across plant systems.

It is hypothesized that the automation of kinetic model fitting using genetic algorithms enables more efficient parameter estimation and allows for accurate modeling of TTA decreasing in bananas during post-harvest ripening.

Based on the above, this study aimed to model the decrease in TTA in bananas (*Musa paradisiaca* L.) by automating the fitting of zero-order, first-order, and second-order kinetic models. A Python script was developed to implement GAs, which optimized the kinetic parameters—initial TTA (C_0) and reaction rate constant (k)—by minimizing the MSE between experimental and predicted values. Model performance was assessed using R^2 , AIC, and BIC to explore a broader solution space and enhance the predictive capacity of kinetic analysis.

2. Materials and methods

2.1 Samples

The bananas (*Musa paradisiaca* L., Cavendish variety) used in this study were sourced from the central supply market of Pachuca de Soto, Hidalgo, Mexico. The fruits were selected based on visual uniformity (color and size), corresponding to ripening stage 2 of the Von Loesecke scale (Khodabakhshian and Baghbani, 2021), indicative of early post-harvest ripening, and were used without prior washing, peeling, or chemical treatment. The samples were transported to the laboratory in a tray without packaging or refrigeration, approximately five minutes after purchase.

2.2 Experimental conditions and storage setup

The experiment was conducted in the common-use laboratory of the Área Académica de Química at the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico. Whole, unpeeled bananas were placed directly on clean laboratory work tables, maintaining a 30 cm separation between fruits to promote adequate airflow and avoid physical contact. Although no specialized monitoring equipment was installed, ambient temperature and relative humidity were recorded using publicly available internet-based data corresponding to the study location. These environmental conditions averaged

21 ± 1 °C and 57 ± 1 % relative humidity throughout the 16-day storage period. While direct verification was not possible, the laboratory environment remained stable, and the primary objective focused on modeling TTA degradation, making the referenced data appropriate for contextualizing the storage conditions.

During the storage period, the fruits progressed naturally from ripening stage 2 to stages beyond 7 on the Von Loesecke scale. By the end of the 16-day period, the bananas exhibited brown to black peels, a very soft pulp and signs of fermentation, such as an alcoholic odor. These characteristics are consistent with late senescence under non-refrigerated conditions. Despite these advanced changes, TTA was successfully measured at all time points, enabling a continuous and reliable kinetic analysis throughout the study.

2.3 Total Titratable Acidity

The bananas' TTA was measured in triplicate at specific time intervals: days 0, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, and 16. These systematic measurements tracked changes in acidity over time, offering valuable insights into the ripening process.

TTA was determined by titration with 0.01 mol/L NaOH after macerating the samples in distilled water, following the procedure described in previous researches (García-Curiel *et al.*, 2023; Barreto Ferreira and Faria Freitas, 2019). The titration was performed using a 50 mL manual glass burette (PYREX®, Corning Inc., USA, 2020) held in place with a burette clamp on a universal stand. The Erlenmeyer flask (PYREX®, Corning Inc., USA, 2020) containing the sample and a magnetic stir bar was placed on a magnetic stirrer with hot plate (Thermo Scientific® Cimatec™+, Waltham, MA, USA, 2020), operating at 400 rpm to ensure constant mixing under ambient conditions. All volumetric glassware used was previously calibrated. The results were expressed as grams of malic acid per 100 grams of banana.

Although no separate reproducibility test was performed, all determinations were conducted under uniform laboratory conditions using the same equipment and operator, ensuring procedural consistency appropriate to the modeling scope of the study.

2.4. Kinetic modeling of total titratable acidity in bananas

2.4.1 Data preparation

The TTA data for bananas was collected and organized by time intervals. To ensure consistency and reliability, the TTA measurements for each time point were averaged, resulting in a representative dataset for kinetic modeling.

2.4.2 Kinetic models

Three kinetic models—zero-order, first-order, and second-order — were employed to describe the changes in TTA over time (Table 1). In these models, $Q(t)$ represents the critical quality attribute,

which is the TTA at time t (in days), while Q_0 denotes the initial TTA, and k is the rate constant characterizing the speed of the reaction (Contreras-López *et al.*, 2022). Each model was fitted to the averaged dataset using the OLS method.

The observed TTA values were compared with the predictions generated by each kinetic model through scatter plots of the experimental data overlaid with the corresponding model predictions. For the zero-order model (Eq. (1)), TTA was plotted directly against time. In contrast, the first-order model (Eq. (2)) used the natural logarithm of TTA ($\ln(Q(t))$) plotted against time, and the second-order model (Eq. (3)) represented the reciprocal of TTA ($1/Q(t)$) plotted against time.

Table 1. Kinetic models and their equations.

Tabla 1. Modelos cinéticos y sus ecuaciones.

Model	Mathematical expression	Eq.
Zero-order	$Q(t) = Q_0 - k \cdot t$	(1)
First-order	$\ln Q(t) = Q_0 \cdot e^{-k \cdot t}$	(2)
Second-order	$Q(t) = \frac{1}{1 + Q_0 \cdot k \cdot t}$	(3)

2.4.3 Model evaluation

The statistical summaries for each model were generated, including parameter estimates, standard errors, and goodness-of-fit metrics such as R^2 .

2.5. Automated optimization and evaluation of kinetic models

2.5.1. Data splitting and optimization

The data preparation was carried out as described earlier, following the steps for calculating TTA values from the experimental data. Subsequently, the kinetic models outlined in Table 1 described the TTA changes over time, forming the basis for parameter optimization and model evaluation.

The dataset was divided into training (80 %) and test (20 %) subsets using random splitting to ensure the robustness of the model evaluation process. The optimization of kinetic parameters, namely k (reaction rate constant) and Q_0 (initial TTA), was performed using a genetic algorithm implemented with the DEAP library in Python. This algorithm aimed to minimize the MSE between the observed and predicted TTA values. Initially, a population of candidate solutions, each representing potential values of k and Q_0 , was generated. The fitness of each individual was evaluated through an objective function based on the Eq. (4) (Dong *et al.*, 2017).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{observed,i} - Q_{predicted,i})^2 \quad \text{Eq. (4)}$$

Subsequently, genetic operators, including selection, crossover, and mutation, were iteratively applied to evolve the population over 100 generations or until convergence. This iterative process enabled the exploration of a vast parameter space, ensuring the identification of the optimal set of kinetic parameters for each model.

2.5.2. Model evaluation

The performance of each kinetic model was evaluated using multiple metrics to assess accuracy and complexity. The MSE was calculated to quantify the average squared difference between the observed (Q_{observed}) and predicted ($Q_{\text{predicted}}$) values, providing a measure of the model's prediction error (Eq. (4)).

The R^2 was used to measure the proportion of variance in the observed data explained by the model, indicating its goodness of fit. Higher values of R^2 suggested better predictive performance.

The AIC was also computed to evaluate the trade-off between model fit and complexity. It was calculated as described in Eq. (5) (Vaga *et al.*, 2014; Zhang and Meng, 2023).

$$AIC = n \cdot \ln(MSE) + 2 \cdot k \quad \text{Eq. (5)}$$

where n represents the number of data points, MSE is the mean squared error, and k is the number of parameters in the model.

The BIC was also calculated to incorporate the effect of sample size on model complexity. The BIC was calculated as described in Eq. (6) (Zhang and Meng, 2023; Brewer *et al.*, 2016).

$$BIC = n \cdot \ln(MSE) + k \cdot \ln(n) \quad \text{Eq. (6)}$$

These metrics allowed for a comprehensive and balanced evaluation of the models. While the MSE and R^2 assessed predictive accuracy, the AIC and BIC penalized unnecessary complexity (Brewer *et al.*, 2016; Corrales *et al.*, 2015). They ensured simpler models were favored for comparable accuracy and identified the most robust and efficient kinetic model for describing TTA dynamics.

The kinetic modeling and optimization procedures were implemented using the Python programming language (version 3.12.2) within the Visual Studio Code integrated development environment (IDE, version 1.96.2). Anaconda (version 25.1.1) was employed as the package and environment manager to ensure compatibility and reproducibility across dependencies. The analysis relied on several Python libraries: 'pandas' (2.2.3) for data handling, 'numpy' (1.26.4) for numerical operations, 'matplotlib' (3.9.1) and 'plotly' (5.22.0) for data visualization, 'scipy' (1.15.1) and 'statsmodels' (0.14.2) for statistical modeling, 'sklearn' (1.6.1) for model evaluation metrics, and 'deap' (1.4) for implementing genetic algorithms.

The analysis was performed on a personal computer running Linux Mint 22 "Wilma" (Ubuntu 24.04 base) with Cinnamon desktop environment (version 6.2.9) and kernel 6.8.0-58-generic, using a 64-bit x86_64 architecture and GCC compiler version 13.3.0. This configuration ensured the computational efficiency and reproducibility of the modeling and optimization processes.

The dataset, containing time and TTA values and the analysis scripts, will be publicly available on a GitLab repository (<https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/kinetic-analysis-banana>). This repository will enable interested researchers and practitioners to download, analyze, and implement the methodology for their studies or extend it to similar applications. This openness fosters transparency, reproducibility, and collaborative kinetic modeling and optimization advancements.

2.6 Comparative analysis of model performance

To evaluate the effectiveness of the GAs-based optimization in improving kinetic model fitting, a comparative analysis was performed between models fitted using traditional methods (Trad) and those optimized with GAs. Four performance metrics were analyzed: R^2 , AIC, and BIC.

Quantitative comparisons were conducted using percentage and absolute differences between the values obtained by each fitting method. The percentage improvement in model accuracy was assessed by changes in R^2 and MSE, calculated using Eqs. (7) - (9), as follows:

$$\% \Delta R^2 = \left(R_{GAs}^2 - \frac{R_{Trad}^2}{R_{Trad}^2} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\Delta AIC = AIC_{Trad} - AIC_{GAs} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\Delta BIC = BIC_{Trad} - BIC_{GAs} \quad \text{Eq. (8)}$$

3. Results and discussion

Fig. 1 presents the experimental data of TTA in bananas alongside the fitted curves for three kinetic models: zero-order, first-order, and second-order. The zero-order model, shown in the left panel, assumes a constant rate of TTA degradation over time, resulting in a linear decline in TTA. This model provides the best statistical fit, with an R^2 value of 0.918 and an adjusted R^2 of 0.910 (Table 2). It exhibits the lowest AIC (-104.0) and BIC (-102.9), indicating that it is the most parsimonious model. The estimated rate constant (k) is -0.0024 day^{-1} , suggesting a steady and uniform decrease in TTA regardless of its initial concentration. This behavior, visible as a straight line in Fig. 1a, is characteristic of zero-order kinetics and reflects a linear behavior, where the rate of change remains constant over time. In this context, it suggests that the overall decrease in acidity, as reflected by TTA, proceeds at a uniform rate regardless of the fruit's evolving biochemical composition.

The first-order model, shown in the middle panel, follows an exponential decay function, assuming that the rate of change in TTA is proportional to its current value. This model also shows a strong fit, with an R^2 of 0.913 and an adjusted R^2 of 0.905. However, its AIC (-47.67) and BIC (-46.54) values are higher than those of the zero-order model, suggesting that it may be less efficient in explaining

the observed variability. The estimated rate constant (k) is -0.0204 day^{-1} , indicating a more rapid decline in TTA at the beginning of storage. As seen in Figure 1b, this behavior reflects a dynamic in which the processes contributing to acidity loss are initially more active and gradually slow down, as expected in a first-order process. The enzymatic conversion of organic acids such as malic or citric acid into sugars or intermediate metabolites during ripening may explain this trend. Previous studies have shown that enzymes like malate dehydrogenase are transcriptionally regulated throughout ripening and contribute to the decline in TTA as part of a coordinated metabolic shift (García-Gómez *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2018; González-Agüero *et al.*, 2016).

The second-order model, presented in the right panel, was fitted using the inverse of TTA against time. Although this model achieves a relatively high R^2 value of 0.899, it has the weakest fit among the three, as indicated by the lowest adjusted R^2 (0.890). Furthermore, its AIC (10.13) and BIC (11.26) are higher than those of the other models, making it the least suitable for describing TTA degradation in bananas from a statistical standpoint. The positive rate constant ($k = 0.1744 \text{ day}^{-1}$) suggests a nonlinear behavior in which the decrease in TTA progressively slows over time. This deceleration may reflect a cumulative or saturable pattern of acidity loss, potentially associated with the gradual depletion of acid-related compounds and the downregulation of metabolic activity involved in acid transformation. Although the model does not provide the best fit, its structure may be indicative of a more complex physiological process. This interpretation is supported by studies in climacteric fruits such as peach, mango, and tomato, which have shown that the decline in TTA during ripening slows as a result of both substrate depletion and reduced activity of organic acid-related enzymes (X. Jiang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2019; Batista-Silva *et al.*, 2018; Rooban *et al.*, 2016).

On the whole, the comparison of model performance indicates that the zero-order model best represents the experimental data, supported by the highest R^2 , the lowest AIC and BIC values, and a consistent linear trend. Although the first-order model also shows a good fit, its higher information criteria values suggest a less parsimonious description of the observed TTA changes. The second-order model, despite offering a biologically plausible framework for complex degradation dynamics, demonstrated a weaker statistical fit and higher prediction uncertainty. Therefore, a zero-order kinetic model appears to provide the most appropriate and statistically robust representation of titratable acidity degradation in bananas during ripening under the evaluated conditions. However, to improve the precision of parameter estimation and overcome potential limitations associated with traditional fitting methods, GAs were employed.

The experimental TTA values obtained in this study (ranging from 0.45 to 0.90 g of malic acid per 100 g of banana) are consistent with those reported in previous studies on climacteric fruits. For instance, a comparable decline in malic acid content during postharvest storage of bananas under physical treatments has been reported (Zhou *et al.*, 2023), while TTA values between 0.60 and 1.20 g of malic acid per 100 g of pulp have been documented for 'Maçã' bananas stored at room temperature (Dos Santos *et al.*, 2019). These comparisons support the physiological plausibility of the observed data and validate the modeling approach applied in this study.

Table 2. Kinetic model comparison for total titratable acidity.**Tabla 2.** Comparación de modelos cinéticos para la acidez total titulable.

Model	R ²	Adjusted R ²	F-statistic	AIC	BIC	Intercept (C ₀)	Rate constant (k)
Zero Order	0.918	0.91	122.6	-104	-102.9	0.1385	-0.0024
First Order	0.913	0.905	114.9	-47.67	-46.54	-1.9699	-0.0204
Second Order	0.899	0.89	98.28	10.13	11.26	7.1008	0.1744

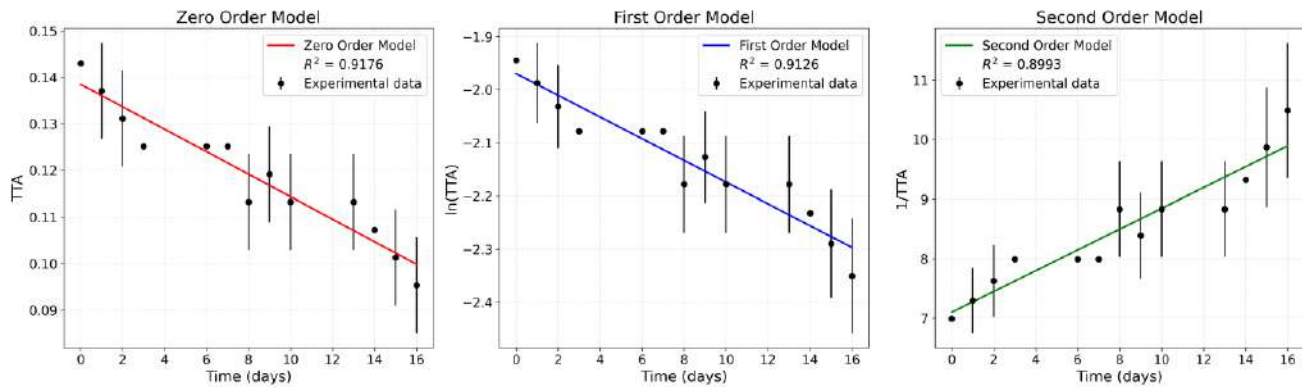
**Figure 1.** Kinetic model fitting for total titratable acidity (TTA) in bananas using classical models. TTA: Total titratable acidity, expressed as g of malic acid per 100 g of banana. Error bars represent the standard deviation of three replicates.

Figura 1. Ajuste del modelo cinético para la acidez titulable total (TTA) en plátanos utilizando modelos clásicos. TTA: Acidez titulable total, expresada como g de ácido málico por 100 g de plátano. Las barras de error representan la desviación estándar de tres réplicas.

Fig. 2 shows the predictive performance of three kinetic models—zero-order, first-order, and second-order fitted to the TTA in bananas using genetic algorithms. This provides a more reliable assessment of model generalization, avoiding over-fitting to the training data. The left panel represents the zero-order model, which maintains a linear decline in TTA with a train R² of 0.9120 and a test R² of 0.9126. Despite exhibiting a low MSE in the training set (1.1874×10^{-5}), its test MSE increases to 2.6915×10^{-5} , suggesting a slight decrease in predictive accuracy (Table 3).

The middle panel presents the first-order model, where the decay follows an exponential trend. This model demonstrates improved predictive performance, with a test R² of 0.9246, outperforming the zero-order model in predictive capacity. The test MSE decreases to 2.3204×10^{-5} , further supporting its higher predictive reliability. Additionally, the first-order model has a slightly higher AIC (-108.5263) and BIC (-107.9211) than the zero-order model, indicating a modest increase in model complexity without significant over-fitting.

The right panel illustrates the second-order model with the highest test R² (0.9349) and the lowest test MSE (2.0029×10^{-5}), indicating that it provides the best predictive performance among the three

models. Although its train R^2 (0.8933) is slightly lower than the other models, the improved test results suggest better generalization. However, its AIC (−107.4819) and BIC (−106.8768) are higher than those of the zero- and first-order models, indicating that this model is statistically less parsimonious despite its predictive strength.

These results highlight the importance of train-test validation when evaluating kinetic models for decreasing TTA. This step allows the model's generalization ability to be assessed beyond the dataset used for calibration. Without this step, a model may exhibit excellent statistical fit (e.g., high R^2 , low AIC) but fail to predict unseen data reliably, potentially leading to over-fitting and poor real-world applicability. In this study, validation revealed that although the zero-order model fitted the training data best, the second-order model showed superior predictive performance, emphasizing the need for this evaluation step (Sivakumar *et al.*, 2024; Pandey *et al.*, 2020). The initial analysis (Fig. 1) suggested that a zero-order kinetic model best represented TTA loss. However, when tested on unseen data, the second-order model demonstrated superior predictive performance. This indicates that the degradation of TTA may follow a more complex mechanism than a simple linear or exponential decay, warranting further exploration of higher-order or mechanistic models.

Table 3. Predictive performance of kinetic models for total titratable acidity.

Tabla 3. Rendimiento predictivo de modelos cinéticos para la acidez total titulable.

Model	Train MSE	Test MSE	AIC	BIC	Train R^2	Test R^2	Optimized k	Optimized C_0
Zero Order	1.1874×10^{-5}	2.6915×10^{-5}	−109.4115	−108.8064	0.912	0.9126	0.0024	0.1372
First Order	1.2973×10^{-5}	2.3204×10^{-5}	−108.5263	−107.9211	0.9039	0.9246	0.02	0.1382
Second Order	1.4401×10^{-5}	2.0029×10^{-5}	−107.4819	−106.8768	0.8933	0.9349	0.167	0.1391

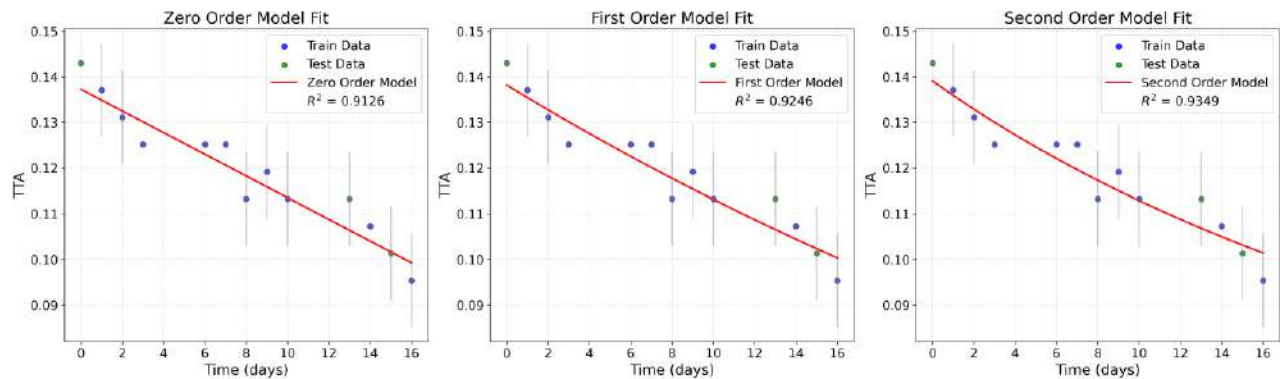


Figure 2. Kinetic model fits for total titratable acidity (TTA) in bananas using genetic algorithms: Training and test data. TTA: Total titratable acidity, expressed as g of malic acid per 100 g of banana. Error bars represent the standard deviation of three replicates.

Figura 2. Ajustes del modelo cinético para la acidez titulable total (TTA) en plátanos mediante algoritmos genéticos: datos de entrenamiento y prueba. TTA: Acidez titulable total, expresada como g de ácido málico por 100 g de plátano. Las barras de error representan la desviación estándar de tres réplicas.

The results in Figs. (1) and (2) emphasize the necessity of selecting an appropriate kinetic model to describe the decreasing of TTA in bananas. While the zero-order model initially exhibited the best statistical fit based on R^2 , AIC, and BIC values (Fig. 1), its predictive performance on unseen data was lower than that of the other models, as indicated by an increase in test MSE (2.6915×10^{-5}) (Table 3), which suggests that although the zero-order model is parsimonious, it may not fully capture the complexity of TTA degradation.

The first-order model demonstrated improved predictive performance, with a higher test R^2 (0.9246) and a lower test MSE (2.3204×10^{-5}) than the zero-order model, indicating that an exponential decay assumption better reflects the initial decline in TTA. However, the second-order model achieved the best predictive results, with the highest test R^2 (0.9349) and the lowest test MSE (2.0029×10^{-5}), suggesting that the degradation process involves more complex mechanisms. Nevertheless, its higher AIC and BIC values indicate an increased model complexity that may limit its practical application.

To quantify the improvement achieved through GAs-based optimization, a comparative analysis was conducted using R^2 , AIC, and BIC values from the traditional and optimized models. The first-order model showed the most significant increase in explanatory power, with a 1.27 % increase in R^2 (from 0.913 to 0.9246), while the second-order model exhibited a 3.99 % improvement (from 0.899 to 0.9349). Although the R^2 of the zero-order model decreased slightly by 0.59 % (from 0.918 to 0.9126), it still retained strong performance.

In terms of model parsimony, all three models showed clear improvements after optimization. The AIC was reduced by 5.41, 60.86, and 117.61 units for the zero-, first-, and second-order models, respectively. Similarly, the BIC values were lowered by 5.91, 61.38, and 118.14 units, confirming that GA optimization enhanced the balance between model fit and complexity across all models.

Among the models evaluated using GAs optimization, the second-order model yielded the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.9349$) and the lowest MSE on the test data, suggesting that its nonlinear structure better captured the dynamics of TTA decline over time. This is also evident in Fig. 2, where the fitted curve for the second-order model closely follows the experimental points throughout the ripening period.

The kinetic parameters obtained in this study, particularly the initial TTA ($C_0 = 0.1391$ g of malic acid/100 g) and the rate constant for the second-order model ($k = 0.167 \text{ day}^{-1}$), fall within the ranges reported in previous studies on banana ripening under ambient conditions. For instance, titratable acidity values ranging from 0.60 to 1.20 g of malic acid per 100 g of pulp have been documented for 'Maçã' bananas (Dos Santos *et al.*, 2019), while values between 0.34 and 0.73 % have been reported for different banana cultivars depending on ripening stage (Aquino *et al.*, 2017). Additionally, acidity values in 'Prata Anã' bananas showed similar declining patterns during storage at $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Aquino *et al.*, 2017). The observed decrease in acidity in these studies aligns with the nonlinear decay pattern captured by the second-order model in this work. These similarities support the physiological plausibility of the fitted model and reinforce the value of GAs-based parameter optimization for capturing complex postharvest transformations in climacteric fruits.

Results highlight the advantages of GAs in kinetic fitting, as they facilitate a more robust exploration of the parameter space and mitigate local minima issues associated with traditional methods like OLS (Lei *et al.*, 2018; Zarejousheghani *et al.*, 2016). The ability of GAs to optimize multiple

performance metrics, including R^2 , MSE, AIC, and BIC, provides a comprehensive framework for model selection (Xue *et al.*, 2023). Furthermore, their automated nature enhances efficiency and reproducibility, allowing for a systematic evaluation of complex kinetic models without extensive manual intervention (Chakrabarti *et al.*, 2013).

The observed discrepancy between statistical fit and predictive performance underscores the necessity of train-test validation in kinetic modeling. While the zero-order model may appear optimal based on training data, its reduced accuracy in test predictions suggests it oversimplifies the degradation process. Conversely, despite its greater complexity, the second-order model provides a more accurate representation of TTA degradation, reinforcing the need for robust optimization techniques like GAs to improve parameter estimation reliability (Razdan *et al.*, 2023).

Thus, integrating GAs in kinetic modeling enhances parameter estimation accuracy and model reliability. Although the zero-order model remains a practical option due to its simplicity, the predictive superiority of the second-order model suggests that TTA degradation follows a more intricate mechanism. Future studies could explore hybrid or mechanistic models to refine this understanding, leveraging GAs' adaptability to gain deeper insights into food degradation kinetics.

From a chemical perspective, while a zero-order kinetic model accurately describes the observed TTA degradation in the dataset, a second-order approach may better capture the underlying biochemical complexities when applied to unseen data. This discrepancy suggests that the apparent linear decline in TTA could arise from the interplay of multiple biochemical processes, which, when analyzed individually, exhibit nonlinear behavior. Banana ripening is a complex process driven by various biochemical reactions, including the degradation of organic acids, influenced by factors such as enzymatic activity, cellular respiration, and ethylene production (Zhou *et al.*, 2023; Thakur *et al.*, 2019).

Enzymatic activity plays a central role in TTA decreasing, with malic enzymes facilitating the breakdown of malic acid, the predominant organic acid in bananas (Zhou *et al.*, 2023). This contributes to the overall decline in acidity, particularly in the early stages of ripening. Ethylene, an autocatalytic hormone, further accelerates acid degradation by regulating the transcription of genes associated with organic acid metabolism, including those coding for malate dehydrogenase and NADP-malic enzyme (Wei *et al.*, 2023; Cordenunsi-Lysenko *et al.*, 2019). Additionally, ethylene modulates other ripening-related processes such as starch-to-sugar conversion, softening, and changes in pigment synthesis, all of which influence the biochemical environment in which acid degradation occurs. Cellular respiration also consumes organic acids to generate energy, reducing TTA levels and reinforcing the link between ripening intensity and acidity loss (Ton Nu and Kobayashi, 2020). Together, these factors suggest that the degradation process is not strictly linear, but rather results from multiple overlapping reactions operating at different rates throughout ripening. The superior predictive performance of the second-order model in validation tests reinforces the idea that TTA decreasing follows a more intricate pattern, consistent with a dynamic and evolving metabolic context (X. Jiang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2019).

While the experimental data's statistical analysis is a zero-order kinetic model for TTA degradation in bananas, predictive validation suggests that a second-order approach may better represent the biochemical processes' complexity. Further studies incorporating mechanistic models or hybrid approaches may provide deeper insights into the dynamic changes in acidity during banana ripening.

Integrating GAs into kinetic modeling refines parameter estimation and broadens the applicability of predictive models in food science. By leveraging these advanced optimization techniques, researchers can develop more robust models that account for variability in storage conditions and biochemical interactions (Zhong and Tian, 2011). Future research should explore combining data-driven machine-learning methods with mechanistic models to enhance predictive accuracy and adaptability (Kousaalya *et al.*, 2019). Such advancements will contribute to more effective post-harvest management strategies, ultimately improving food quality and reducing economic losses in the industry (Zhong and Tian, 2011).

These results underscore the methodological contribution of this study. Although genetic algorithms (GAs) have been previously applied in food-related modeling tasks, such as optimizing parameters in reaction kinetics or enhancing classification accuracy (Nirere *et al.*, 2023; Ozbuyukkaya *et al.*, 2021; Rivera *et al.*, 2020), to date, no studies have been found that focus on their application to model acidity changes in climacteric fruits. In this study, the use of GAs led to improved fitting of the kinetic models, particularly in the second-order model, where the predictive R^2 increased to 0.9349 and the AIC and BIC values decreased significantly compared to traditional methods. These improvements align with the broader literature that highlights the ability of GAs to explore complex parameter spaces and reduce prediction error in non-linear systems. Thus, the present results contribute novel evidence supporting the integration of GAs in postharvest acidity modeling and reinforce their potential for improving the reliability of kinetic predictions in perishable fruit systems.

4. Conclusion

This study successfully automated the fitting of kinetic models to describe TTA degradation in bananas using GAs. Among the three evaluated models, the zero-order kinetic model exhibited the best statistical fit on training data ($R^2 = 0.9120$; AIC = -109.41; BIC = -108.81). However, test validation revealed that the second-order model achieved superior predictive performance (test $R^2 = 0.9349$; test MSE = 2.00×10^{-5}), suggesting that the degradation process follows a more complex mechanism than initially assumed.

These results emphasize the value of train-test validation to avoid overfitting and highlight the ability of GAs to enhance parameter estimation and generalization in food kinetic modeling. Despite the promising results, the study is limited by the scope of the data (single temperature, fixed ripening stage, and no cross-validation), which could be addressed in future studies.

Future research should consider expanding the experimental design to include varying temperature and humidity conditions, extended storage periods, and larger datasets to improve model robustness and generalizability. Additionally, although this study was conceptual and methodological, focused on developing a replicable optimization framework, the practical usefulness of the GA-optimized models could be further strengthened through experimental validation using independent samples or external post-harvest conditions. Future work should also explore hybrid modeling approaches, such as those combining mechanistic kinetic equations with machine learning techniques (e.g., neural networks or support vector regression), better to capture the biochemical processes underlying banana acidity changes. Moreover, applying this methodology to other perishable fruits or complementary biochemical quality markers, such as texture, soluble

solids, or vitamin degradation, represents a promising avenue for advancing postharvest quality modeling and supporting data-driven decision-making in the food industry.

Acknowledgments

The authors thank the Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-CONAHCyT) and the Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) for supporting this research. They also dedicate this work to the memory of Engineer Cástulo Pérez Cabañas (1960–2005), whose legacy continues to inspire.

Conflict of Interest statement

The authors declare no conflicts of interest.

5. References

- Alonso-Salinas, R., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., & Acosta-Motos, J. R. (2024). Strategies to Delay Ethylene-Mediated Ripening in Climacteric Fruits: Implications for Shelf Life Extension and Postharvest Quality. *Horticulturae*, 10(8): 840. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080840>
- Aquino, C. F., Salomão, L. C. C., Cecon, P. R., Siqueira, D. L. D., & Ribeiro, S. M. R. (2017). Physical, Chemical and Morphological Characteristics of Banana Cultivars Depending on Maturation Stages. *Revista Caatinga*, 30(1): 87–96. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n110rc>
- Bao, Y., Zhou, Z., Lu, H., Luo, Y., & Shen, H. (2013). Modelling quality changes in Songpu mirror carp (*Cyprinus carpio*) fillets stored at chilled temperatures: Comparison between Arrhenius model and log-logistic model. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(2): 387–393. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03200.x>
- Batista-Silva, W., Nascimento, V. L., Medeiros, D. B., Nunes-Nesi, A., Ribeiro, D. M., Zsögön, A., & Araújo, W. L. (2018). Modifications in Organic Acid Profiles During Fruit Development and Ripening: Correlation or Causation? *Frontiers in Plant Science*, 9: 1689. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01689>
- Brewer, M. J., Butler, A., & Cooksley, S. L. (2016). The relative performance of AIC, AICC and BIC in the presence of unobserved heterogeneity. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(6): 679–692. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12541>
- Buehler, E. A., & Mesbah, A. (2016). Kinetic Study of Acetone-Butanol-Ethanol Fermentation in Continuous Culture. *PLOS ONE*, 11(8): e0158243. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158243>
- Casorzo, G., Ferrão, L. F., Adunola, P., Tavares Flores, E., Azevedo, C., Amadeu, R., & Munoz, P. R. (2024). Understanding the genetic basis of blueberry postharvest traits to define better breeding strategies. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 14(9): jkae163. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae163>
- Chai, K., Xia, W., Shen, R., Luo, G., Cheng, Y., Su, W., & Su, A. (2024). Optimization of heterogeneous continuous flow hydrogenation using FTIR inline analysis: A comparative study of multi-objective

- Bayesian optimization and kinetic modeling. *Chemistry*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-m0kf5>
- Chakrabarti, A., Miskovic, L., Soh, K. C., & Hatzimanikatis, V. (2013). Towards kinetic modeling of genome-scale metabolic networks without sacrificing stoichiometric, thermodynamic and physiological constraints. *Biotechnology Journal*, 8(9): 1043–1057. <https://doi.org/10.1002/biot.201300091>
- Coelho De Queiroz, L. G., Oliveira De Jesus, M., Aguiar, F. S., Paraizo, E. A., Soares, M. D. C., Da Silva Pinheiro, J. M., Mizobutsi, G. P., Mendes Rodrigues, M. L., & Santos, T. C. (2019). Influence of Different ‘Prata-Anã’ Banana Bunch Ages on Post-Harvest Quality. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1–14. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v36i130227>
- Collenteur, R. A. (2021). How Good Is Your Model Fit? Weighted Goodness-of-Fit Metrics for Irregular Time Series. *Groundwater*, 59(4): 474–478. <https://doi.org/10.1111/gwat.13111>
- Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., Ugarte-Bautista, I., Ramírez-Godínez, J., González-Olivares, L. G., García-Curiel, L., & Pérez-Flores, J. G. (2022). Use of image analysis to determine the shelf-life of an apple compote with wine. *Food Science and Technology*, 42, e04122. <https://doi.org/10.1590/fst.04122>
- Cordenunsi-Lysenko, B. R., Nascimento, J. R. O., Castro-Alves, V. C., Purgatto, E., Fabi, J. P., & Peroni-Okyta, F. H. G. (2019). The Starch Is (Not) Just Another Brick in the Wall: The Primary Metabolism of Sugars During Banana Ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10: 391. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00391>
- Corrales, J. D., Munilla, S., & Cantet, R. J. C. (2015). Polynomial order selection in random regression models via penalizing adaptively the likelihood. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 132(4): 281–288. <https://doi.org/10.1111/jbg.12130>
- De Souza, F. G., De Araújo, F. F., Orlando, E. A., Rodrigues, F. M., Chávez, D. W. H., Pallone, J. A. L., Neri-Numa, I. A., Sawaya, A. C. H. F., & Pastore, G. M. (2022). Characterization of Buritirana (*Mauritiella armata*) Fruits from the Brazilian Cerrado: Biometric and Physicochemical Attributes, Chemical Composition and Antioxidant and Antibacterial Potential. *Foods*, 11(6): 786. <https://doi.org/10.3390/foods11060786>
- De-Graft H., A. (2017). The Effect of Outliers on the Performance of Akaike Information Criterion (AIC) and Bayesian Information Criterion (BIC) in Selection of an Asymmetric Price Relationship. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 65(5): 32–37. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2017-05.05>
- Dong, F., Zhang, Y., & Yang, J. (2017). Attention-based Recurrent Convolutional Neural Network for Automatic Essay Scoring. Proceedings of the 21st Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLL 2017), 153–162. <https://doi.org/10.18653/v1/K17-1017>
- Dos Santos, E. X., Santana, P. J. A., Diniz, A. C. C., Sanches, A. G., & Cordeiro, C. A. M. (2019). Postharvest technologies in the ripening of ‘Maçã’ bananas stored in ambient condition. *Amazonian Journal of Plant Research*, 3(1): 290–297. <https://doi.org/10.26545/ajpr.2019.b00036x>
- Fischer, S. H., De Oliveira, J. A. A., Mumford, J. D., & Kell, L. T. (2021). Using a genetic algorithm to optimize a data-limited catch rule. *ICES Journal of Marine Science*, 78(8): 3013–3014. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab070>

- Gao, L., Zhao, S., Lu, X., He, N., Zhu, H., Dou, J., & Liu, W. (2018). Comparative transcriptome analysis reveals key genes potentially related to soluble sugar and organic acid accumulation in watermelon. *PLOS ONE*, 13(1): e0190096. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190096>
- García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2023). Anthocyanin content prediction in frozen strawberry puree. *Italian Journal of Food Science*, 35(2): 88–97. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i2.2315>
- García-Gómez, B. E., Salazar, J. A., Nicolás-Almansa, M., Razi, M., Rubio, M., Ruiz, D., & Martínez-Gómez, P. (2020). Molecular Bases of Fruit Quality in Prunus Species: An Integrated Genomic, Transcriptomic, and Metabolic Review with a Breeding Perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1): 333. <https://doi.org/10.3390/ijms22010333>
- González-Agüero, M., Tejerina Pardo, L., Zamudio, M., Contreras, C., Undurraga, P., & Defilippi, B. (2016). The Unusual Acid-Accumulating Behavior during Ripening of Cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) is Linked to Changes in Transcription and Enzyme Activity Related to Citric and Malic Acid Metabolism. *Molecules*, 21(5): 398. <https://doi.org/10.3390/molecules21050398>
- Guo, Z., Ge, X., Yu, Q. L., Han, L., Zhao, H., & Cao, H. (2018). Quality predictive models for bovine liver during storage and changes in volatile flavors. *International Journal of Food Properties*, 21(1): 2452–2468. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1522330>
- Gutierrez-Aguirre, B. R., Llave-Davila, R. E., Olivera-Montenegro, L. A., Herrera-Nuñez, E., & Marzano-Barreda, L. A. (2023). Effect of Potassium Permanganate as an Ethylene Scavenger and Physicochemical Characterization during the Shelf Life of Fresh Banana (*Musa paradisiaca*). *International Journal of Food Science*, 2023: 1–7. <https://doi.org/10.1155/2023/4650023>
- Hazrat, M. A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., Silitonga, A. S., Fattah, I. M. R., & Mahlia, T. M. I. (2022). Kinetic Modelling of Esterification and Transesterification Processes for Biodiesel Production Utilising Waste-Based Resource. *Catalysts*, 12(11): 1472. <https://doi.org/10.3390/catal12111472>
- Hoekstra, R. H. A., Epskamp, S., Nierenberg, A., Borsboom, D., & McNally, R. J. (2023). Testing similarity in longitudinal networks: The Individual Network Invariance Test (INIT). *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/ugs2r>
- Jaimez-Ordaz, J., Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., González-Olivares, L. G., Añorve-Morga, J., & Contreras-López, E. (2019). Kinetic parameters of lipid oxidation in third generation (3G) snacks and its influence on shelf-life. *Food Science and Technology*, 39(1): 136–140. <https://doi.org/10.1590/fst.38917>
- Jiang, W., Zhang, M., He, J., & Zhou, L. (2004). Regulation of 1-MCP-Treated Banana Fruit Quality by Exogenous Ethylene and Temperature. *Food Science and Technology International*, 10(1): 15–20. <https://doi.org/10.1177/1082013204042189>
- Jiang, X., Liu, K., Peng, H., Fang, J., Zhang, A., Han, Y., & Zhang, X. (2023). Comparative network analysis reveals the dynamics of organic acid diversity during fruit ripening in peach (*Prunus persica* L. Batsch). *BMC Plant Biology*, 23(1): 16.
- Jorayev, P., Russo, D., Tibbetts, J. D., Schweidtmann, A. M., Deutsch, P., Bull, S. D., & Lapkin, A. A. (2022). Multi-objective Bayesian optimisation of a two-step synthesis of p-cymene from crude sulphate turpentine. *Chemical Engineering Science*, 247: 116938. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116938>

- Kaczmarek, A., & Muzolf-Panek, M. (2021). Prediction of Thiol Group Changes in Minced Raw and Cooked Chicken Meat with Plant Extracts—Kinetic and Neural Network Approaches. *Animals*, 11(6): 1647. <https://doi.org/10.3390/ani11061647>
- Kaka, A. K., Kumar, E. A., Ibupoto, K. A., Chattha, A. H., Soomro, S. A., Mangio, H. U. R., Junejo, S. A., Soomro, A. H., Khaskheli, S. G., & Kaka, S. K. (2019). Effect of hot water treatments and storage period on the quality attributes of banana (*Musa sp.*) fruit. *Pure and Applied Biology*, 7(4). <https://doi.org/10.19045/bspab.2018.700195>
- Khodabakhshian, R., & Baghbani, R. (2021). Classification of bananas during ripening using peel roughness analysis—An application of atomic force microscopy to food process. *Journal of Food Process Engineering*, 44(11): e13857. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13857>
- Koop, L., Ramos, N. M. D. V., Bonilla-Petriciolet, A., Corazza, M. L., & Voll, F. A. P. (2024). A Review of Stochastic Optimization Algorithms Applied in Food Engineering. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024: 1–31. <https://doi.org/10.1155/2024/3636305>
- Kousaalya, A. B., Beyene, S. D., Ayalew, B., & Pilla, S. (2019). Epoxidation Kinetics of High-Linolenic Triglyceride Catalyzed by Solid Acidic-Ion Exchange Resin. *Scientific Reports*, 9(1): 8987. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45458-8>
- Lei, Z., Zhang, Y., & Cui, P. (2018). Investigate the kinetics of coke solution loss reaction with an alkali metal as a catalyst based on the improved genetic algorithm. *International Journal of Coal Science & Technology*, 5(4): 430–438. <https://doi.org/10.1007/s40789-017-0176-z>
- López-Pérez, P. A., Cuervo-Parra, J. A., Robles-Olvera, V. J., Del C Rodriguez Jimenes, G., Pérez España, V. H., & Romero-Cortes, T. (2018). Development of a Novel Kinetic Model for Cocoa Fermentation Applying the Evolutionary Optimization Approach. *International Journal of Food Engineering*, 14(5–6): 20170206. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0206>
- Luciano, G., & Svoboda, R. (2024). Simulation and non-linear optimization of kinetic models for solid-state processes. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 32(3): 035014. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ad2788>
- Manzhula, V., Dyvak, M., & Zabchuk, V. (2024). The Improved Method for Identifying Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems. *International Journal of Computing*, 23(1): 19-25. <https://doi.org/10.47839/ijc.23.1.3431>
- Mírian L. F. Freitas & T. H. B. F. (2019). Production, physical, chemical and sensory evaluation of dried banana (*Musa cavendish*). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 31(2):102–108. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i2.1912>
- Nguyen, V. P., Tran, H. X. N., & Phan, T. L. K. (2023). Effect of pre-treatments on qualities and storage life of banana dried by using solar dryer dome. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1155(1): 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1155/1/012020>
- Nirere, A., Sun, J., Kama, R., Atindana, V. A., Nikubwimana, F. D., Dusabe, K. D., & Zhong, Y. (2023). Nondestructive detection of adulterated wolfberry (*Lycium Chinens*) fruits based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, 46(4): e14293. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14293>

- Novita, M., Husna, N. E., & Alfiana, D. (2024). The Use of Chitosan and Beeswax Coatings on Berangan Banana (*Musa paradisiaca*) in Different Maturity Stages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1290(1): 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1290/1/012049>
- Odediran, A., Yu, J., & Gu, S. (2023). The effect of layers of high tunnel covering and soil mulching on tomato fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(14): 7176–7186. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12805>
- Olivera, D. F., Bambicha, R., Laporte, G., Cárdenas, F. C., & Mestorino, N. (2013). Kinetics of colour and texture changes of beef during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4): 821–825. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0885-7>
- Onik, J. C., Xie, Y., Duan, Y., Hu, X., Wang, Z., & Lin, Q. (2019). UV-C treatment promotes quality of early ripening apple fruit by regulating malate metabolizing genes during postharvest storage. *PLOS ONE*, 14(4): e0215472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215472>
- Ozbuyukkaya, G., Parker, R. S., & Veser, G. (2022). Determining robust reaction kinetics from limited data. *AIChE Journal*, 68(3): e17538. <https://doi.org/10.1002/aic.17538>
- Pandey, S. K., Rathee, D., & Tripathi, A. K. (2020). Software defect prediction using K-PCA and various kernel-based extreme learning machine: An empirical study. *IET Software*, 14(7): 768–782. <https://doi.org/10.1049/iet-sen.2020.0119>
- Poonnakasem, N., Laohasongkram, K., Chaiwanichsiri, S., & Prinyawiwatkul, W. (2018). Changes in physicochemical properties and starch crystallinity of sponge cake containing HPMC and extra virgin coconut oil during room temperature storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(5): e13600. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13600>
- Razdan, N. K., Lin, T. C., & Bhan, A. (2023). Concepts Relevant for the Kinetic Analysis of Reversible Reaction Systems. *Chemical Reviews*, 123(6): 2950–3006. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00510>
- Rivera, E. C., Summerscales, R. L., Tadi Uppala, P. P., & Kwon, H. J. (2020). Electrochemiluminescence Mechanisms Investigated with Smartphone-Based Sensor Data Modeling, Parameter Estimation and Sensitivity Analysis. *ChemistryOpen*, 9(8): 854–863. <https://doi.org/10.1002/open.202000165>
- Rooban, R., Shanmugam, M., Venkatesan, T., & Tamilmani, C. (2016). Physiochemical changes during different stages of fruit ripening of climacteric fruit of mango (*Mangifera indica* L.) and non-climacteric of fruit cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Journal of Applied and Advanced Research*, 1(2): 53–58. <https://doi.org/10.21839/jaar.2016.v1i2.27>
- Salehi, F. (2019). Recent Advances in the Modeling and Predicting Quality Parameters of Fruits and Vegetables during Postharvest Storage: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 20(3): 506–520. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1653810>
- Sivakumar, M., Parthasarathy, S., & Padmapriya, T. (2024). Trade-off between training and testing ratio in machine learning for medical image processing. *PeerJ Computer Science*, 10: e2245. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2245>
- Souza, D. G., Resende, O., Moura, L. C. D., Ferreira Junior, W. N., & Andrade, J. W. D. S. (2019). Drying Kinetics of the Sliced Pulp of Biofortified Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.). *Engenharia Agrícola*, 39(2): 176–181. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n2p176-181/2019>
- Stangierski, J., Weiss, D., & Kaczmarek, A. (2019). Multiple regression models and Artificial Neural Network (ANN) as prediction tools of changes in overall quality during the storage of spreadable

- processed Gouda cheese. *European Food Research and Technology*, 245(11): 2539–2547. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03369-y>
- Taylor, C. J., Felton, K. C., Wigh, D., Jeraal, M. I., Grainger, R., Chessari, G., Johnson, C. N., & Lapkin, A. A. (2023). Accelerated Chemical Reaction Optimization Using Multi-Task Learning. *ACS Central Science*, 9(5): 957–968. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c00050>
- Thakur, R., Pristijono, P., Bowyer, M., Singh, S. P., Scarlett, C. J., Stathopoulos, C. E., & Vuong, Q. V. (2019). A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *LWT*, 100: 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.055>
- Tijskens, L. M. M., Dos Santos, N., Obando-Ulloa, J. M., Moreno, E., Schouten, R. E., García-Mas, J., Monforte, A. J., & Fernández-Trujillo, J. P. (2008). First Attempts of Linking Modelling, Postharvest Behaviour and Melon Genetics. *Acta Horticulturae*, 802: 401–408. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.802.53>
- Ton Nu, P. T., & Kobayashi, T. (2020). Nylon-6–Mordenite Composite Membranes for Adsorption of Ethylene Gas Released from Chiquita Bananas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(17): 8212–8222. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06149>
- Turgut, H. (2018). Artificial Intelligence Algorithms Inspired By Life Sciences. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 5(3): 1233–1238. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.471300>
- Umbarkar, A. J., Joshi, M. S., & Sheth, P. D. (2015). Dual Population Genetic Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(2): 34–40. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.02.05>
- Vaga, S., Bernardo-Faura, M., Cokelaer, T., Maiolica, A., Barnes, C. A., Gillet, L. C., Hegemann, B., Van Drogen, F., Sharifian, H., Klipp, E., Peter, M., Saez-Rodriguez, J., & Aebersold, R. (2014). Phosphoproteomic analyses reveal novel cross-modulation mechanisms between two signaling pathways in yeast. *Molecular Systems Biology*, 10(12): 767. <https://doi.org/10.15252/msb.20145112>
- Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: A discussion of the differences between the Akaike information criterion (AIC) and the Bayesian information criterion (BIC). *Psychological Methods*, 17(2): 228–243. <https://doi.org/10.1037/a0027127>
- Wawrzyniak, J. (2023). Predictive Assessment of Mycological State of Bulk-Stored Barley Using B-Splines in Conjunction with Genetic Algorithms. *Applied Sciences*, 13(9): 5264. <https://doi.org/10.3390/app13095264>
- Wei, W., Yang, Y., Wu, C., Kuang, J., Chen, J., Lu, W., & Shan, W. (2023). MaMADS1–MaNAC083 transcriptional regulatory cascade regulates ethylene biosynthesis during banana fruit ripening. *Horticulture Research*, 10(10): uhad177. <https://doi.org/10.1093/hr/uhad177>
- Wrzecionek, M., Matyszczyk, G., Bandzerewicz, A., Ruśkowski, P., & Gadomska-Gajadhur, A. (2021). Kinetics of Polycondensation of Citric Acid with Glycerol Based on a Genetic Algorithm. *Organic Process Research & Development*, 25(2): 271–281. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.0c00492>
- Xu, T. (2022). Reflection on Randomness from an Interdisciplinary Perspective. SHS Web of Conferences, 148: 02001. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214802001>
- Xue, H., Qi, T., Su, W., Wu, K.-J., & Su, A. (2023). Heterogeneous Continuous Flow Hydrogenation of Hexafluoroacetone Trihydrate and Its Kinetic Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, acs.iecr.3c00291. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00291>

- Yang, J., & Xu, Y. (2021). Prediction of fruit quality based on the RGB values of time–temperature indicator. *Journal of Food Science*, 86(3): 932–941. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15518>
- Zarejousheghani, F., Kariminia, H., & Khorasheh, F. (2016). Kinetic modelling of enzymatic biodiesel production from castor oil: Temperature dependence of the Ping Pong parameters. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(3): 512–517. <https://doi.org/10.1002/cjce.22408>
- Zhang, Y., & Meng, G. (2023). Simulation of an Adaptive Model Based on AIC and BIC ARIMA Predictions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2449(1): 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2449/1/012027>
- Zhao, X., Yuan, X., Chen, S., Fu, D.-Q., & Jiang, C.-Z. (2019). Metabolomic and Transcriptomic Analyses Reveal That a MADS-Box Transcription Factor TDR4 Regulates Tomato Fruit Quality. *Frontiers in Plant Science*, 10: 792. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00792>
- Zhong, W., & Tian, Z. (2011). Application of Genetic Algorithm in Chemical Reaction Kinetics. *Applied Mechanics and Materials*, 79: 71–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.79.71>
- Zhou, X., Cheng, J., Sun, J., Guo, S., Guo, X., Chen, Q., Wang, X., Zhu, X., & Liu, B. (2023). Effect of Red Visible Lighting on Postharvest Ripening of Bananas via the Regulation of Energy Metabolism. *Horticulturae*, 9(7): 840. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070840>
- Zomo, S. A., Ismail, S. M., Jahan, M. S., Kabir, K., & Kabir, M. H. (2015). Chemical Properties and Shelf Life of Banana (*Musa sapientum* L.) as Influenced by Different Postharvest Treatments. *The Agriculturists*, 12(2): 06–17. <https://doi.org/10.3329/agric.v12i2.21725>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Efecto de varios niveles de leche de coco (*Coco nucífera*) sobre la estabilidad fisicoquímica y aceptabilidad sensorial de un licor crema con pulpa de mango (*Mangífera indica*)

Effect of various levels of coconut milk (*Coco nucífera*) on the physicochemical stability and sensory acceptability of a cream liqueur with mango pulp (*Mangífera indica*)

**María Belén Barberán-Hernández¹, Jordan Javier García-Mendoza^{1,2*},
José Patricio Muñoz-Murillo^{1,2}, Steven Leonardo Proaño-Conforme¹**

¹ Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Agrociencias. Chone, Ecuador

² Grupo de Investigación: Industrialización de Productos y Subproductos Agroindustriales "IPSA",
Facultad de Agrociencias Universidad Técnica de Manabí. Chone, Ecuador

*Correspondencia: Correo electrónico: jgarcia4408@utm.edu.ec (Jordan Javier García-Mendoza)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1848>

Recibido: 20 de febrero de 2025; Aceptado: 10 de junio de 2015

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Esther Pérez-Carrillo

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la estabilidad fisicoquímica y sensorial de un licor crema a base de mango y leche de coco. Se utilizó un diseño completamente al azar, el factor en estudio correspondió a las concentraciones de leche de coco al 5, 10 y 15 %. Se analizó parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, sensoriales y de estabilidad (pH, viscosidad, densidad, sólidos solubles, grado alcohólico, acidez). Se trabajó con pruebas de comparación múltiple de Dunnett y Kruskal Wallis al 5 % de significancia. Se demostró significancia en los parámetros fisicoquímicos de; azúcares reductores entre $264,37 \pm 2,84$ - $311,61 \pm 0,63$ g/L; grasa $0,52 \pm 0,00$ - $0,58 \pm 0,01$ %; proteína soluble $28,90 \pm 0,36$ - $93,84 \pm 0,12$ mg/mL. Todos los tratamientos fueron microbiológicamente aceptables. A nivel sensorial los atributos sabor, color, textura y apariencia general presentaron un $p < 0,05$ %, al contrario, la variable aroma presentó un $p > 0,05$ %. La formulación 10 % leche de coco en licor crema a base de mango fue la que mejor estabilidad fisicoquímica presentó en las variables

densidad, sólidos solubles y grado alcohólico. Todos los tratamientos cumplieron con los requisitos microbiológicos y fisicoquímicos exigidos en la normativa INEN 1837.

Palabras clave: crema, coco, estabilidad, licor, mango.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the physicochemical and sensory stability of a cream liqueur based on mango and coconut milk. A completely randomized design was used, the factor under study corresponded to the concentrations of coconut milk at 5, 10 and 15 %. Physicochemical, microbiological, sensory and stability parameters (pH, viscosity, density, soluble solids, alcohol content, acidity) were analyzed. Multiple comparison tests of Dunnett and Kruskal Wallis were used at 5 % significance. Significance was demonstrated in the physicochemical parameters of; reducing sugars between 264.37 ± 2.84 - 311.61 ± 0.63 g/L; fat 0.52 ± 0.00 - 0.58 ± 0.01 %; Soluble protein 28.90 ± 0.36 - 93.84 ± 0.12 mg/mL. All treatments were microbiologically acceptable. At the sensory level, the attributes flavor, color, texture and general appearance presented a $p < 0.05$ %, on the contrary, the aroma variable presented a $p > 0.05$ %. The 10 % coconut milk in mango-based cream liqueur formulation was the one that presented the best physicochemical stability in the variables density, soluble solids and alcohol content. All treatments met the microbiological and physicochemical requirements demanded by the INEN 1837 regulation.

Keywords: cream, coconut, stability, liquor, mango

1. Introducción

Los licores de crema son productos con una concentración mínima de alcohol 15 % vol., en su composición se incluyen diversos componentes como, azúcar, aguardiente, base láctea (leche evaporada – condensada – crema de leche) aditivos alimentarios artificiales, conservantes, emulsionantes y estabilizadores (Bozhko *et al.*, 2019). Según la norma INEN 1837 (2016) es una bebida de consistencia viscosa que tiene un contenido de sacarosa mayor a 251 g por litro. Este tipo de licor tradicionalmente es elaborado con whisky irlandés (Bileys Irish Cream), sin embargo, también se utilizan otros aguardientes u alcoholes como el ron, vodka y pisco, además, estas bebidas pueden tener sabor a café, chocolate y frutas por lo que su ingesta resulta muy agradable. No obstante, existe escasa información sobre la combinación de frutas tropicales en la producción de licor crema.

Una de las frutas tropicales con gran aceptación es el mango, el cual en Ecuador durante el año 2016 alcanzó una producción de 18.000 hectáreas (ha), especialmente en las zonas costeras, con un rendimiento estimado de 82.246 toneladas. Según la Organización Ecuatoriana del Mango, el cultivo de esta fruta abarca una superficie de unas 7.700 hectáreas, principalmente variedades de exportación. Esta zona comprende principalmente la provincia del Guayas, de la cual el 84 % se dedica a la exportación. Otras provincias productoras de mango son: Azuay, Carchi, Imbabura, El Oro, Los Ríos y Manabí (Guerrero, 2018).

La pulpa de mango se puede consumir en madurez o inmadurez, aunque la mayor parte de la fruta se come fresca y con la pulpa se puede preparar una amplia gama de alimentos, puede ser enlatado, congelado como concentrado, triturado, deshidratado, mínimamente procesado o preparado como

jugos y mermeladas, es una de las frutas tropicales de agradable sabor y aroma, posee un alto valor nutricional, siendo rica en agua, azúcares, fibra, minerales, vitaminas y otros fitoquímicos (Torres *et al.*, 2016). Además, proporciona energía, fibra dietética, carbohidratos, proteínas, grasas, pigmento carotenoides, polifenoles, ácidos grasos poliinsaturados, provitamina A, betacaroteno y compuestos fenólicos que son vitales en el crecimiento, desarrollo y salud de los seres humanos (Masud, 2016; Jahurul *et al.*, 2015).

Por otra parte, el cocotero (*Cocos nucifera* L.) pertenece a la familia de las Arecaceae (Pham, 2016), su cultivo se extiende a más de 200 países, entre ellos Islas de Asia, América Latina, el Caribe y África tropical (Rocha *et al.*, 2022). En el Ecuador, las zonas de mayor producción de cocotero son tres provincias de la costa (Esmeraldas, Manabí, Guayas) y una de la sierra (Loja). Esmeraldas es la provincia que cuenta con mayor producción de esta nucifera, con el 77,26 % de las hectáreas sembradas, seguida de Manabí con el 18,72 % (Cuesta, 2021).

El coco es un alimento que contiene dos endospermos distintos; uno en forma líquida llamado agua y la forma sólida denominado núcleo (carne – pulpa) (Manivannan *et al.*, 2018). Entre las propiedades de la fruta (endospermo sólido) destacan varios fitoconstituyentes como polifenoles, contenido de fibra cruda, grasa, calorías, enzimas, proteínas y vitaminas, su consumo previene diversas enfermedades como las cardiovasculares, además, posee propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antibacterianas, antifúngica, y antivirales (Rajendran *et al.*, 2021).

De acuerdo con Dussán *et al.* (2017) el mango es un alimento altamente perecedero, y al existir sobreproducción y poca demanda, se generan desperdicios, pérdidas económicas, y problemas ambientales, además, de acuerdo con durante su almacenamiento se pierde alrededor del 20 % al 30 % de la producción antes de llegar al consumidor final. Respecto al coco, esta fruta es de vital importancia económica ya que es fuente de ingresos para los agricultores que se dedican a este cultivo, sin embargo, en la provincia de Manabí, cantón Rocafuerte, luego de extraer el endospermo líquido, la parte sólida (pulpa) es consumida de forma natural, en dulces, helados o jugos, siendo su exceso descartado por la falta de valor agregado.

De acuerdo a lo anterior, se deben buscar nuevas alternativas de aprovechamiento que permitan la ingesta de mango y leche de coco de importancia para la salud humana. Desde el punto de vista industrial y tecnológico el licor crema es una excelente opción de transformación agroindustrial para la incorporación de estas materias primas, ya que en su gran mayoría estos productos son elaborados con fuentes artificiales y no de alimentos naturales, además, existe poca evidencia científica sobre el estudio de este tipo de producto. Por lo tanto, en esta investigación se planteó evaluar la estabilidad fisicoquímica y aceptabilidad sensorial de un licor crema a base de mango con leche de coco.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización del experimento

La investigación se llevó a cabo en la Facultad de Agrociencias, Universidad Técnica de Manabí. El producto experimental se desarrolló en el Laboratorio de Procesos Agroindustriales en el área de Frutas/hortalizas, mientras que, los análisis fisicoquímicos, microbiológicos, y de

estabilidad del licor crema se realizaron en los Laboratorios de Bioquímica y Microbiología. Respecto al análisis de aceptabilidad sensorial, se ejecutó en el Laboratorio de Análisis Sensorial de Alimentos.

2.2. Materias primas

La pulpa de mango (variedad Tommy Atkins), endospermo sólido de coco y demás materias primas (leche evaporada, leche condensada, azúcar) se obtuvieron en el supermercado gran Akí ubicado en el cantón Chone, provincia de Manabí. Para la base alcohólica se trabajó con Vodka Ruso Negro con una graduación de alcohol del 15 % (Vol).

2.3. Unidad experimental

La unidad experimental (U.E) se conformó por 4000 ml de licor crema a base de mango. Los niveles de leche de coco se obtuvieron en relación a la U.E. La base láctea estuvo compuesta por 2200 ml (35 % leche evaporada + 20 % leche condensada). La base alcohólica fue de 720 ml de Vodka (tabla 1).

Tabla 1. Formulación de los tratamientos en estudio de licor crema a base de mango/leche de coco.

Table 1. Formulation of the treatments under study of cream liqueur based on mango/coconut milk.

	T0		T1		T2		T3	
Materias primas e isumos	%	g	%	g	%	g	%	g
Niveles de leche de coco								
Leche de coco	0,00	0,00	5,0	200,0	10,0	400,0	15,0	600,0
Ingredientes constantes								
Pulpa de mango	20,0	800,0	20,0	800,0	20,0	800,0	20,0	800,0
Leche evaporada	35,0	1400,0	35,0	1400,0	35,0	1400,0	35,0	1400,0
Leche condensada	20,0	800,0	20,0	800,0	20,0	800,0	20,0	800,0
Sacarosa	6,0	240,0	6,0	240,0	6,0	240,0	6,0	240,0
Alcohol	18,0	720,0	18,0	720,0	18,0	720,0	18,0	720,0
CMC	1,0	40,0	1,0	40,0	1,0	40,0	1,0	40,0
Total	100,0	4000,0	100,0	4000,0	100,0	4000,0	100,0	4000,0

2.4. Procedimiento experimental

Leche de coco

Se receptaron frutos de coco en buenas condiciones de calidad sin presencia de golpes o daños mecánicos, se continuó con el respectivo desinfectado en una solución de hipoclorito de sodio a 20 ppm (para eliminar algún rastro de polvo e impurezas). Seguido se tomó un cuhillo de acero inoxidable y se procedió a retirar parte de la cáscara verde del coco, luego se realizó la inserción de un abridor de coco de acero inoxidable marca Willbond, este proceso consistió en realizar un orificio

en la parte superior del coco para extraer el endospermo líquido, posteriormente, mediante el uso de un cuchillo de acero inoxidable se cortó el fruto en cuatro partes para su posterior extracción del endospermo sólido mediante el uso de un cuchillo raspador de carne de coco marca The Coconut Tool.

Obtenido el endospermo sólido se procedió a eliminar la testa (película marrón que se adhiere a la pulpa de coco cuando se retira de la corteza), este proceso se realizó de forma manual mediante el uso de un cuchillo de acero inoxidable. La pulpa se cortó en trozos pequeños y luego para su posterior refinado se añadieron en una licuadora industrial de acero inoxidable (marca Metvisa con capacidad de 19 litros) durante 5 minutos (se añadió 2000 g de pulpa de coco + 4000 ml de agua), posteriormente la mezcla se tamizó en un colador de acero inoxidable (en este proceso se separan las partículas sólidas del coco) obteniéndose una leche de coco sin sedimentos, el producto fue envasado en envases de vidrio con capacidad de 4000 ml previamente esterilizados y se continuó con el almacenamiento en refrigeración hasta su posterior utilización.

Licor crema a base de mango y leche de coco

Para la elaboración del licor crema, primero se realizó una base láctea la cual consistió en diluir la leche evaporada y condensada en un recipiente de acero inoxidable, el proceso se desarrolló mediante agitación constante por un tiempo de tres minutos, posteriormente, de acuerdo a los tratamientos establecidos en la tabla 1, a la base láctea se le añadió la leche de coco y pulpa de mango previamente refinada, se continuó mezclando durante diez minutos.

La mezcla de base láctea más fruta y leche de coco se llevó a una temperatura inicial de 50 °C para luego añadir el estabilizante carboximetilcelulosa (CMC) junto con la sacarosa, posteriormente se pasteurizó la mezcla durante 30 minutos a temperatura de 60 °C (este proceso se realizó en una cocina industrial, y se controló la temperatura con un termómetro industrial para alimentos con sonda de acero inoxidable de 14,5 con un rango entre -50 °C hasta 300 °C). Seguido se dejó en refrigeración por 24 horas, luego se realizó un tamizado con el fin de retener partículas sólidas de grasa que se hallan generado durante el reposo.

Posteriormente, en una olla de acero inoxidable con capacidad de 10 litros, se realizó una homogenización entre la base láctea más frutas junto con la base alcohólica (Vodka), este proceso se llevó a cabo durante un tiempo de 15 minutos en agitación constante. Luego se realizó el envasado del producto experimental en botellas de vidrio previamente esterilizadas con capacidad de 250 ml. El almacenado del licor crema a base de mango y leche de coco se realizó en una cámara frigorífica a temperatura de 4 °C.

2.5. Análisis de laboratorio

Propiedades físicoquímicas y microbiológicas del licor crema

En base a los requisitos exigidos en la norma de referencia NTE INEN 1837:2016 para licor crema, se determinaron las propiedades fisicoquímicas mediante los siguientes análisis: azúcares reductores (NTE INEN 358), grasa (NTE INEN 012) y proteína soluble (método de ensayo,

Espectrofotométrico/Biuret). La calidad microbiológica en los licores crema se determinó por medio de los siguientes análisis microbiológicos: aerobios mesófilos (NTE INEN 1529-5), coliformes (NTE INEN 1529-6), *E. coli* (NTE INEN 1529-8), mohos y levaduras (NTE INEN 1529-10).

Estabilidad fisicoquímica del licor crema

En los tratamientos en estudio de licor crema a base de mango y leche de coco se analizó la estabilidad fisicoquímica durante 50 días, tomando muestras desde el día 0 cada 10 días. Los análisis evaluados fueron los siguientes: pH (NTE INEN-ISO 1842), viscosidad (método de ensayo Instrumental/Viscosímetro rotacional), densidad (NTE INEN 11), sólidos solubles (NTE INEN 380), contenido alcohólico (NTE INEN 340) y acidez (NTE INEN 341).

2.6. Análisis de aceptabilidad sensorial en licor crema

Para el análisis de aceptabilidad sensorial del licor crema a base de mango y leche de coco, se contó con la participación de 70 catadores no entrenados, a los cuales se les facilitó las muestras en vasos transparentes, codificadas y en orden aleatorio más un test hedónico con escala de 7 puntos, siendo 1: me disgusta mucho, 2: me disgusta moderadamente, 3: me disgusta poco, 4: ni me gusta – ni me disgusta, 5: me gusta poco, 6: me gusta moderadamente y 7: me gusta mucho, además, se les entregó a los jueces un vaso con agua para el respectivo enjuague bucal entre muestras. Los catadores evaluaron en términos de calidad los atributos de respuesta: aroma, sabor, color, textura y apariencia general.

2.7. Diseño experimental y análisis de datos

En el estudio propuesto se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial, con tres réplicas por tratamiento. El factor en estudio (A) correspondió a las diferentes concentraciones de leche de coco al 5, 10 y 15 %. Se obtuvieron un total de 12 unidades experimentales incluida la formulación control (tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos en estudio.

Table 2. Treatments under study.

Tratamientos	Símbolo	Código	Factor A (%)	Réplicas
Control	T ₀	A ₀	0,0	3
1	T ₁	A ₁	5,0	3
2	T ₂	A ₂	10,0	3
3	T ₃	A ₃	15,0	3

Para el análisis de datos, se trabajó con el software estadístico Minitab 18. Se aplicó análisis de varianza y se determinó la significancia estadística entre los tratamientos en estudio al 5 % de significancia y 95 % de confianza. Se utilizó una prueba de Dunnett para determinar la magnitud de diferencia entre el tratamiento control frente a los tratamientos con factor en estudio. La prueba de

Kruskal Wallis se aplicó a los parámetros de perfil sensorial con un nivel de significancia del 5 % y 95 % de confianza. Los datos se interpretaron en media $\pm$ desviación estándar.

3. Resultados y discusión

3.1. Características fisicoquímicas del licor crema

En la tabla 3 se detallan los resultados de análisis de varianza para las características fisicoquímicas del licor crema a base mango y leche de coco, se determinó que todas las variables presentaron significancia estadística ($p < 0,05$ %), posteriormente se aplicó la prueba de Dunnett para cada parámetro (azúcares reductores, grasa, proteína soluble).

Tabla 3. Resultados de análisis de varianza en el perfil fisicoquímico del licor crema.

Table 3. Results of variance analysis on the physicochemical profile of cream liquor.

Parámetros fisicoquímicos	T0	T1	T2	T3	Sig.
Azúcares reductores (g/L)	311,61 $\pm$ 0,63 ^A	304,424 $\pm$ 0,61	289,09 $\pm$ 0,15	264,37 $\pm$ 2,84	0,000
Grasa (%)	0,52 $\pm$ 0,00 ^A	0,54 $\pm$ 0,02 ^A	0,56 $\pm$ 0,01	0,58 $\pm$ 0,01	0,000
Proteína soluble (mg/mL)	28,90 $\pm$ 0,36 ^A	40,73 $\pm$ 0,28	54,63 $\pm$ 0,27	93,84 $\pm$ 0,12	0,000

Las medias no etiquetadas con la letra A son significativamente diferentes de la media del nivel de control.

Media $\pm$ desviación estándar, n=3.

Azúcares reductores

De acuerdo a los resultados, se logró verificar que, a medida que aumentan los niveles de leche de coco en la bebida, los azúcares reductores disminuyen, esto se puede deber a que la leche de coco en su composición no presenta cantidades significativas de azúcares reductores, así lo demuestran Colina *et al.* (2018) quienes determinaron un contenido de 5,10 % de este compuesto en leche a partir de endospermo sólido de coco. La formulación T3 con 264,37 $\pm$ 2,84 g/L fue el tratamiento con menor contenido de azúcares reductores lo cual podría influir en un sabor menos dulce, mientras que, el T0 fue el que presentó mayor valor, sin embargo, todas las formulaciones presentaron valores dentro de lo exigido en la norma de referencia NTE INEN 1837 (2016) la cual establece un mínimo de 251 g/L en licor crema, garantizando así el cumplimiento de los estándares de calidad para este tipo de producto, al contrario, Corcino *et al.* (2014) demostraron un resultado inferior de 8,72 g en licor a base melocotón, lo que probablemente se deba a la composición de azúcares de la materia prima base utilizada en su elaboración.

Grasa

La formulación T1 (5 % LC) no presentó significancia estadística frente al control, no obstante, las formulaciones T2 (10 % LC) y T3 (15 % LC) si fueron significativamente diferentes frente al tratamiento T0 (0% LC). La ausencia de significancia estadística en T1 frente al control sugiere que

la concentración de leche de coco en esta formulación no generó un cambio considerable en el contenido de grasa. Por otro lado, las diferencias significativas observadas en T2 y T3 indican que las mayores proporciones de leche de coco en estas formulaciones tuvieron un impacto notable en el contenido graso del licor crema, eso se debe a que el coco en su composición presenta niveles de grasa considerables, los cuales según Colina *et al.* (2018) se mantienen en la leche de coco presentando hasta un 20 % de grasa. Los resultados presentes en este estudio, demostraron que el T0 fue el tratamiento con un contenido de grasa menor ($0,52 \pm 0,00$ %), y con mayor valor el T3 ($0,58 \pm 0,01$ %), valores superiores del 10 % de leche de coco en fórmula pueden generar un aumento significativo de grasa en el licor crema. Estos resultados se encuentran relacionados con los expuestos por Ríos *et al.* (2019) quienes lograron determinar un contenido graso entre 0,78 – 1,53 % en licor crema con pasta de coco + pisco + leche condensada.

Proteína soluble

Se determinó que, a medida que aumentan las concentraciones de leche de coco, los niveles de proteína soluble aumentaron significativamente en las formulaciones con factor en estudio, frente al tratamiento control. Este aumento significativo en los niveles de proteína soluble se debe a la presencia de diversas proteínas en la composición de la leche de coco, las cuales se incorporan a la formulación del licor crema al aumentar la proporción de este ingrediente. El resultado de proteína soluble fue menor en el tratamiento control ($28,90 \pm 0,36$ mg/mL) mientras que, el tratamiento con mayor contenido fue el T3 ($93,84 \pm 0,12$ mg/mL). Los valores expuestos en este estudio, se encuentran superiores al reportado por Ríos *et al.* (2019) con un rango de 0,65 – 1,12 % de proteína en crema de licor a base de leche de coco.

3.2. Características microbiológicas del licor crema

Los resultados expuestos en la tabla 4, demostraron que el tratamiento con menor contenido de aerobios mesófilos fue el T1 ($3,8 \times 10^1$) y en mayor valor el T3 ($2,4 \times 10^2$). En cuanto a mohos y levaduras, el T1 con $2,4 \times 10^1$ UFC/g fue el de menor carga microbiana, mientras que, el de mayor presencia de este patógeno fue el T3 con $5,0 \times 10$ UFC/g. Todas las formulaciones demostraron ser un producto inocuo debido a las buenas prácticas de manufactura empleadas durante el proceso de elaboración del licor crema. En este estudio, todos los tratamientos presentaron valores de calidad microbiológica aceptables de acuerdo a lo indicado en la norma de referencia NTE INEN 2802 (2015) para bebidas alcohólicas.

Tabla 4. Resultados de calidad microbiológica del licor crema.

Table 4. Microbiological quality results of cream liqueur.

Microorganismos	T0	T1	T2	T3
Aerobios mesófilos	$5,3 \times 10^1$	$3,8 \times 10^1$	$1,5 \times 10^2$	$2,4 \times 10^2$
Mohos y levaduras	$4,5 \times 10$	$2,4 \times 10^1$	$3,4 \times 10$	$5,0 \times 10$
Coliformes	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$
<i>E. coli</i>	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$	$0,0 \times 10$

Los resultados expuestos en esta investigación se encuentran similares a los presentados por la literatura de Jiménez *et al.* (2010) quienes determinaron calidad microbiológica en bebidas fermentadas a base de coco.

3.3. Aceptabilidad sensorial en licor crema

En la tabla 5 se presentan los resultados de análisis de varianza no paramétrico para las variables de perfil sensorial del licor crema a base mango con leche de coco. Se determinó que los atributos sabor, color, y textura presentaron un $p < 0,05$ %, mientras que, el aroma manifestó un $p > 0,05$ %, es decir que, estadísticamente son considerados iguales con un nivel de aceptación de me gusta poco.

Tabla 5. Resultados de análisis de varianza no paramétrico en el perfil sensorial del licor crema.

Table 5. Results of nonparametric analysis of variance on the sensory profile of cream liqueur.

Atributos sensoriales	T0	T1	T2	T3	Sig.
Sabor	$6,07 \pm 0,89^B$	$6,40 \pm 0,84^C$	$5,77 \pm 1,04^B$	$5,26 \pm 1,02^A$	0,0001
Aroma	$5,70 \pm 1,12^A$	$5,60 \pm 1,08^A$	$5,63 \pm 1,08^A$	$5,49 \pm 1,22^A$	0,6892
Color	$6,26 \pm 0,56^B$	$6,20 \pm 0,50^{AB}$	$5,96 \pm 0,67^A$	$6,04 \pm 0,65^{AB}$	0,0203
Textura	$5,59 \pm 1,00^A$	$6,19 \pm 0,87^B$	$5,91 \pm 0,83^{AB}$	$5,61 \pm 0,92^A$	0,0002

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Media $\pm$ desviación estándar, $n=70$.

Sabor

Según los resultados de la prueba de Kruskal Wallis ($p < 0,05$ %), el tratamiento T0 no fue estadísticamente diferente frente al T2, no obstante, sí presentó significancia estadística frente al T1 y T3. El tratamiento que presentó menor aceptabilidad sensorial fue el T3 con una puntuación de $5,26 \pm 1,02$ (me gusta poco), mientras que, el de mayor aceptación fue el T1: $6,40 \pm 0,84$ con una categoría según escala hedónica de me gusta moderadamente. Se logró verificar que, a mayor cantidad de leche de coco en fórmula, menor es la aceptación en sabor por parte de los catadores no entrenados en el licor crema, lo cual, puede estar vinculado a la disminución del sabor del mango, siendo menos intenso en las formulaciones con 10 y 15 % de leche de coco. Estos resultados se encuentran relacionados con los presentados por Arteaga *et al.* (2019) quienes obtuvieron una aceptación entre 20 – 50 % en sabor para licores de frutas. Al contrario, la baja aceptación en sabor (2.4/10) para bebidas alcohólicas con jugo de melocotón determinada por Fracassetti *et al.* (2019) podría indicar que la combinación de ciertas frutas con alcohol puede resultar menos atractiva para los consumidores. Los resultados de este estudio sugieren que la formulación T1, con la menor proporción de leche de coco, ofrece el mejor equilibrio en términos de aceptabilidad del sabor, resaltando la importancia de optimizar la concentración de leche de coco para no opacar el sabor característico del mango.

Color

La prueba de comparación de promedios Kruskal Wallis determinó que, el tratamiento T0 no fue estadísticamente diferente frente al T1 y T3, sin embargo, el T2 sí presentó significancia estadística frente al T0. La ausencia de diferencia significativa en la aceptabilidad del color entre el control (T0) y los tratamientos T1 y T3 podría sugerir que las concentraciones de leche de coco al 5 y 15 % no generaron cambios visuales lo suficientemente notables como para influir significativamente en la preferencia de los catadores, en comparación con el control. Se observó que a medida que aumentaba la concentración de leche de coco, el licor crema tendía a adquirir una tonalidad más clara y opaca. Se identificó que, el tratamiento con mejor aceptabilidad sensorial fue el T0 con un promedio de $6,26 \pm 0,56$ y categoría de me gusta moderadamente, mientras que, el T2 con $5,96 \pm 0,67$ fue el tratamiento de menor aceptación por parte de los catadores no entrenados, estos resultados, se encuentran superiores a los expuestos por el estudio de Alcívar (2020) quien logró obtener una aceptabilidad entre 3,99 – 4,22 puntos en una bebida alcohólica a base de aguardiente rectificado con maíz morado. Atributos como el color, son muy importante tanto para la primera aceptación como para la compra habitual de los productos como las bebidas de crema de licor (Pinto *et al.*, 2022).

Textura

De acuerdo a los resultados expuestos en la tabla 5, se determinó que el tratamiento T0 no presentó significancia estadística frente al T2 y T3, pero sí fue estadísticamente diferente frente al T1. El tratamiento T1 y T2 no fueron significativos entre sí. La ausencia de diferencia significativa en la textura entre el control (T0) y los tratamientos T2 y T3 podría sugerir que las concentraciones de leche de coco en estos tratamientos no generaron cambios texturales lo suficientemente perceptibles para ser estadísticamente diferentes del control. La formulación con mejor aceptabilidad sensorial en textura fue el T1 con una aceptación de me gusta moderadamente ($6,19 \pm 0,87$), en menor aceptación se encuentra el T2 con $5,59 \pm 1,00$. Lozano (2023) logró identificar que, al añadir miel de penca en una bebida de coco los niveles de textura se mantuvieron entre 3,17 – 3,80 (ni me gusta – ni me disgusta) valores inferiores a los expuestos en este estudio. Caiza (2019) presentó resultados similares en una bebida de leche de chocho y suero lácteo ($4,00$ = textura poco espesa). Lo que podría reflejar las diferentes matrices alimentarias y las expectativas de textura para un licor crema en comparación con otras bebidas."

3.4. Estabilidad fisicoquímica en licor crema

pH

Se evaluó la estabilidad del pH en cuatro formulaciones de licor crema a base de mango y leche de coco, incluyendo un control sin factor en estudio (LC). Se determinó que durante los días 0 y 50 no existió significancia estadística entre los tratamientos, no obstante, en el día 10, 20, 30 y 40 si se presentó diferencias significativas entre las formulaciones con leche de coco frente al control. Se logró verificar que, existió inestabilidad fisicoquímica en pH para cada tratamiento durante los días evaluados (figura 1). En los licores crema a base de mango y leche de coco los niveles de pH estuvieron entre $5,51 \pm 0,01$ – $6,14 \pm 0,12$, es decir, que existió un ascenso y descenso de este parámetro

cada diez días, esto se pudo deber a la presencia de ácidos orgánicos presentes en el mango, los cuales pudieron haber interferido al mezclarse con la leche de coco y provocar una inestabilidad. Los resultados presentes en esta investigación se encuentran relacionados a los expuestos por Ekene y Okey (2022) quienes determinaron valores en pH iniciales de 6,5 y finales después de tres meses de estudio en estantería de 5,9 para licor crema a partir de wishky y crema de leche. Paspuel *et al.* (2020) presentó un nivel de pH de 5,1 en licor crema de cacao y 4,72 en crema de licor sabor a uvilla valores similares a los expuestos en esta investigación.

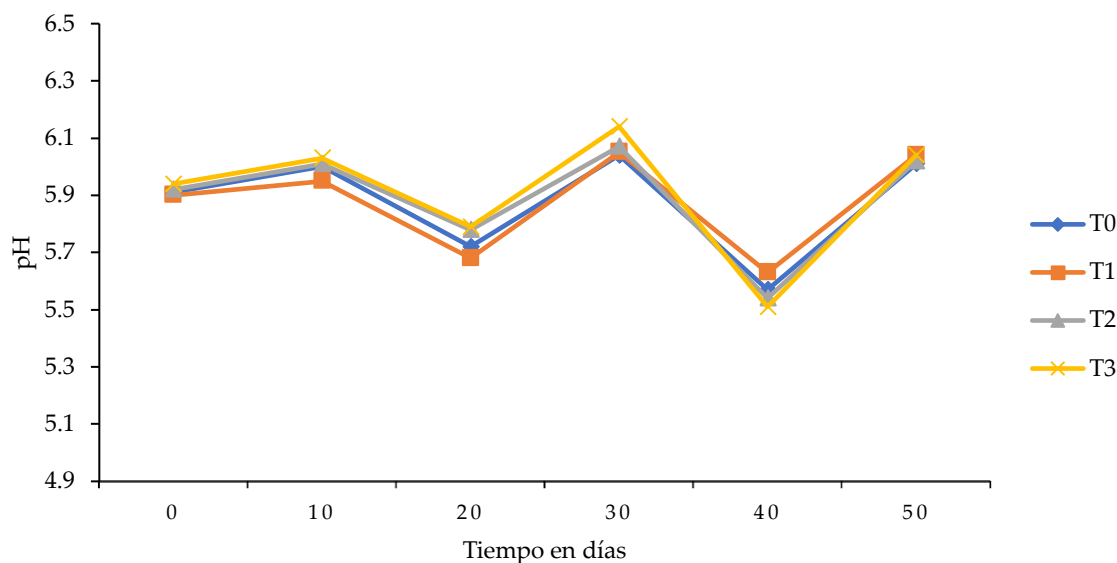


Figura 1. Cambios de pH en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 1. Changes in pH in cream liquor based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

Viscosidad

Se evaluó la viscosidad de cuatro formulaciones de licor crema a base de mango, incluyendo un control sin leche de coco (T0) y tres tratamientos con diferentes concentraciones de leche de coco: T1 (5 %), T2 (10 %), y T3 (15 %). Se logró determinar que, todos los tratamientos presentaron significancia estadística frente al tratamiento control durante los días 0, 10 y 20, mientras que, en los días 30, 40 y 50 solo los tratamientos T1 y T2 fueron significativos frente al T0, los resultados expuestos en este estudio, demostraron que durante el día 0 y 10 el tratamiento control presentó niveles más altos de viscosidad en comparación con el T1 y T2, sin embargo, el tratamiento T3 fue mayor a diferencia de los demás tratamientos presentando una viscosidad entre $291,02 \pm 1,93 - 292,23 \pm 3,38$ cP. En las evaluaciones restantes el T0 mantuvo una viscosidad mayor de $255,23 \pm 5,43$ cP. En la figura 2 se logró determinar que todas las formulaciones fueron inestables, durante la evaluación de estabilidad se determinó que, a menor cantidad de leche de coco en fórmula, menor viscosidad presenta el licor crema. Bozhko *et al.* (2019) determinaron una viscosidad de 2219,7 mPa's en licor crema, valor superior al expuesto en este estudio, esta diferencia podría deberse a la composición

diferente del licor crema (ingredientes base, contenido de grasa, presencia de otros estabilizantes) o a las condiciones de procesamiento utilizadas. Según Ekene y Okey (2022) la viscosidad es un factor importante de control de calidad en la evaluación de licores cremosos. En efecto, este parámetro puede controlarse variando cantidades de caseinato de sodio en las cremas de licor, lo cual permite mejorar la estabilidad de varias propiedades incluida la viscosidad.

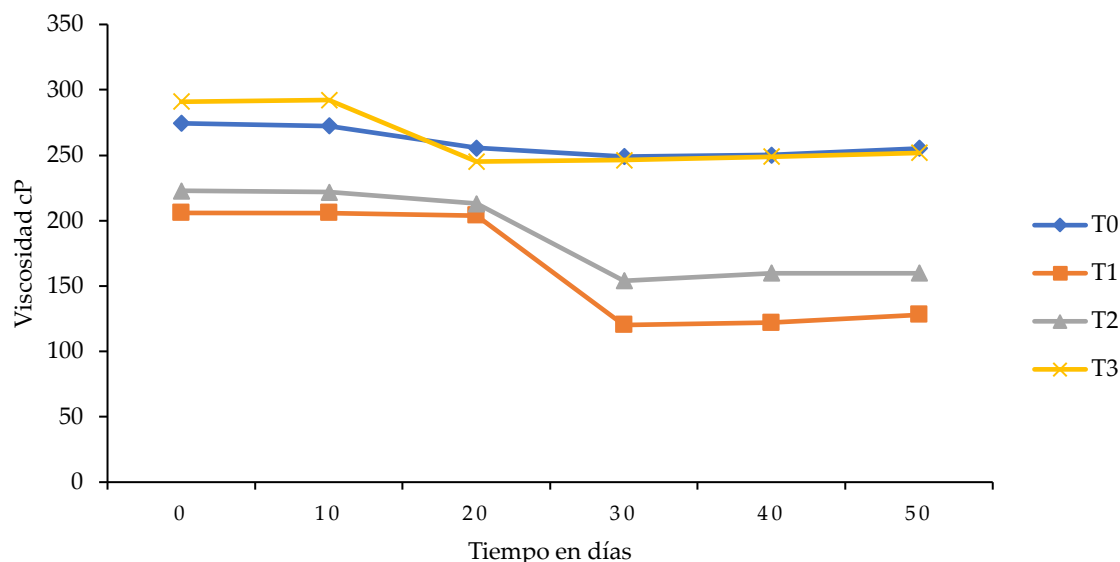


Figura 2. Cambios de viscosidad en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 2. Viscosity changes in cream liquor based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

Densidad

Según los resultados de la prueba paramétrica de Dunnett ($p < 0,05$), se estableció que, durante los días de evaluación fisicoquímica; 0, 20, 30 y 50, los tratamientos presentaron significancia estadística, mientras que, en los días 10 y 40 no fueron significativamente diferentes, esta ausencia de significancia en ciertos días podría indicar momentos de relativa homogeneidad en la densidad entre las formulaciones. De acuerdo a los resultados, en la figura 3 se determinó que el tratamiento T0, T1 y T3 fueron los menos estables, sin embargo, el tratamiento T2 a partir del día 30 fue presentando mejor estabilidad en densidad presentando valores entre $1,0621 \pm 0,00 - 1,064$ g/mL. Estos resultados se encuentran similares a los presentados por Rivas et al. (2019) quienes determinaron una densidad entre 1,16 g/mL – 1,18 g/mL para licores crema con base láctea de leche en polvo y crema de leche con pisco, sugiriendo que la presencia de componentes lácteos podría influir en un rango de densidad similar. Al contrario, Iglesias y Cartaya (2022) presentaron una menor densidad de 0,997 g/mL en licor crema a partir de frutos de *Szygium cumini*, lo que probablemente se deba a la diferente composición de la materia prima base.

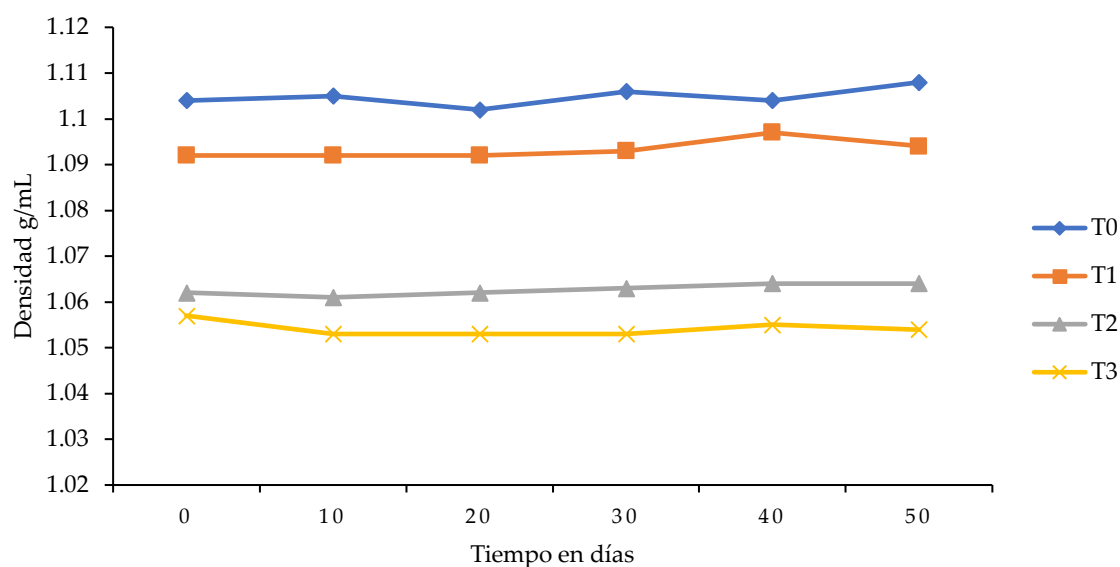


Figura 3. Cambios de densidad en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 3. Density changes in cream liquor based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

Sólidos solubles

Se evaluó la estabilidad fisicoquímica de sólidos solubles en los licores crea. Según los resultados de la prueba post-hoc de Dunnett ($p < 0.05$), se determinó significancia estadística entre los tratamientos con factor en estudio (leche de coco) frente al tratamiento control durante los días; 0, 10, 20, 30, 40 y 50, no obstante, se verificó que, a medida que aumentan los niveles de leche de coco en fórmula, los porcentajes de sólidos solubles disminuyeron, posiblemente debido a la menor concentración de azúcares y otros sólidos solubles en la leche de coco en comparación con la base de mango. En la figura 4 se logró verificar que los niveles de sólidos solubles fueron más estables en las formulaciones con 5, 10 y 15 % de leche de coco, sin embargo, el tratamiento control presentó mayor inestabilidad con valores entre $30,06 \pm 0,05$ % - $34,83 \pm 0,28$ %. Los resultados presentes en este estudio para la variable sólidos solubles, se encuentran inferiores a los expuestos en la investigación de Iglesias y Cartaya (2022) quienes obtuvieron un valor de 42,6 % en sólidos solubles para licor crema a partir de extractos de frutos de cerezo negro, lo que podría deberse a diferencias en la composición de las frutas y la cantidad de azúcar añadida. Al contrario, Maquera (2016) determinó un 34 % en un licor crema a base de pisco de uva negra criolla, goma xantán, jarabe de azúcar y concentraciones de hojas de cedrón.

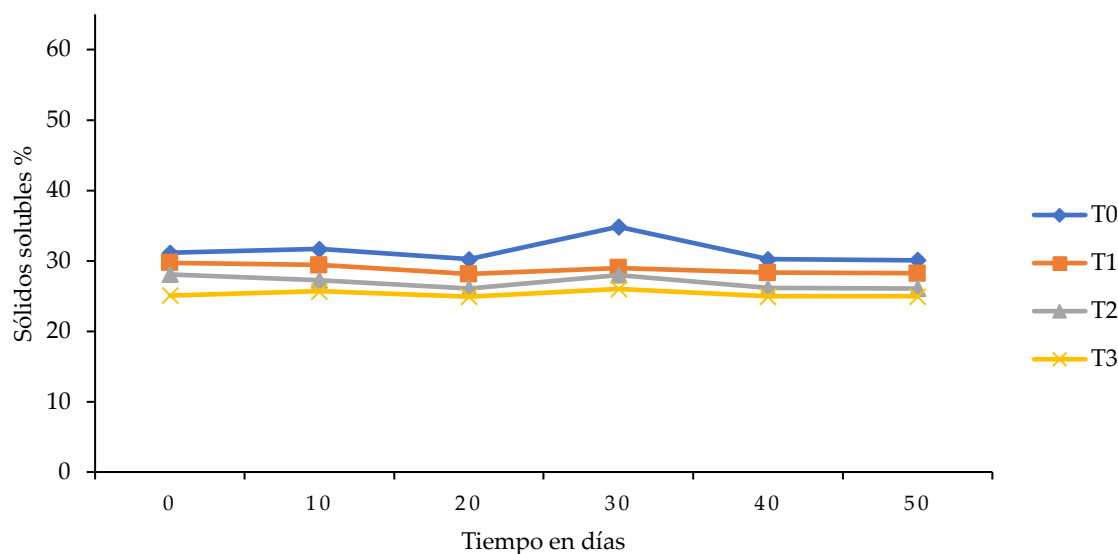


Figura 4. Cambios de sólidos solubles en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 4. Changes in soluble solids in cream liquor based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

Grado alcohólico

Se evaluó la estabilidad de grado alcohólico de las cuatro formulaciones de licor crema. Según los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) seguido de una prueba post-hoc de Dunnett ($p < 0.05$), el grado alcohólico no presentó significancia estadística durante los días 0, 10, 20, 30 y 50, al contrario, en el día 40 si se demostró diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, en la figura 5 se determinó que todas las formulaciones presentaron un grado alcohólico variable entre $8,02 \pm 0,02 - 8,13 \pm 0,01$ %, no obstante, los tratamientos menos estables fueron el T0, T2 y T3, siendo el T1 el que presentó mejor estabilidad durante los días 0, 10, 20 y 30 y ligero descenso en el día 40 y 50 siendo su valor final $8,07 \pm 0,06$ % en grado alcohólico. Los resultados expuestos en este estudio se encuentran inferiores a los exigidos en la norma NTE INEN 1837 (2016) la cual establece un mínimo de 15 % de alcohol (fracción volumétrica) en licor crema. Muñoz (2021) logró determinar una concentración alcohólica entre 14,18 – 15,28 % en licor cremoso artesanal con adición de varios niveles de cascarilla de cacao trinitario, valor superior al presentado en esta investigación, lo cual puede ser atribuido a la utilización de una base alcohólica diferente o a una mayor concentración inicial de alcohol en su formulación.

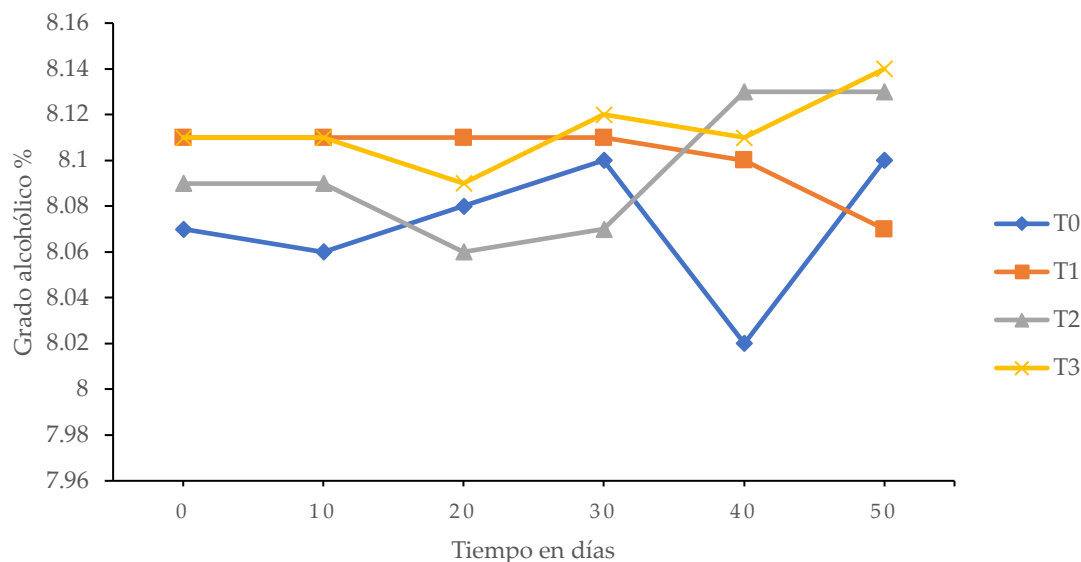


Figura 5. Cambios de grado alcohólico en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 5. Changes in alcoholic strength in cream liqueur based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

Acidez

Se evaluó la estabilidad fisicoquímica de acidez de cuatro formulaciones de licor crema. El análisis de varianza determinó que durante la evaluación del día 10 los tratamientos en estudio no presentaron significancia estadística entre sí, lo que podría indicar que en ese punto temprano del almacenamiento, el efecto de las diferentes concentraciones de leche de coco sobre la acidez aún no era lo suficientemente pronunciado, no obstante, en los días 0, 20, 30, 40 y 50 los tratamientos con factor en estudio si fueron significativamente diferentes frente al control, de acuerdo con la figura 6, todas las formulaciones presentaron una ligera estabilidad durante los días 0 y 10, no obstante, en los demás días existió inestabilidad de acidez en los tratamientos T0, T1 y T3, siendo el más estable el T2 a partir del día 30 presentando un valor final de $0,34 \pm 0,00$ g ácido cítrico/ 100 mL. Los resultados presentes en este estudio, se encuentran similares a los expuestos por la literatura de Ríos *et al.* (2019) quienes lograron determinar una concentración de acidez entre 0,22 % - 0,28 % en licor crema con pasta de coco, leche condensada y pisco. Otras investigaciones como la de Muñoz (2021) han demostrado niveles de acidez entre 0,22 – 0,61 % para licores cremosos, lo que podría reflejar la variabilidad introducida por diferentes ingredientes y procesos de elaboración.

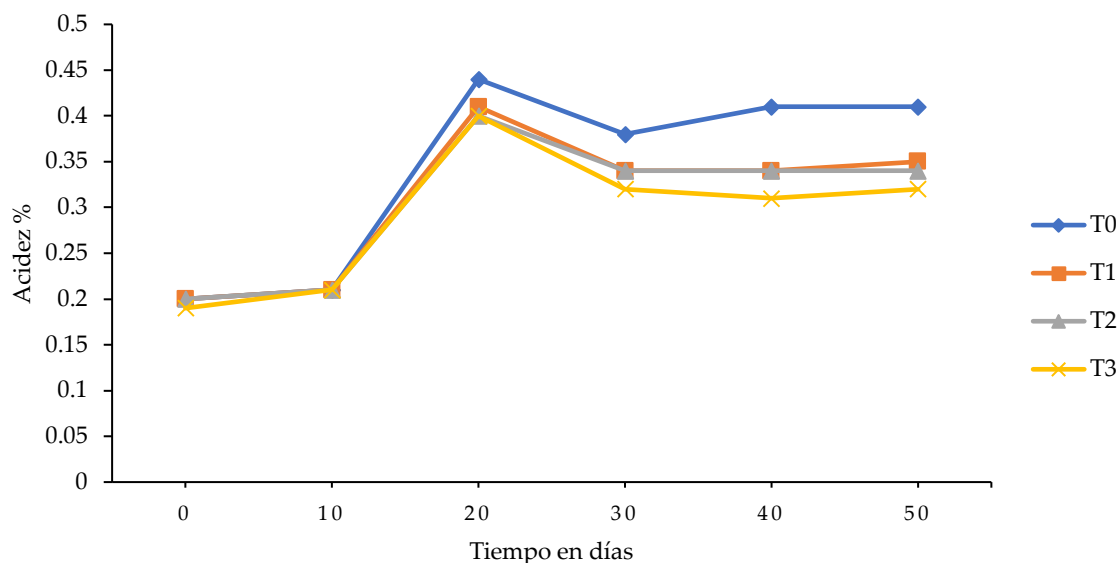


Figura 5. Cambios de acidez en licor crema a base de mango y leche de coco durante el almacenamiento a temperatura de 4 °C por 50 días.

Figure 5. Acidity changes in cream liquor based on mango and coconut milk during storage at a temperature of 4 °C for 50 days.

4. Conclusiones

Las formulaciones de licor crema a base de mango y leche de coco cumplieron con los requisitos exigidos de azúcares reductores que establece la normativa ecuatoriana NTE INEN 1837. Sin embargo, es importante mencionar que, el tratamiento T3 fue el mejor en cuanto a nivel proteico y el T0 manifestó menor contenido graso de importancia para la salud humana. Los tratamientos en estudio fueron microbiológicamente aceptables cumpliendo con la calidad microbiológica que exige la norma referencial. A nivel sensorial los catadores no entrenados determinaron un mayor grado de aceptabilidad en los atributos sabor y textura para el tratamiento T1, lo cual indicó que, a menor cantidad de leche de coco en fórmula, mejor aceptación tendrá el licor crema a base mango, por otra parte, el T0 presentó mejor percepción sensorial en aroma y color. La evaluación de estabilidad fisicoquímica en los tratamientos en estudio demostró que durante los días de control fisicoquímico los niveles de pH y viscosidad fueron inestables en todos los productos experimentales de licor crema a base de mango y leche de coco, en cuanto al parámetro densidad, sólidos solubles y grado alcohólico la formulación T1 presentó mejor estabilidad fisicoquímica en estos parámetros de calidad, no obstante, los niveles de acidez fueron más estables en el tratamiento T2. Se determinó que, a menor cantidad de leche de coco en fórmula, se presenta mejor estabilidad fisicoquímica en el licor crema.

Es recomendable evaluar la sustitución o combinación del carboximetilcelulosa con otros estabilizantes que permitan generar una mejor estabilidad fisicoquímica del licor crema, además, es importante analizar mediante control de tiempos y temperaturas de almacenamiento la vida útil de la bebida alcohólica, garantizando un producto con mejores características para el consumidor.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, M.B.B.H. y S.L.P.C.; metodología, J.P.M.M.; software, J.J.G.M.; validación, M.B.B.H, J.P.M.M. y J.J.G.M.; análisis formal, J.P.M.M.; investigación, M.B.B.H, J.P.M.M. y S.L.P.C.; recursos, M.B.B.H. y S.L.P.C.; conservación de datos, M.B.B.H.; redacción-redacción del borrador original, J.J.G.M. y J.P.M.M.; redacción-revisión y edición, J.J.G.M.; visualización, M.B.B.H.; supervisión, J.P.M.M.; administración del proyecto, J.P.M.M. y J.J.G.M.; obtención de financiación, M.B.B.H. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

5. Referencias

- Alcívar-Martínez, J. (2020). Evaluación sensorial de una bebida alcohólica a base de maíz morado (*Zea mays* L) con adición de aguardiente rectificado (Tesis de Grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo). <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/5230>
- Arteaga Solórzano, R., Vargas Zambrano, P., Barre Zambrano, R., & Mendoza Rivadeneira, F. (2019). Caracterización de materia prima e identificación de la aceptabilidad de cuatro licores artesanales de frutas. *CIENCIAMATRIA*, 5(9): 653-667. <https://doi.org/10.35381/cm.v5i9.255>
- Bozhko, T., Donchevska, R., & Romanenko, R. (2019). The rheological properties of cream liqueurs and their changes in the transportation process. *Scientific Messenger LNUVMB Series: Food Technologies*, 21(91): 149-156. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9125>
- Caiza-Saca, L. (2019). Elaboración de una bebida fermentada a partir de lactosuero y leche de chocho (*Lupinus mutabilis sweet*) utilizando al kéfir de agua como fermento (Tesis de Grado, Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga). <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6152>
- Colina, M., Oviedo, C., & Rojas, P. (2018). Evaluación fisicoquímica y sensorial de un análogo de leche condensada azucarada con sustitución parcial de leche de vaca por leche de coco. *Revista Mangífera*, 1: 25.35. <http://revistas.unellez.edu.ve/index.php/mangifera/article/view/423>
- Corcino, E., Farromeque, M., León, B., Osso, O., & Torres, E. (2014). Elaboración y aceptabilidad de licor a base de melocotón (*Prunus pérsica*) "huayco". Huacho, Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/1590>
- Cuesta-Lara, R. (2021). Obtención de vinagre a partir de las mezclas de agua y pulpa de coco (*Coco nucifera*) (Proyecto de Investigación, Universidad Agraria del Ecuador). <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CUESTA%20LARA%20ROSA%20ADRIANA.pdf>
- Dussán-Sarria, S., Ramírez-Yela, J. I., & Hleap-Zapata, J. I. (2017). Conservation of fresh-cut mango using an edible coating based on avocado oil. *Información Tecnológica*, 28(3): 67-74. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300008>

- Ekene, U. S., & Okey, O. E. (2022). Studies on the production of cream liqueur using whiskey and milk cream. *SAR Journal of Pathology and Microbiology*, 3(5): 73-80. <https://doi.org/10.36346/sarjpm.2022.v03i05.003>
- Fracassetti, D., Bottelli, P., Corona, O., Foschino, R., & Vigentini, I. (2019). Innovative alcoholic drinks obtained by co-fermenting grape must and fruit juice. *Metabolites*, 9(5): 1-10. <https://doi.org/10.3390/metabo9050086>
- Guerrero-Hernández, G. (2018). La producción de mango ecuatoriano. *Revista Perspectiva*, 6: 1-8. <https://perspectiva.ide.edu.ec/investiga/2018/06/26/la-produccion-del-mango-ecuatoriano/>
- Iglesias, D., & Cartaya, R. (2022). Desarrollo de licor crema a partir de frutos de *Szygium cumini* (L) Skeels. *Nexo Revista Científica*, 35(1): 22-32. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i01.13910>
- NTE INEN, 1837. (2016). Bebidas alcohólicas. Licores. Norma Técnica Ecuatoriana. Requisitos físicoquímicos. <https://es.scribd.com/document/467148974/nte-inen-1837-2>
- NTE INEN, 2802. (2015). Bebidas alcohólicas. Cocteles o bebidas alcohólicas mixtas y los aperitivos. Norma Técnica Ecuatoriana. Requisitos. <https://es.scribd.com/document/392769622/Nte-inen-2802-Bebidas-Alcoholicas-Cocteles-o-Bebidas-Alcoholicas>
- Jahurul, M., Zaidul, I., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F., Nyam, K., Norulaini, N., & Mohd, A. (2015). Mango (*Mangifera indica* L) by-products and their valuable component: A review. *Food Chemistry*, 183: 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.046>
- Jiménez, R., González, N., Magaña, A., & Corona, A. (2010). Evaluación microbiológica y sensorial de fermentados de pozol blanco, con cacao (*Theobroma cacao*) y coco (*Coco nucifera*). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1): 070-080. <https://sites.google.com/site/lrvcta/v1-n1-2010/r6>
- Lozano-Vacacela, H. (2023). Utilización de la miel de penca en la elaboración de una bebida hidratante de coco. (Proyecto de Investigación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. <https://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/19090>
- Manivannan, A., Bhardawaj, R., Sugatha, P., Poonam, S., Hebbar, K., & Kande, S. (2018). Biochemical and nutritional characterization of coconut (*Cocos nucifera* L) haustorium. *Food Chemistry*, 238: 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.127>
- Maquera-Mamani, J. (2016). Efecto de la concentración de hojas de cedrón (*Aloysia citrodora Palau*) goma xantán y jarabe de azúcar en las características sensoriales y reológicas de un licor a base de pisco puro de uva (*Vitis vinifera*) variedad negra criolla. (Tesis). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/1490>
- Masud-Parvez, G. M. (2016). Pharmacological activities of mango (*Mangifera indica*): A review. *Journal of Pharmacological and Phytochemistry*, 5(3): 01-07. <https://www.phytojournal.com/archives/2016.v5.i3.847/pharmacological-activities-of-mango-mangifera-indica-a-review>
- Muñoz, G. (2021). Aprovechamiento de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad trinitario (CCN-51) en la elaboración de licor cremoso artesanal. (Tesis de Posgrado). Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Manabí, Ecuador.
- Pham, L. (2016). Chapter 9 - Coconut (*Cocos nucifera*). *Industrial Oil Crops*, 231-242. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-98-1.00009-9>

- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2022). Chemical and sensory characteristics of fruit juice and fruit fermented beverages and their consumer acceptance. *Beverages*, 8(2): 33. <https://doi.org/10.3390/beverages8020033>
- Rajendran, A., Alsawalha, M., & Alomayri, T. (2021). Biogenic synthesis of husked rice-shaped iron oxide nanoparticles using coconut pulp (*Coco nucifera* L) extract for photocatalytic degradation of Rhodamine B dye and their in vitro antibacterial and anticancer activity. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(9): 101307. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101307>
- Ríos, M., Villanueva, A., Alejos, I., Cotrina, G., & Estela, E. (2019). Características fisicoquímicas y organolépticas del licor de coco: efecto de pasta de coco, leche descremada y pisco. *Ciencia UNEMI*, 12(31): 1-10. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol12iss31.2019pp01-10p>
- Rivas-Carmen, M, Rumiche-Seminario, K y Rumiche-Seminario, R. (2019). Desarrollo de una crema de licor a base de pisco. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Rocha, K. D. C., Ferreira, M. S., & Garcia, C. E. R. (2022). Produção e produtos à base de coco (*Cocos nucifera* L.): uma revisão / Production and products based on coconut (*Cocos nucifera* L.): a review. *Brazilian Journal of Development*, 8(5), 41476–41491. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-573>
- Torres, C., Rojas, R., Contreras, J., Sema, L., Belmares, R., & Aguilar, C. (2016). Mango seed: Functional and nutritional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.06.009>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Sustitución parcial con harina de garbanzo extrudida en galletas de harina de trigo para mejorar cantidad y calidad proteica

Partial Substitution with Extruded Chickpea Flour in Wheat Flour Cookies to Improve Protein Quantity and Quality

Edgar Roberto Pérez-Gaytán¹, Erick Heredia-Olea², y Vicente Antonio Mirón-Mérida², Esther Pérez-Carrillo^{2*}

¹ Dirección General de Educación Tecnológica Industrial y de Servicios. Subsecretaría de Educación Media Superior (SEMS), Cbtis 74. Tenochtitlan S/N, Infonavit La Joya, 67160 Guadalupe, N.L., México.

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey. Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico, 64700 Monterrey, N.L., México.

*Corresponding author email: perez.carrillo@tec.mx (Esther Pérez-Carrillo)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1917>

Recibido: 15 de mayo de 2025; Aceptado: 09 de agosto de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Jazmín Leticia Tobías-Espinoza

Resumen

El garbanzo es conocido por su alto contenido de proteína saludable, fibra dietaria y almidón resistente, pero su uso es limitado debido a sus propiedades tecnológicas. El proceso de cocción por extrusión es un proceso eficiente con el cual se puede mejorar las propiedades tecnológicas del garbanzo. Las galletas son uno de los productos listos para comer más consumidos que pueden enriquecerse con la harina de garbanzo, incrementando el consumo de esta leguminosa. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la sustitución de la harina de trigo en la formulación de galletas, por harina de garbanzo extrudida en un 40 % sobre el contenido y digestibilidad de proteína, composición proximal, análisis de viscosímetro rápido (RVA) y textura de la galleta. La galleta con un 40 % de harina de garbanzo contiene un 73.75 % más de proteína, una mejor digestibilidad de la misma (incremento de 85 a 90 %), sin embargo, tiene un menor índice de expansión, siendo más frágil (45 %), pero al mismo tiempo más dura (7 %) que la galleta de trigo después de 12 días de almacenamiento. La sustitución de harina de trigo refinada por harina de garbanzo extrudida genera una galleta que es fuente de proteína de buena digestibilidad con una buena textura por lo que puede ser un snack adecuado para niños y adolescentes.

Palabras clave: proteína, garbanzo, digestibilidad de proteína, galleta, extrusión.

Abstract

Chickpeas are known for their high content of healthy protein, dietary fiber, and resistant starch, but their use is limited due to their technological properties. The extrusion cooking process is an efficient way to improve the technological properties of chickpeas. Cookies are one of the most consumed ready-to-eat products that can be enriched with chickpea flour, increasing the consumption of this legume. The objective of this research is to evaluate the effect of replacing wheat flour in cookie formulations with 40 % extruded chickpea flour on protein content and digestibility, proximate composition, RVA, and textural life of the cookie. Cookies with 40 % chickpea flour have 73.75 % more protein with better digestibility (increasing from 85 to 90 %), a lower cookie expansion index, but a textural life similar to that of wheat cookies. Replacing refined wheat flour with 40 % extruded whole chickpea flour produces a biscuit that is a source of easily digestible protein with a good textural shelf life, making it a suitable snack for children and teenagers.

Keywords: protein, chickpea, protein digestibility, biscuit, extrusion

1. Introduction

El cultivo de garbanzo es resistente al estrés hídrico, además de los bajos insumos que requiere debido a que es una planta fijadora de nitrógeno, convirtiéndolo en una excelente opción para producción de granos en condiciones de sequía, uno de los efectos más frecuentes del cambio climático (Vargas-Blandino y Cárdenas-Travieso, 2021). Por lo que el garbanzo es un cultivo de gran importancia para el Noroeste de México, debido a su alta capacidad de adaptación a altas temperaturas y sequía (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Además, las proteínas de garbanzo son ricas en aminoácidos esenciales con excepción de los sulfurados. El principal carbohidrato es almidón seguido de fibra dietaria, oligosacáridos y monosacáridos como glucosa. También se le atribuyen beneficios nutraceuticos en relación con padecimientos como diabetes tipo 2, obesidad, alta presión sanguínea, problemas digestivos y algunos tipos de cáncer (Herrera y González de Mejía, 2021).

Por otra parte, el mercado de galletas en México se encuentra constituido por el 99.7 % de los hogares del país, que consume en promedio 12 kg al año por hogar, monto que puede ascender hasta 23 kg. Este mercado está creciendo debido a la necesidad de alimentos envasados por parte de los mexicanos a causa del agitado estilo de vida y el mayor interés por los alimentos listos para consumir (Coria-Paez et al., 2021). Las galletas han recibido atención en los últimos tiempos como medio para la entrega de compuestos bioactivos (Goubgou et al., 2021). El enriquecimiento de galletas con otras fuentes de proteínas como las leguminosas ha recibido atención, debido a que las leguminosas son altas en proteínas que contienen aminoácidos esenciales ausentes en las proteínas de cereales. El uso de estas harinas compuestas se ha vuelto popular por la ventaja económica y nutricional que representa (Feyera, 2020). En este contexto, el garbanzo ha sido ampliamente estudiado como alternativa con resultados positivos en cuanto a contenido de proteína, reducción de carbohidratos y el aporte de fitoquímicos (Delgado-Andrade et al., 2024; Felisiak et al., 2024). También se ha observado que se puede tener una buena aceptación sensorial en niveles de sustitución hasta del 30 % en galletas dulces (Soto-Tolosa et al., 2023). Sin embargo, uno de los retos más importantes es la eliminación de compuestos anti nutritivos, mantener o incluso mejorar la digestibilidad de proteína y la calidad en términos de textura. Se han realizado aplicaciones de fermentaciones lácticas,

germinación y cocción previos a la generación de las harinas utilizadas en galletas, para tener un mejor efecto asociado con textura y sabor (Dai et al., 2024; Wang et al., 2024). La extrusión termoplástica de garbanzo es una tecnología que se considera altamente eficiente. Trabajos previos han mostrado que bajo condiciones adecuadas de extrusión el almidón se gelatiniza parcialmente, se incrementa la solubilidad de proteínas y la capacidad de absorción de agua lo cual implica propiedades tecnológicas diferentes para la producción de botanas y harinas (Silvestre-De León et al., 2020; Delgado-Murillo et al., 2023; Liu et al., 2025).

El gobierno de México define como una alimentación saludable aquella que proporciona los componentes nutrimentales que las personas necesitan para mantener una buena salud. Una buena alimentación ayuda a prevenir la desnutrición, la obesidad, así como otras enfermedades como la diabetes. Actualmente, la población mexicana presenta una doble carga de problemas de nutrición, la obesidad y la desnutrición (Secretaría de Salud, 2024). La utilización de harina de garbanzo extrudida bajo condiciones que mejoran la digestibilidad de proteína puede utilizarse para sustituir la harina de trigo en un 40 % en galletas, sin afectar la calidad de la galleta, mejorando el aporte proteico en términos de calidad y cantidad. Con base en esto, el objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la sustitución de la harina de trigo por un 40 % de harina de garbanzo extrudida en la elaboración de galletas, sobre la composición proximal, digestibilidad in vitro de proteína, perfil de RVA y vida textural por 5 y 12 días.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para la elaboración de las galletas se utilizó harina de trigo, harina de garbanzo extrudida de acuerdo a lo reportado por Silvestre de León *et al.* (2020), empleando un extrusor de dos tornillos corrotatorios de 30 mm de diámetro (BTSM-30, Bühler AG, Uzwil, Switzerland) configurados como se indica por Cortés-Ceballos et al. (2015). Se trabajó una alimentación de sólidos y una humedad de los sólidos de 31.95 kg/h y 22.5 %, respectivamente a 580 rpm, el material se seco hasta 10 % de humedad para posterior molienda utilizando un molino de martillos con malla de 2 mm. Los otros ingredientes utilizados fueron bicarbonato de sodio, sal, estearoil lactilato de sodio (SSL), huevo en polvo entero, lecitina de soya y vainilla en las proporciones utilizadas en el estudio de De la Rosa-Millán et al. (2017). Se llevaron a cabo pruebas preliminares con sustituciones de 10, 20, 30, 40 y 50 % de harina de trigo por harina de garbanzo extrudida para verificar el nivel máximo en que se tiene aceptación sensorial por 100 jóvenes en la edad de 15-18 años. También se realizó una evaluación económica para verificar cuál era el mayor nivel en el cual no se incrementará el precio ya que se busca llegar a población con pocos recursos. Como resultado de esta etapa preliminar se seleccionaron dos formulaciones con solo harina de trigo (control) y con una sustitución de 40 % de harina de trigo refinada por la harina de garbanzo extrudida. De cada tratamiento se elaboraron tres lotes. Las formulaciones se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Formulaciones evaluadas en la producción de galletas de trigo 100 % y galletas de harina compuesta trigo 60 % garbanzo 40 % (base húmeda).

Table 1. Formulations evaluated to produce wheat biscuits 100 % and wheat:chickpea 60:40 biscuits (moisture basis)

Ingredientes	Trigo 100	Trigo:Garbanzo 60:40
Harina de trigo	41.1 %	24.6 %
Harina de garbanzo		16.4 %
Bicarbonato de sodio	0.6 %	0.6 %
Sal	0.4 %	0.4 %
SSL	0.1 %	0.1 %
Huevo	20.5 %	20.5 %
Lecitina	0.1 %	0.1 %
Vainilla	0.2 %	0.2 %
Agua	12.3 %	12.3 %
Azúcar	16.4 %	16.4 %
Mantequilla	8.2 %	8.2 %

2.2 Métodos

Procedimiento Experimental

Se caracterizaron las mezclas de harinas en términos de viscosidad. Para el perfil viscoamilográfico se utilizó un viscosímetro rápido (RVA) con una suspensión de 7 % sólidos, se sometió a un perfil de calentamiento de 50 a 95 °C en 3.5 min, se mantuvo a 95 °C durante 5 min y se enfrió en 3.5 min a 50 °C, se mantuvo a esta temperatura durante 5 min, esto de acuerdo con el método oficial internacional 76-21-02 de la AACC.

Para la elaboración de las galletas se pesaron todos los ingredientes de forma separada y posteriormente se mezclaron en una batidora KitchenAid (Empire Red 7.5 L) por 15 minutos a velocidad media utilizando un aditamento de paleta. Posteriormente la masa obtenida se laminó a un grosor de 2 cm y se cortó en forma de círculo con molde metálico de un diámetro de 10 cm. Se hornearon en un horno Electrolux a 190 °C por 14 minutos. Se dejaron enfriar a 25 °C y posteriormente se empacaron en bolsa de celofán para su almacenamiento a 25 °C por 12 días.

En cuanto a calidad del producto terminado, se llevó a cabo la caracterización en términos de color en la escala CIELAB (L^* , a^* , b^*), con un espectrofotómetro Minolta (Modelo CM-600d). El índice de expansión se calculó como la relación del diámetro dividido por el grosor de la galleta. Para la digestibilidad “*in vitro*” de proteína se llevó de acuerdo a Hsu et al. (1977), para ello se generó una suspensión acuosa de 6.25 mg de proteína por 1 mL, la cual se ajustó a un pH de 8.0 y posteriormente se adicionó 5 mL de una solución multienzimática (1.6 mg/mL tripsina, 3.1 mg/mL quimiotripsina y 0.8 mg/mL peptidasa) la mezcla se incubó a 37 °C y se monitoreó el pH durante 10 minutos. En cuanto a composición proximal: proteína, humedad, cenizas, fibra cruda y extracto etéreo bajo la normas NOM-F-68-S-1980, NOM-F-083-1986, NOM-F-066-S-1978 NOM-F-090-S-1978 y NOM-F-089-S-1978, respectivamente. En cuanto a calidad, se determinaron cambios en textura a través del tiempo, a los días 0, 5 y 12 días de almacenamiento de acuerdo a lo descrito por De la Rosa-Millán et al. (2017), para ello se utilizó un texturómetro TA.XT2 (Stable Micro System Ltd, Surrey, UK) con una sonda de metal de 3 mm de diámetro. La velocidad de la prueba fue de 1 mm/s y se determinó la dureza (valor máximo en que se rompe la galleta) y fracturabilidad (valor en que se empieza a romper la galleta). Se llevaron a cabo 5 réplicas (galletas) por cada tratamientos cada día de muestreo. Adicionalmente, a los 12 días se se llevó a cabo un análisis microbiológico en términos de mesofílicos totales, coliformes totales y, hongos y levaduras en conformidad con las NOM-092-SSA1-1994, NOM-113-SSA1-1994 y NOM-111-SSA1-1994, respectivamente.

Diseño experimental y análisis de datos

Para este trabajo se estableció un diseño experimental en el cual se compararon galletas elaboradas a base de 100 % harina de trigo contra galletas elaboradas con una sustitución del 40 % de la harina de trigo por harina de garbanzo extrudida. El nivel de sustitución se decidió previamente en una prueba donde se evaluó la factibilidad técnica y percepción sensorial general en sustituciones del 10, 20, 30, 40 y 50 % de harina de trigo por harina de garbanzo extrudida. Se realizaron pruebas para validar que los datos fueran paramétricos (normalidad, homocedasticidad e independencia). Se utilizó una prueba t de Student para comparación de dos medias de datos y para tres medias o más se realizó ANOVA con un valor de significancia p de 0.05. La determinación de diferencia de medias fue hecha utilizando la prueba de Tukey de comparación de medias. Para todas las pruebas estadísticas se utilizó el programa MINITAB® 21. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, con excepción de textura que fueron 5 réplicas por día de almacenamiento por tratamiento.

3. Resultados and discusión

En lo que respecta al perfil de RVA (Fig. 1) de las harinas utilizadas para las formulaciones, se observa un efecto importante en el valor máximo de viscosidad en caliente y también en frío. En la etapa inicial y los primeros 60 segundos de calentamiento, no se observa diferencia en el perfil de viscosidad de ambas harinas, es decir la movilización del agua al interior de la molécula de almidón, así como la unión con otros componentes no presenta mayor diferencia (Balet et al., 2019). La reducción en el valor de viscosidad en caliente de 2169 cp en el tratamiento 100 % harina trigo (control) a 1135 cp en el tratamiento 60:40 trigo:garbanzo extrudido se puede explicar debido a que por la extrusión se modifica tanto la proteína como el almidón presente en el garbanzo (Silvestre-De León et al., 2020), teniendo una mayor afinidad por el agua en comparación con la harina de trigo,

por lo que el almidón de la harina de trigo no puede absorber la suficiente agua para ser gelatinizada completamente (Lu et al., 2022). En la harina de trigo se puede observar el pico de viscosidad en caliente que posteriormente cae durante el calentamiento, este fenómeno está vinculado con la fundición de los cristales aún presentes en el gránulo de almidón. De acuerdo a Silvestre-De León et al. (2020), durante la extrusión de garbanzo se generan zonas más amorfas en el almidón lo que representa un mayor contenido de almidón resistente debido al tratamiento de extrusión, lo que explica la ausencia de esta caída de viscosidad en esta mezcla de harinas. También se puede observar una menor viscosidad en frío, lo que representa una menor tendencia de este almidón al retrogradarse (Balet et al., 2019).

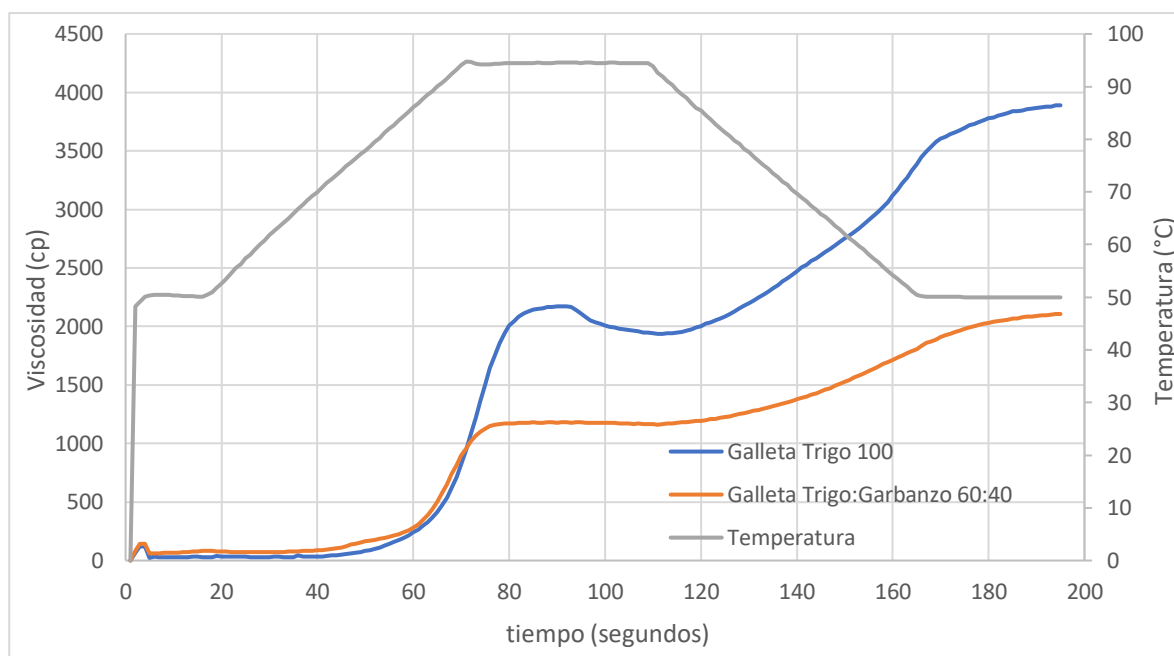


Figura 1. Perfil RVA (Rapid visco-analyser) de harina de trigo 100 % y harina compuesta trigo:garbanzo extrudido 60:40

Figure 1. RVA (Rapid visco-analyser) profile of only wheat flour (trigo 100) and composite flour wheat:extrudate chickpea 60:40

En la Tabla 2 se presentan los resultados de color de las galletas con sustitución del 40 % con harina de garbanzo encontrándose una reducción del valor de luminosidad y el valor de a^* , pero un incremento en el valor de b^* . El efecto en color por la sustitución por harina de garbanzo extrudida es similar a lo reportado por Felisiak et al. (2024) y Soto-Tolosa et al. (2023). Los valores de a^* y b^* de ambas galletas se encuentran en el espacio de tendencia entre rojo y amarillo, respectivamente, dando lugar a que al utilizar la harina de garbanzo se genere una galleta que tiende menos al color rojo y más al color amarillo. Esto es debido a que la harina de garbanzo es color amarillo pálido o claro, a diferencia de la harina de trigo que es una harina blanca, esto también tiene efecto en la luminosidad del color, obteniéndose una galleta más oscura. Se observa también una reducción en

el índice de expansión de las galletas al adicionar la harina de garbanzo extrudido. Yamsaengsung et al. (2012), reportó un efecto similar en galleta al utilizar harina de garbanzo. La reducción del índice de expansión debido a la adición de la harina de garbanzo extrudida se puede presentar por el mayor contenido de proteínas, que tienen una mayor capacidad de retener agua (Kumar et al., 2017). Una combinación de harinas da lugar a diferentes capacidades de absorción de agua y formación de agregados, como resultado los sitios hidrofílicos compiten por el agua dando lugar a una reducción del índice de expansión (Arepally et al., 2020).

Tabla 2. Resultados de medición de color, índice de expansión, composición proximal (base seca) y digestibilidad *in vitro* de proteína de galletas elaboradas con trigo 100 % y harina compuesta trigo:garbanzo 60:40.

Table 2. Color, expansion index, proximate composition and *in vitro* protein digestibility of biscuits made with 100 % wheat flour and 60:40 wheat:chickpea composite flour

Parámetro	Trigo 100	Trigo:Garbanzo 60:40
Color		
L^*	65.21 ^a ±0.40	58.21 ^b ±0.46
a^*	8.55 ^a ±0.36	7.55 ^b ±0.43
b^*	16.90 ^b ±0.28	26.90 ^a ±0.36
Índice de Expansión	6.78 ^a ±0.06	4.65 ^b ±0.04
Humedad %	4.00 ^a ±0.40	4.00 ^a ±0.32
Grasas %	13.16 ^a ±0.40	13.04 ^a ±0.40
Fibra cruda %	0.40 ^a ±0.06	0.45 ^a ±0.03
Cenizas %	1.00 ^b ±0.06	1.30 ^a ±0.03
Proteína %	8.00 ^b ±0.12	13.90 ^a ±0.36
Extracto Libre de Nitrógeno	73.44 ^a ±0.36	67.31 ^b ±0.26
Digestibilidad de proteína <i>in vitro</i> %	85.87 ^b ±0.28	90.16 ^a ±0.46

Letras diferentes en la misma fila representan diferencia estadística a un valor $p < 0.05$

En cuanto a los resultados del análisis proximal, no se observa diferencia significativa, con excepción del incremento en el contenido de cenizas y proteínas totales. Felisiak et al. (2024) observó una relación lineal en el aumento de contenido de cenizas en galletas relacionado con el incremento en el uso de harina de garbanzo en su formulación. El aumento de cenizas se explica por el proceso de elaboración de la harina de garbanzo, ya que esta proviene del grano entero extrudido y

posteriormente molido utilizando tamiz malla 2 mm (Silvestre-de León et al., 2020), a diferencia del proceso comercial de producción de harinas refinadas que involucra varias etapas para asegurar retirar el salvado. Se puede observar también un incremento en el contenido (73.75 %) y la digestibilidad de la proteína. La relación del incremento en el contenido de proteína es similar a lo ya reportado por Felisiak et al. (2024), Lu et al. (2022) y Chavez-Murillo et al. (2021), al utilizar harina de garbanzo en galletas. Sin embargo, adicional al incremento en la cantidad de proteína uno de los retos más importantes cuando se utilizan leguminosas es asegurar la eliminación de factores antinutricionales como son los inhibidores de tripsina. Los resultados presentados en cuanto a digestibilidad de proteína muestran que el tratamiento previo de extrusión, tiene un efecto favorable ya que se logró incrementar la digestibilidad de la proteína presente en la galleta con garbanzo de 85 % a 90 %, similar a lo reportado por Chavez-Murillo et al. (2021) con harina de garbanzo tratada con calor. Esto se debe a la desnaturalización de las proteínas durante los procesos de extrusión y tratamiento térmico, desactivando los inhibidores de tripsina y generando estructuras más desordenadas que implican un acceso más fácil para las proteasas (Silvestre-De León et al., 2020). La baja digestibilidad de la proteína en la galleta que se elabora solo con trigo se puede asociar con la reacción de Maillard ya que, durante ésta, se reduce la disponibilidad de lisina (Köksel y Gökmen, 2008). Otro aspecto importante en relación al incremento en el contenido de proteína en el sistema, con base en lo indicado por Lu et al. (2022) y Chavez-Murillo et al. (2021) y es que las proteínas forman una red que atrapa el almidón y esto reduce el contacto del mismo con la enzima amilasa, reduciendo así su digestibilidad, pudiendo de esta forma beneficiar no solo en términos de cantidad de proteína, sino también de índice glicémico del producto. En el caso de la galleta sustituida con 40 % harina de garbanzo extrudida el 12 % de sus calorías provienen de proteínas por lo que de acuerdo con la definición Parlamento Europeo (2006), se considera que un alimento “fuente de proteína”, lo cual la convierte en una alternativa adecuada para ser considerada como merienda o almuerzo para niños en edad escolar.

Al realizar el estudio de vida textural de las galletas, en la Tabla 3 se pueden observar los resultados obtenidos en términos de dureza y fracturabilidad. Las galletas de trigo:garbanzo son menos firmes al momento de la elaboración pero presentan un incremento de la dureza a los 5 y a los 12 días de almacenamiento. La galleta de trigo solo presenta un cambio del día 0 a los 5 pero entre 5 y 12 días no presenta cambios en su dureza, en tanto que las galletas con garbanzo presentan un aumento significativo a lo largo del tiempo de almacenamiento. En cuanto a la fracturabilidad la galleta solo de trigo es más difícil de desmoronarse y este valor se mantiene constante a lo largo de su almacenamiento, en tanto que la galleta de trigo con garbanzo es más frágil y tiende a aumentar la fuerza necesaria a lo largo del almacenamiento, pero sin alcanzar los valores de la galleta elaborada solo con harina de trigo. En el caso del cambio de textura en la galleta de solo trigo entre el día 0 y los 5 días, está regido por fenómenos de transición de fase como es la retrogradación del almidón y que tomando en cuenta lo reportado para RVA de estas harinas en la Fig. 1, cuando solo se utiliza trigo se tiene una harina con un almidón con mayor valor de retrogradación (Romani et al., 2016). Sin embargo, debido a la baja cantidad de agua disponible para reacción y el empaque adecuado, el producto no presenta más cambios en textura en este rango de tiempo. En el caso de la galleta de garbanzo:trigo, además de la retrogradación de almidón, por la presencia de proteína se presentan otros mecanismos durante el almacenamiento. A diferencia del trabajo realizado por Delgado-Andrade et al. (2024), Felisiak et al. (2024) y Lu et al. (2022), donde la adición de harina de garbanzo sin pretratamiento incrementa la dureza de la galleta en el día 0, el uso de la harina de garbanzo extrudido genera una galleta más suave y frágil. Este efecto inverso por la utilización de un material extrudido se puede asociar con la modificación a la estructura de las proteínas (Silvestre-De León et

al., 2021). El incremento en la dureza de los productos ricos en proteína como barras, se ha asociado entre otros factores con la migración del agua, al igual que a la formación de agregados proteicos, una de las propuestas para la reducción de este efecto es la utilización de proteínas parcialmente hidrolizadas (Jiang et al., 2021). Es importante considerar que, aún cuando las galletas son productos de larga vida de anaquel, en los estudios previamente mencionados no hay reportes sobre la vida de anaquel de galletas con harina de garbanzo. En términos de estabilidad microbiológica, a los 12 días la cuantificación de mesófilos, hongos y coliformes en ambos casos, salieron dentro de norma <100, <10 y ausencia, respectivamente.

Tabla 3. Firmeza y fracturabilidad de galletas elaboradas con 100 % harina de trigo y harina compuesta trigo:garbanzo 60:40 a los 0, 5 y 12 días a 25 °C.*

Table 3. Hardness and fracturability of biscuits made with 100 % wheat flour and 60:40 wheat:chickpea composite flour at 0, 5 and 12 days at 25 °C.*

Tratamiento	Dureza (g.f.s)			Fracturabilidad (g.f.s)		
	Día 0	Día 5	Día 12	Día 0	Día 5	Día 12
Trigo 100	2754.9 ^{aB}	3171.4 ^{aA}	3102.9 ^{aA}	2469.24 ^B	2762.9 ^{aA}	2732.4 ^{aA}
Trigo:Garbanzo 60:40	2142.6 ^{bC}	3029.0 ^{aB}	3328.2 ^{aA}	978.5 ^{bC}	1345.2 ^{bB}	1494.2 ^{bA}

* Letras minúsculas en la misma columna representan diferencia entre tratamientos el mismo día y letras mayúsculas en la misma fila representan diferencias entre días de almacenamiento del mismo tratamiento en relación con la variable correspondiente (dureza o fracturabilidad) con un valor $p < 0.05$.

* Lowercase letter in the same column represent difference between treatments, and capital letter in the same row represent differences between storage days of the same treatment with a p-value < 0.05.

4. Conclusiones

La extrusión del grano de garbanzo es una tecnología que permite generar una harina que puede ser utilizada para sustituir en un 40 % la harina de trigo en galletas. Si bien reduce el valor de índice de expansión en la galleta, da lugar a un producto con la misma estabilidad microbiológica en un tiempo de almacenamiento de 12 días. Es una galleta 45 % más frágil y 7 % más dura que una galleta de trigo después de 12 días de almacenamiento, pero con 5 % más de digestibilidad proteica, 75 % más de proteína y el 12 % de sus calorías provienen de estas proteínas por lo que se puede considerar buena fuente de proteína. Esta galleta puede ser una opción fuente de proteína para consumo en almuerzo o merienda para niños o adolescentes.

Conflicto de interés

Los involucrados en la presente investigación y los resultados obtenidos de la misma, declaramos no tener ningún conflicto de interés real, potencial o evidente en relación con la ejecución de ningún proyecto.

5. Referencias

- AACC. (2017). Method 76-21-02 General pasting method for wheat or rye Flour of starch using the Rapid Visco Analyser. AACC International Approved Methods. St. Paul, MN. <https://doi.org/10.1094/aaccintmethod-76-21.01>
- Arepally, D., Reddy, R. S., Goswami, T. K., & Datta, A. K. (2020). Biscuit baking: A review. *LWT*, 131, 109726. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109726>
- Balet, S., Guelpa, A., Fox, G., & Manley, M. (2019). Rapid Visco Analyser (RVA) as a tool for measuring starch-related physiochemical properties in cereals: A review. *Food Analytical Methods*, 12, 2344-2360. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01581-w>
- Chavez-Murillo, C. E., Aceves-Flores, M. S., Verástegui-Quevedo, M., & De la Rosa-Millán, J. (2021). sInfluence of starch and protein molecular interactions on the *in vitro* digestion characteristics of biscuits partially substituted with pulse flours. *International Journal of Food Science and Technology*, 56 (7), 3388–3399. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14963>
- Coria-Páez, A. L., Galicia-Haro, E. F., & Ortega-Moreno, I. C. (2021). Innovación y competitividad en el sector alimentario en tiempos de COVID-19: Alimentos funcionales nuevas oportunidades de negocio. *Repositorio De La Red Internacional De Investigadores En Competitividad*, 14 (14). <https://riico.net/index.php/riico/article/view/1937>
- Cortés-Ceballos, E., Perez-Carrillo, E., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Addition of Sodium Stearoyl Lactylate to Corn and Sorghum Starch Extrudates Enhances the Performance of Pregelatinized Beer Adjuncts. *Cereal Chemistry*, 92 (1), 88-92. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-14-0017-CESI>
- Dai, Y., Liu, Y., Zhu, S., Li, Y., & Huang, D. (2024). Lactobacillus fermented chickpeas: Improving dough process quality and biscuit nutritional value. *Food Bioscience*, 62, 105404. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105404>
- De la Rosa-Millán, J., Perez-Carrillo, E., Guajardo-Flores, S. (2017). Effect of germinated black bean cotyledons (*Phaseolus vulgaris*) as an extruded flour ingredient on physicochemical characteristics “in vitro” digestibility starch and protein of nixtamalized blue maize cookies. *Starch*, 69(3-4), 1600085. <https://doi.org/10.1002/star.201600085>
- Delgado-Murillo, S. A., Zazueta-Morales, J. de J., Quintero-Ramos, A., Castro-Montoya, Y. A., Ruiz-Armenta, X. A., Limón-Valenzuela, V., & Delgado-Nieblas, C. I. (2024). Efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades fisicoquímicas, fitoquímicas, y de cocción de pastas libres de gluten elaboradas a partir de harinas de arroz quebrado y garbanzo. *Biotechnia*, 26, e2142. <https://biotechnia.unison.mx/index.php/biotechnia/article/view/2142>
- Delgado-Andrade, C., Olías, R., Marín-Manzano, M. C., Seiquer, I., & Clemente, A. (2024). Chickpea Seed Flours Improve the Nutritional and the Antioxidant Profiles of Traditional Shortbread Biscuits: Effects of In Vitro Gastrointestinal Digestion. *Antioxidants*, 13(1), 118. <https://doi.org/10.3390/antiox13010118>

- Felisiak, K., Przybylska, S., Tokarczyk, G., Tabaszewska, M., Słupski, J., & Wydurska, J. (2024). Effect of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Flour Incorporation on Quality, Antioxidant Properties, and Bioactive Compounds of Shortbread Cookies. *Foods*, 13(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/foods13152356>
- Feyera, M. (2020). Review on some cereal and legume based composite biscuits. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 6(2), 101-109. <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000062>
- Goubgou, M., Songré-Ouattara, L. T., Bationo, F. Lingani-Sawadog, H., Traoré Y., & Savadogo A. (2021). Biscuits: a systematic review and meta-analysis of improving the nutritional quality and health benefits. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3, 26. <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00071-z>
- Herrera A, C., & Gonzalez de Mejia, E. (2021). Feasibility of commercial breadmaking using chickpea as an ingredient: Functional properties and potential health benefits. *Journal of Food Science*, 86(6), 2208-2224. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15759>
- Hsu, H. W., Vavak, D. L., Satterlee, L. D., & Miller, G. A. (1977). A multienzyme technique for estimating protein digestibility. *Journal of Food Science*, 42(5), 1269-1273. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb14476.x>
- Jiang, Y., Li, D., Tu, J., Zhong, Y., Zhang, D., Wang, Z., & Tao, X. (2021). Mechanisms of change in gel water-holding capacity of myofibrillar proteins affected by lipid oxidation: The role of protein unfolding and cross-linking. *Food Chemistry*, 344, 128587. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128587>
- Köksel, H., & Gökmen, V. (2008). Chemical reactions in the processing of soft wheat products. In: Gülüm-Sumnu, S., & Sahin, S. (Eds). *Food engineering aspects of baking sweet goods*. (pp. 49-80). CRC Press. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781420052770_A25106650/preview-9781420052770_A25106650.pdf
- Kumar, K. A., Sharma, G. K., Khan, M. A., & Semwal, A. D. (2016). A study on functional, pasting and micro-structural characteristics of multigrain mixes for biscuits. *Journal of Food Measurement and Characterization* 10, 274–282. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9304-5>
- Liu, K., Ao, X., Jiang, P., Fu, B., Qi, L., Wen, C., & Shang, S. (2025). Effects of dry heating and extrusion on physicochemical properties, in vitro digestibility and instant properties of rice, chickpea, and oat flour. *Food Bioscience*, 69, 106929. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106929>
- Lu, L., He, C., Liu, B., Wen, Q., & Xia, S. (2022). Incorporation of chickpea flour into biscuits improves the physicochemical properties and in vitro starch digestibility. *LWT*, 159, 113222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113222>
- NMX-F-066-S-1978. Determinación de cenizas en alimentos.
- NMX-F-083-1986 Alimentos-Determinación de humedad en productos alimenticios. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de julio de 1986.

- NMX-F-089-S-1978 Determinación de extracto etéreo (método soxhlet) en alimentos. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de noviembre de 1978.
- Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994 Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de diciembre de 1995.
- Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994 Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 1995.
- Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994 Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de agosto de 1995.
- Norma Oficial Mexicana NOM-F-68-S-1980. Alimentos Determinación de Proteínas, (esta Norma cancela la NOM-F-68-1977).
- NORMA Oficial Mexicana NOM-F-90-S-1978 Determinación de Fibra Cruda en Alimentos.
- Parlamento Europeo (2006). Reglamento (CE) No. 1924/2006 Del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de diciembre de 2006 relativo a las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables de los alimentos. Diario Oficial de la Unión Europea L 404 de 30 de diciembre de 2006. <https://www.boe.es/doue/2006/404/L00009-00025.pdf>
- Romani, S., Rocculi, P., Tappi, S., & Dalla Rosa, M. (2016). Moisture adsorption behavior of biscuit during storage investigated by using a new Dynamic Dewpoint method. *Food Chemistry*, 195, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.114>
- SADR, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2024). El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) desarrolló la variedad Seri como una opción de siembra para las regiones productoras del noroeste y centro-occidente de México. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/presentan-garbanzo-mexicano-resistente-a-sequia-y-enfermedades?idiom=eS>
- Silvestre-De León, R., Espinosa-Ramírez, J., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E., & Serna-Saldívar, S. O. (2020). Biocatalytic degradation of proteins and starch of extruded whole chickpea flours. *Food and Bioprocess Technology* 13, 1703-1716. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02511-z>
- Soto-Toloza, E. P., Mora-Acevedo, S. N., & Caballero-Pérez, L. A. (2023). Efecto de la sustitución parcial de harina de trigo (*Triticum vulgare*) por harina de garbanzo (*Cicer arietinum* L) en las características sensoriales de una galleta dulce. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 14(1), 39-54. <https://doi.org/10.24054/raaas.v14i1.2747>
- SSA, Secretaría de Salud (2024). Alimentación saludable. <https://www.gob.mx/salud/en/articulos/alimentacion-saludable#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20Encuesta,poblaci%C3%B3n%20infantil%20es%20del%2038.2%25>

- Vargas-Blandino, D., & Cárdenas-Travieso, R. M. (2021). Cultivo del garbanzo, una posible solución frente al cambio climático. *Cultivos Tropicales*, 42(1), e09. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1583>
- Wang, X., Lu, L., Hayat, K., & Xia, S. (2024). Effect of chickpea thermal treatments on the starch digestibility of the fortified biscuits. *Food Bioscience*, 61, 104794. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104794>
- Yamsaengsung, R., Berghofer, E., & Schoenlechner, R. (2012). Physical properties and sensory acceptability of cookies made from chickpea addition to white wheat or whole wheat flour compared to gluten-free amaranth or buckwheat flour. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(10), 2221-2227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03092.x>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Scientific article

Effect of incorporation of candelilla wax oleogel on the structural properties of cake-type bread

Efecto de la incorporación de oleogel de cera de candelilla sobre las propiedades estructurales de pan tipo panqué

Gilda Avendaño-Vásquez¹, Bryan Ochoa-Martínez², Karen Aylin Vargas-García², Juan René González-Romero², Miguel Angel García-Muñoz³, Elizabeth del Carmen Varela-Santos^{2*}

¹SECIHTI -TecNM/ITS de Tierra Blanca. Maestría en Ciencias en Alimentos y Biotecnología. Av. Veracruz s/n, 95180 Tierra Blanca, Veracruz, Mexico.

² TecNM/ITS de Tierra Blanca. Maestría en Ciencias en Alimentos y Biotecnología. Av. Veracruz s/n, 95180 Tierra Blanca, Veracruz, Mexico.

³ Centro de Investigaciones Científicas, Instituto de Biotecnología, Universidad del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca, México

*Correspondencia: Correo electrónico: e.varela@itsb.edu.mx (Elizabeth del Carmen Varela-Santos)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1919>

Recibido: 30 de abril de 2025; Aceptado: 23 de septiembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Esther Pérez-Carrillo

Abstract

The negative health effects associated with foods containing saturated and *trans* fats have prompted the search for healthier alternatives that preserve both sensory and technological quality. This study evaluated the use of candelilla wax-structured oleogels as substitutes for hydrogenated fats in cake-type bread, with emphasis on batter structure and crumb texture. The iodine value of the edible oils and the one with the most favorable unsaturation profile was selected to formulate the oleogel used and the oil and water adsorption capacity of three selected flours were determined. Among them, flour H2 exhibited consistent oil adsorption across the three types of oil tested, with no significant differences compared to the water control, suggesting a more stable interaction with lipid components. Therefore, it was used for cake-type bread. Formulations were assessed for batter density, baking yield, total porosity, mean pore size, and instrumental texture parameters (hardness, cohesiveness, elasticity, adhesiveness, stickiness, and chewiness). Oleogel-based batters showed higher density (0.90 g/cm³) and lower baking yield (13 %), indicating a more compact structure. No significant differences were observed in total porosity ($\approx$ 0.3–0.8 %) or mean pore size (8.4–17.5 mm) compared to those made with shortening. However, the presence of smaller ($\approx$ 8.4 mm) and more uniform pores in oleogel formulations reinforced the internal crumb structure and reduced

susceptibility to deformation, thereby preserving mechanical integrity. Regarding texture, oleogel formulations exhibited a more cohesive and elastic crumb, supporting their use as a functional alternative in baked goods.

Keywords: oleogel, hydrogenated fat, cake-like bread, functional properties, technological quality.

Resumen

Los efectos negativos de alimentos que contienen grasas saturadas y *trans* demandan la búsqueda de alternativas saludables que conserven calidad sensorial y tecnológica. El uso de oleogeles estructurados con cera de candelilla como sustituto de grasas hidrogenadas en pan tipo panqué con énfasis en las propiedades estructurales fue estudiado. Se determinó el índice de yodo en los aceites comestibles, eligiendo el de mejor perfil de insaturación para formular el oleogel y la capacidad de adsorción de aceite y agua en tres harinas seleccionadas. Para las formulaciones se evaluó la densidad de la masa, rendimiento de horneado, calidad de miga (distribución y tamaño de poro) y textura instrumental (dureza, cohesión, elasticidad, adhesividad, pegajosidad y masticabilidad). La harina H2 mostró un comportamiento de adsorción de aceite constante entre los tres tipos de aceite evaluados, sin diferencias significativas respecto al control con agua, lo que sugiere una interacción más estable con componentes lipídicos relevantes. Por lo que se seleccionó para el pan tipo panqué. Las formulaciones con oleogel exhibieron mayor densidad de masa (0,90 g/cm³) y menor rendimiento de horneado (13 %). No se observó diferencia significativa en la porosidad total ($\approx 0,3$ – $0,8$ %) y el tamaño medio de poro (8,4–17,5 mm) en comparación con la de manteca. Adicionalmente, los poros más pequeños ($\approx 8,4$ mm) y uniformes observados en las formulaciones con oleogel, en comparación con los poros más grandes ($\approx 17,5$ mm) en las formulaciones con manteca, reforzaron la estructura interna y redujeron la susceptibilidad a la deformación, preservando la integridad mecánica. En cuanto a la textura, se observó una miga más cohesiva y elástica en las formulaciones con oleogel, lo que respalda su uso como alternativa funcional en panificación.

Palabras clave: oleogel, grasa hidrogenada, pan tipo pastel, propiedades funcionales, calidad tecnológica.

1. Introduction

Flour, raising agents, fats, and oils are the key functional components in baking, as variations in these ingredients can significantly affect texture and flavor (Raghavendra et al., 2022). Wheat flour typically consists of approximately 72 % carbohydrates, 8–13 % protein, 12–13 % moisture, 2.5 % sugar, 1.5 % fat, 1.0 % soluble protein, and 0.5 % mineral salts (Sunil et al., 2019). Its functionality depends on the milling characteristics; for example, soft wheat is used in cakes, pastries, cookies, crackers, and oriental noodles, while durum wheat is used in breads (Chandra and Samsher, 2013).

Vegetable shortenings are solid fats at room temperature, manufactured through the hydrogenation of oils such as soybean, corn, palm, or cottonseed. The hydrogenation process increases fat content to nearly 100 % and eliminates cholesterol, improving product stability and handling in industrial applications (Raghavendra et al., 2022). The use of vegetable fat instead of butter in the formulation

of the dough prevents the formation of a compact and rigid crumb structure, as well as the greater development of gluten strands, which affects the softness and elasticity of the bread (Buehler, 2021). This inhibition results in a lighter, spongier dough, although with reduced flavor. The presence of emulsifiers in vegetable fats helps stabilize nitrogen-filled gas bubbles, dissolve the fat particles, improve air incorporation, and enhance overall texture (Zou et al., 2022). However, vegetal fats also contain *trans* fatty acids, which have been linked to increased cardiovascular risk (Raghavendra et al., 2022). Therefore, replacing solid fats with edible oleogels composed of unsaturated vegetable oils has gained traction.

Structuring of vegetable oils into edible oleogels is a promising approach to reduce *trans* and saturated fat intake. Oleogels are semi-solid materials obtained by incorporating liquid vegetable oils into a structured network formed by gelling agents (Quiles Chuliá et al., 2022). Natural waxes, such as candelilla wax, beeswax, and carnauba wax, act by creating crystalline networks or three-dimensional structures that physically immobilize lipids, thereby conferring a consistency similar to that of solid fats on oils (Patel et al., 2014). Candelilla wax is particularly noteworthy due to its low cost, plant-based origin, high melting point, and excellent compatibility with edible oils, making it an ideal candidate for food applications. This structuring capability enables the development of healthier lipid matrices with reduced levels of *trans* and saturated fatty acids, without compromising desirable technological properties such as plasticity, aeration, and stability of the final product (Oh and Lee, 2018).

In baking, oleogels can replace solid fats like margarine and butter in breads, pastries, and cookies. However, their lower viscosity compared to shortenings may hinder air incorporation, reduce dough firmness, and increase density (Patel et al., 2014). Oleogels also tend to form larger, unevenly distributed air cells (Oh and Lee, 2018), a phenomenon associated with the flour's oil absorption capacity and its structural role in dough formation. While liquid oils are often preferred by health-conscious consumers, their direct use in cake-type formulations presents technological challenges. Due to their fluid nature and lack of plasticity, liquid oils are unable to retain air effectively during mixing, which compromises batter aeration, crumb structure, and overall texture. In contrast, oleogels offer a semi-solid matrix that mimics the functionality of traditional fats, enabling better air retention, improved pore distribution, and enhanced mechanical integrity. This makes oleogels a more suitable alternative than liquid oils in baked goods where structural performance is critical (Puscas et al., 2020).

Functional properties are primarily physicochemical interactions between food composition, structure, and molecular conformation. These interactions influence measurable attributes such as solubility, water retention, foaming capacity, elasticity, and absorption capacity of fats and foreign bodies. The typical functional properties include emulsification, hydration (water binding), viscosity, foaming, solubility, gelation, cohesion, and adhesion (Okaka and Potter, 1977; Sunil et al., 2019). Oil absorption capacity (OAC) is an important functional property of foods, particularly pulse flours and proteins. This property influences flavor, texture, mouthfeel, and overall product performance (Seena and Sridhar, 2005). This capacity is primarily due to the physical entrapment of oil within proteins, as well as non-covalent interactions such as hydrophobic, electrostatic, and hydrogen bonding that occur between lipids and proteins (Farooq and Boye, 2011). Additionally, oil absorption is linked to the binding of nonpolar amino acid side chains in proteins to the hydrocarbon chains of the oil (Lin et al., 1974).

OAC also contributes to improving the mouthfeel and maintaining the flavor of food products (Iwe et al., 2016). High-protein foods exhibit a considerably high oil absorption rate, which enhances their performance in various applications. The oil absorption capacity depends on intrinsic factors such as protein conformation, amino acid composition, and the polarity or hydrophobicity of the protein surface (Chandra and Samsher, 2013). Due to these characteristics, flours with good OAC are especially useful in the production of products such as pastries, sausages, and other foods where optimal oil absorption is desired, thus improving texture and flavor (Chandra and Samsher, 2013). These properties make flours with high oil absorption capacity valuable functional ingredients in products such as sausages, whipped toppings, cakes, pies, and desserts (Awuchi et al., 2019).

Porosity, defined as the distribution and size of air cells within the crumb, is a critical structural parameter in cake-type products. This characteristic directly influences the texture, softness, and sensory perception of the final product. The substitution of traditional fats with oleogels may impact this parameter, as the ability to incorporate and retain air during mixing is altered, which consequently affects bubble formation and stability during baking (Oh and Lee, 2018). Therefore, it is essential to assess how these substitutions modify the internal structure of the product and whether they compromise its consumer acceptability.

Additionally, Giacomozzi et al. (2018) reported that substituting commercial margarine with oleogels in muffins improved spreadability, increased specific volume, maintained comparable hardness, and yielded a more connected and homogeneous crumb structure. Oleogels based on stearyl lactylate have been shown to mimic the crystalline network functionality of triacylglycerols in bread matrices Meng et al. (2018), while ethylcellulose oleogels have produced breads with stable soft textures Jung et al. (2020). These studies focused on synthetic emulsifiers or imported structuring agents that are renewable. This research explores plant-based materials native to the arid regions of Mexico and evaluates their potential to replace conventional fats commonly used in regional bakery formulation.

Despite increasing interest in oleogels as fat substitutes, limited research has focused on their effect on the structural properties of cake-type bread, particularly when formulated with candelilla wax and corn oil or popular commercial oils. Although numerous studies have explored the role of oleogels in improving the nutritional profile of baked goods, few have considered the influence of flour's oil absorption capacity in optimizing crumb structure and porosity. This parameter, often overlooked, may significantly affect the interaction between lipid systems and the starch-protein matrix, especially under real-world baking conditions. The objective of this study was to evaluate the effect of using candelilla wax-structured corn oil oleogels as a substitute for hydrogenated fats in cake-type bread, focusing on the structural properties as well as the relevant applications in the baking industry, where controlling the quantity and type of fats can be key to the mass production of breads with specific properties.

2. Materials and methods

2.1 Raw material

Shortening INCA (ACH Foods México, S. de RL de CV), edible corn vegetable oil PATRONA (Industrial Patrona SA de CV), canola CAPULLO (ACH Foods México, S. de RL de CV), soy

NUTRIOLI (Ragasa Industrias, SA de CV), as well as candelilla wax (CC) (Alkento Ingredientes, Monterrey - NL, Mexico), were purchased from local stores, and corn oleogel, the formulation of which will be described in the following section. All-purpose wheat flour in three trademarks: Chedraui® Quality (H1), San Blas (La Italiana Industrial Group) (H2), and San Antonio (Harinera los Pirineos, SA de CV) (H3).

2.2 Determination of iodine value in edible oils

The Iodine Value of three edible vegetable oils and hydrogenated shortening (SH) was determined using the Wijs method, according to the Official AOAC Method 920.158. Approximately 0.3 g of each oil sample was accurately weighed and transferred to a 250 mL iodine flask. Then, 25 mL of Wijs reagent (iodine monochloride in glacial acetic acid) was added, and the flask was sealed and kept in the dark at room temperature for 30 minutes to allow the reaction to proceed.

Following the incubation period, 20 mL of potassium iodide solution (10 %) and 100 mL of distilled water were added. The liberated iodine was titrated with standardized 0.1 N sodium thiosulfate solution using starch as an indicator. A blank determination was performed under identical conditions.

The iodine value was calculated based on the volume of titrant consumed and expressed as grams of iodine absorbed per 100 g of oil sample. All reagents used were analytical grade. The sodium thiosulfate solution was calibrated daily against a potassium dichromate primary standard, and all measurements were performed in triplicate to ensure analytical reliability.

2.3 Determination of the water and oil adsorption index in all-purpose flour

It was determined by the method proposed by Beuchat, 1977, weighing 1 g of the sample with 10 mL of distilled water or oil in 50 mL centrifuge tubes, then the tubes were centrifuged at 5000 rpm for 30 min. The volume of the decanted supernatant was measured, and the milliliters of water or oil absorbed were calculated according to Eq. (1).

$$\text{OAC} = (\text{Gel weight (g)}/\text{Sample weight (g)}) \quad \text{Eq. 1}$$

2.4 Oleogel formulation

The oleogel (OM) was made with edible vegetable oil from PATRONA corn (Industrial Patrona SA de CV) and 5 % w/w of precipitated CC and was brought to a temperature of 68-72 °C with stirring at 350 rpm until the wax was completely dispersed in the oil according to Demirkesen and Mert, (2020)., stored for 24 h $\pm$ 4 °C, covered with aluminum foil to promote complete crystallization for later use in bread making.

2.5 Preparing cake bread

The cakes were prepared according to the methodology of Álvarez-Ramírez et al. (2020), which includes flour, sugar, fat (shortening or corn oleogel), whole milk, egg, and chemical reagents purchased from the local market for the present study. The ingredients were weighed and added sequentially to the mixer (Oster®, model FPSTHS3611, 6 speeds, 250 watts of power, and 3.7 L capacity), beaten for 1 minute at speed 4 and 9 minutes at speed 6. Once the batter was obtained, 60 g of batter was placed in reusable aluminum molds and baked at 190 °C for 30 min. The resulting cakes were left to cool at room temperature and then placed in high-domed plastic containers for preservation during the study period.

2.6 Determination of cake dough density and baking yield

Cake batter density was calculated as the ratio between the weight of the batter and the weight of the equivalent volume of distilled water, following the method of (Vázquez and Hernández, 2023). To determine this, 60 g of cake batter was weighed in a previously calibrated container and compared to the weight of an equal volume of distilled water at room temperature. The density was calculated using Eq. 2:

$$\text{Density (g/cm}^3\text{)} = \text{Weight of batter} / \text{Weight of same volume of water} \quad \text{Eq. (2)}$$

Baking yield was assessed gravimetrically by weight loss in cakes immediately after baking and again after 24 hours of cooling at room temperature according to Anjali et al. (2023) and calculated using Eq. (3):

$$\text{Baking yield (\%)} = [(\text{Initial weight} - \text{Final weight}) / \text{Initial weight}] \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

2.7 Determination of bread porosity

The cake-like bread formulated with corn oleogel was sliced vertically as shown in Fig. 1 to a dimension of 15 mm. The porosity of the bread was determined by image processing. An L5190 scanner (Epson America, Inc.) and the ImageJ 1.54g image processor (National Institute of Health, USA) were used, following the proposal by Petrusha et al. (2017).



Figure 1. Vertical cut of the cake-like bread piece performed to expose the internal crumb for porosity analysis. The sectioning was carried out along the central axis to ensure representative sampling of air cell distribution.
Figura 1. Corte vertical de una porción de pan tipo panqué para exponer la miga interna y analizar su porosidad. El corte se realizó a lo largo del eje central para garantizar una muestra representativa de la distribución de las burbujas de aire.

2.8 Texture analysis

Texture analysis was performed using a CT3 texture analyzer (Brookfield, Middleboro, MA 02346, USA), following the methodology reported by García-Ortega et al. (2021). A cylindrical probe with a diameter of 75 mm was used, operating at a constant test speed of 1.5 mm/s and applying a 10 % compression to the sample. Before the analysis, each experimental unit was conditioned by a uniform horizontal cut, completely removing the crust to expose the inner crumb. To standardize the measurements, all samples were prepared to a height of 2 cm. Stickiness and chewiness values were obtained using Equations 4 and 5, respectively, based on the data collected by the equipment (adhesiveness, hardness, cohesiveness, elasticity). Additionally, the specific volume was calculated as the inverse of dough density ($1/\rho$),

$$\text{Stickiness} = \text{Hardness} \times \text{Cohesiveness} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\text{Chewiness} = \text{Hardness} \times \text{Cohesiveness} \times \text{Elasticity} \quad \text{Eq. (5)}$$

2.9 Statistical analysis

The data obtained from the various experiments were recorded during the study and subjected to statistical analysis using the ANOVA method. Significant differences between means were tested against the critical difference at the 5 % significance level using Statistica software (StatSoft, 2011) version 10.

3. Results and discussion

3.1 Characterization of the raw material

The iodine index values are shown in Table 1, with corn oil exhibiting the highest level of polyunsaturated fatty acids. As an indirect measure of the number of double bonds in fatty acids, it reflects the degree of unsaturation, primarily oleic and linoleic acids. Consequently, corn oil exhibits lower oxidative stability (Sanders, 2003), consistent with its elevated iodine index. This outcome may also be attributed to the extraction method, specifically pressing and refining, which helps preserve the nutritional properties of the oil.

Such characteristics make corn oil a suitable candidate for partial hydrogenation, as evidenced by the decreased iodine value following this process (Table 1). However, it is well documented that partial hydrogenation promotes the formation of *trans* fatty acids (Thirumdas, 2023), raising nutritional concerns.

Overall, the elevated iodine value in corn oil aligns with its higher unsaturation level and matches the broader trends observed among the evaluated oils. In general, oils with higher iodine values contain greater proportions of highly unsaturated fatty acids, which are more susceptible to degradation reactions such as autoxidation and polymerization. These reactions are accelerated during baking due to the high temperature and exposure to dissolved oxygen. Therefore, from a technological perspective, fats and oils with lower iodine values are often preferred in baking applications to improve oxidative stability and reduce the risk of quality deterioration.

Table 1. Average iodine index values of the oils evaluated in this study, determined to characterize the degree of unsaturation and support the selection of lipid sources for formulation purposes.

Tabla 1. Valores promedio del índice de yodo de los aceites evaluados en este estudio, determinados para caracterizar el grado de insaturación y respaldar la selección de fuentes lipídicas con fines de formulación.

Sample	Iodine Index (g I ₂ /100g oil)*	Tiefenbacher, 2017; Pavlovich-Abril <i>et al.</i> (2009)†
Soy	128.79 ± 9.3	124-139
Corn	158.84 ± 5.7	107-135
Canola	112.03 ± 5.7	105-125
SH	47.95 ± 2.45	43

SH: Shortening.

* Mean ± standard deviation, n=3.

3.1.1 Study of water and oil adsorption in all-purpose flours

Fig. 2 shows that the water adsorption behavior across the three commercial wheat flours did not differ significantly, indicating similar structural and compositional characteristics likely due to their shared origin. Moreover, no significant difference was observed in the adsorption capacity of soybean and canola oils regardless of the flour evaluated. In contrast, flour H3 exhibited the highest oil adsorption capacity to corn oil, followed by H1 and H2.

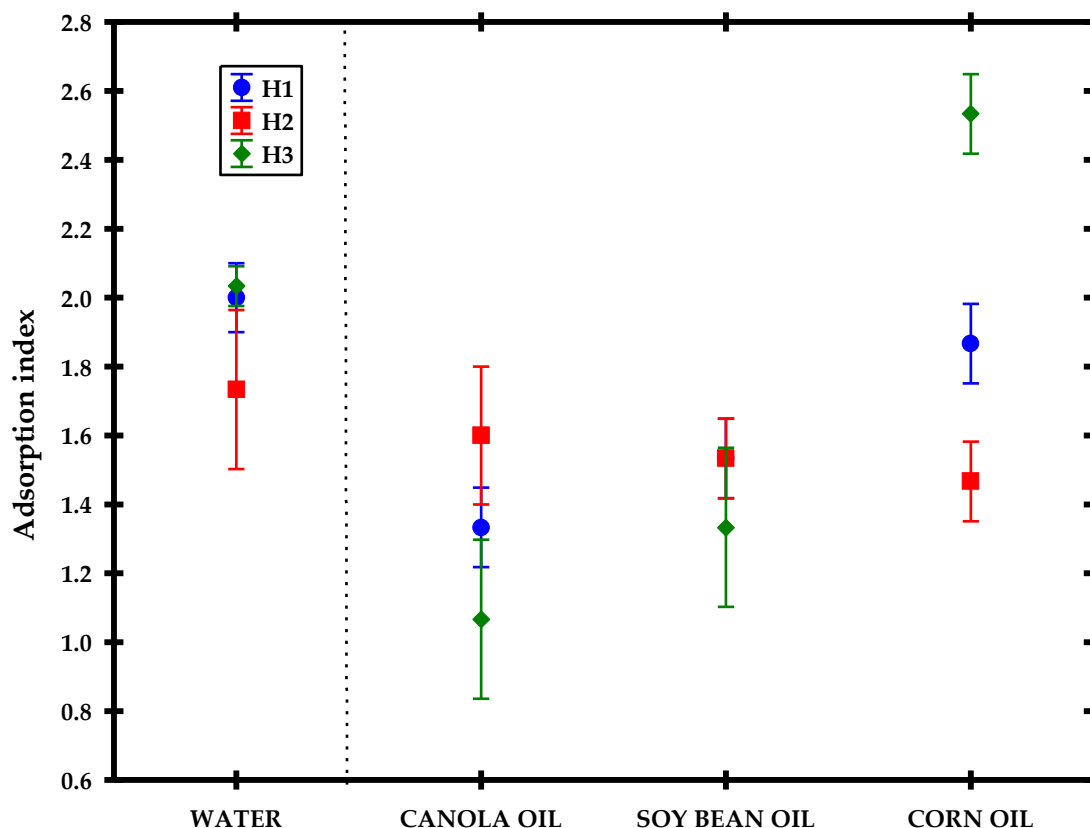


Figure 2. Water and oil adsorption index of three brands of all-purpose flour (H1, H2, H3) using corn, soybean, and canola oils, as well as water. Blue circles, red squares, and green diamonds represent flour brands H1, H2, and H3, respectively. Error bars indicate standard deviation. Differences in adsorption behavior reflect the interaction between flour composition and liquid type.

Figura 2. Índice de adsorción de agua y aceite de tres marcas de harina para todo uso (H1, H2, H3) utilizando aceites de maíz, soja y canola, así como agua. Los círculos azules, los cuadrados rojos y los rombos verdes representan las marcas de harina H1, H2 y H3, respectivamente. Las barras de error indican la desviación estándar. Las diferencias en el comportamiento de adsorción reflejan la interacción entre la composición de la harina y el tipo de líquido.

In addition, oil absorption index (OAC) has been attributed to the physical entrapment of oil within proteins and non-covalent interactions (Tabara et al., 2015). A preliminary reference obtained a single Kjeldahl determination (AOAC 992.23) to guide the selection of the most appropriate flour for cake-

type bread formulation. Results showed that H3 had higher protein content (9.53 %) in comparison with than H2: (7.02 %) and H1 (6.65 %), which helps explain the corn oil adsorption mechanism taking in account that the ability of the proteins to bind oil makes these flours worthwhile in food systems where optimal oil absorption is desired (Chandra and Samsher, 2013).

However, although H3 flour showed the highest protein content and the highest oil adsorption capacity with corn oil, this does not guarantee the stability of cake-type breads, since its inclusion could generate an undesirable waxy or greasy flavor profile due to the high interaction with oleogels, compromising their sensory acceptability (Yılmaz and Ögütcü, 2015). In contrast, H2 flour showed greater stability and/or the best oil adsorption profile regardless of the oil evaluated. This stability favors better interaction with lipid matrices, including oleogels and hydrogenated fats, which could improve the crumb texture, mouthfeel, and sensory quality of the product; therefore, it was selected for subsequent cake-type bread formulation trials.

3.2 Effect of oil adsorption on the porosity of cake-type bread.

Considering that fats and oils influence the texture and softness of cakes by tenderizing the crumb, lubricating the dough during mixing, and providing a moist mouthfeel, the density of the batter plays a key role in evaluating baking performance and gas retention capacity (Rathnayake et al., 2018). Table 2 presents the density of cake dough (ρ) formulated with oleogel matrix (OM) and shortening (SH), as described in section 2.6. OM-based batters exhibit higher density, indicating reduced air incorporation and thus lower aeration potential compared to SH. It was incorporated when using oleogel, and thus has a lower aeration capacity compared to SH. This also correlated with the lower oven loss observed in OM samples. Similar behavior was evidenced by (Vázquez and Hernández, 2023), who obtained similar results comparing breads made from margarines and oil/margarine mixtures.

Table 2. Density and oven yield of cake doughs formulated with different fats, highlighting the influence of lipid type on physical performance during baking.

Tabla 2. Densidad y rendimiento en horno de las masas tipo pastel formuladas con diferentes grasas, destacando la influencia del tipo de lípido en el desempeño físico durante el horneado.

Sample	Density (ρ , g/cm ³)*	% Baking yield *
OM	0.90 $\pm$ 0.01a	13 $\pm$ 5.15a
SH	0.75 $\pm$ 0.01b	38 $\pm$ 4.30b

*Mean $\pm$ standard deviation, n=3. In the case of batter density, replicates yielded highly consistent results, with minimal variation observed.

Different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

Additionally, the percentage of weight loss was higher in SH doughs than in those formulated with OM, indicating that a greater amount of air was retained in the dough during baking in the presence of SH. This is supported by the visual comparison in Fig. 3, which reveals the formation of larger pores in OM samples compared to those observed in SH formulations. This phenomenon is

attributed to the oleogels composition, as it is a material formed mostly by oil. During creaming, air bubbles are dispersed into the fat phase and are stabilized by fat crystals, meaning that the composition and properties of the fat directly affect the aeration. Consequently, OM tends to produce doughs with a higher proportion of open pores, while SH promotes the formation of closed pores that accelerate moisture transport, ultimately leading to a loss of crispy texture in the final product (Esveld et al., 2012).

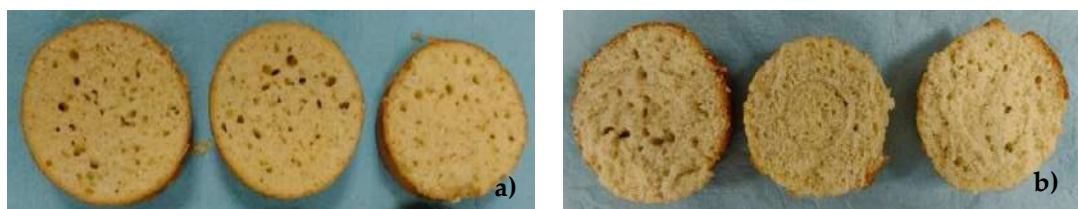


Figure 3. Comparative visual assessment of cake-type bread samples from treatments a) OM and b) SH, highlighting differences in crumb structure and surface characteristics to evaluate the impact of lipid source on product morphology.

Figura 3. Evaluación visual comparativa de muestras de pan tipo panqué de los tratamientos a) OM y b) SH, en la que se destacan las diferencias en la estructura de la miga y en las características de la superficie para evaluar el impacto de la fuente de lípidos en la morfología del producto.

Nonetheless, doughs produced with oleogels were less plastic and more difficult to handle and shape than those produced with shortenings. This defect was associated with the consistency loss suffered by oleogels during shearing during mixing (Mert and Demirkesen, 2016). Moreover, there are currently no available fat substitutes for *trans* and saturated fats that replicate the plasticity required for the formulation of margarines and spreads (Patel et al., 2020). The effect of replacing SH with OM on aeration was investigated in terms of porosity, as observed in Fig. 4 for cakes formulated with SH.

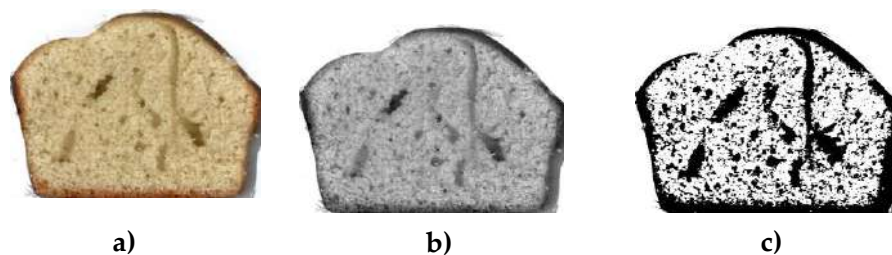


Figure 4. Determination of porosity by image analysis in SH: a) original image; b) 16-bit grayscale image; c) binarized image with percentages associated with porosity.

Figura 4. Determinación de la porosidad mediante análisis de imágenes en SH: a) imagen original; b) imagen en escala de grises de 16 bits; c) imagen binaria con porcentajes asociados a la porosidad.

Fig. 5A displays the results of the porosity analysis using image processing, where average values of 0.29 ± 0.25 % for corn oleogel (OM) and 0.79 ± 0.27 % were obtained for the formulation with

shortening (SH). Despite this numerical difference, no statistically significant differences were observed between treatments, indicating that the higher batter density in the OM formulation did not significantly affect the overall porosity of the final baked product. The relatively high standard deviations reflect the inherent variability of the samples and the sensitivity of the image-based quantification method. This same trend was observed in the analysis of average pore size (Fig. 5B), where products with OM exhibited smaller and more irregular cells compared to those obtained with SH.

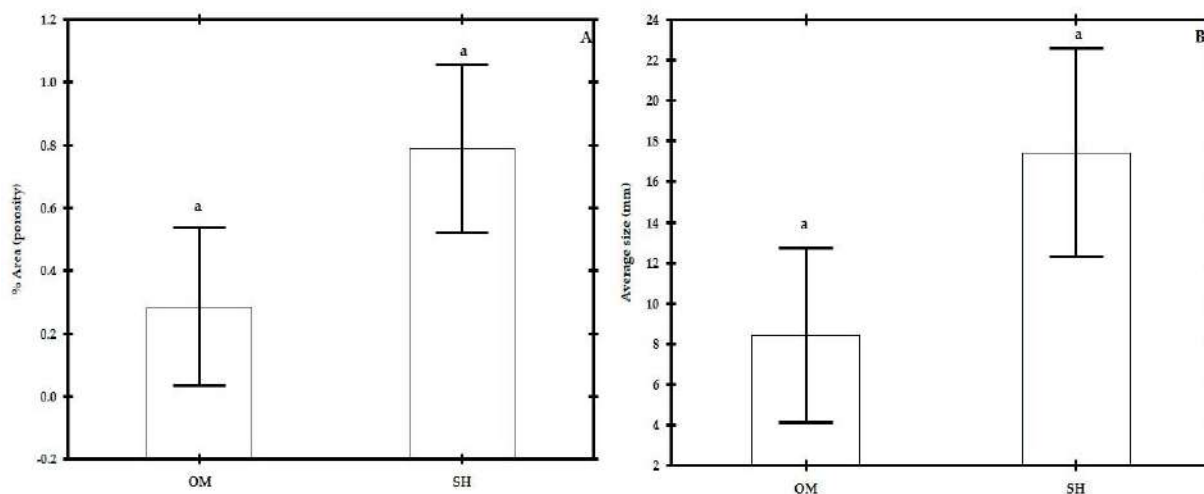


Figure 5. Crumb structure analysis through image processing. (A) Total porosity (%) calculated from binarized cross-sectional images. (B) Average pore size (mm) calculated from segmented pore regions. Values expressed as mean $\pm$ standard deviation ($n = 3$).

Figura 5. Análisis de la estructura de las migas mediante procesamiento de imágenes. (A) Porosidad total (%) calculada a partir de imágenes transversales binarias. (B) Tamaño medio de los poros (mm) calculado a partir de las regiones porosas segmentadas. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$).

According to Rathnayake *et al.* (2018), an ideal crumb structure in bakery products is characterized by high porosity and a uniform distribution of fine gas cells. In this sense, the replacement of SH with oleogel could not fully replicate this structure, likely due to the increased batter density associated with the oil adsorption capacity of the OM system. Although the average pore size was 8.43 ± 4.30 mm for OM and 17.45 ± 5.15 mm for SH, this does not necessarily imply a structural advantage of the SH treatment. As noted by Kim *et al.* (2017), the presence of larger air cells may lead to a less cohesive crumb prone to crumbling, which affects the physical integrity and the characteristic shape of the product. Therefore, although OM formulations had lower overall porosity, the pores formed tended to be smaller and more open, which may contribute to a more stable crumb structure and improved resistance to collapse, offering potential benefits in terms of texture and shelf life.

The replacement of SH with oleogel does not replicate an ideal crumb structure in bakery products characterized by high porosity and a uniform distribution of fine gas cells (Rathnayake *et al.* 2018), likely due to the highest batter density of the OM system. As noted by Kim *et al.* (2017), the presence of larger air cells may lead to a less cohesive crumb prone to crumbling, which affects the physical

integrity and the characteristic shape of the product. Although the average pore size and overall porosity values for OM were lower than those for SH treatment, the pores formed tended to be smaller and more open, which may contribute to a more stable crumb structure and improved resistance to collapse, offering potential benefits in terms of texture. The methodology presented offers a practical framework for scaling healthier lipid matrices in industrial bakery applications. This study offers a methodological framework for selecting flours based on oil adsorption capacity to stabilize oleogel incorporation, an approach rarely considered in cake-type formulations. The potential benefits of this methodology are promising and could lead to significant improvements in bakery product development.

3.3 Study of textural attributes

The complete substitution of shortening with oleogel is related to the porosity normally proven by solid fats (Kim et al., 2024). As shown in Table 3, the OM treatment exhibited significantly higher hardness, stickiness, and chewiness values compared to SH ($p < 0.05$), suggesting a firmer and more compact structure on the cakes.

Table 3. Instrumental texture parameters (hardness, cohesiveness, elasticity, adhesiveness, stickiness, and chewiness) of bread samples formulated under treatments SH and OM.

Tabla 3. Parámetros de textura instrumentales (dureza, cohesión, elasticidad, adhesividad, pegajosidad y masticabilidad) de muestras de pan formuladas con los tratamientos SH y OM.

Treatment	Specific Volume (cm ³ /g)	Hardness (N)	Cohesiveness	Elasticity (mm)	Adhesiveness (mJ)	Stickiness (N)	Chewiness (N)
SH	1.11±0.01a	4.3±0.67a	0.7±0.07a	8.4±0.81a	0.2±0.03a	3.2±0.62a	26.9±7.15a
OM	1.33±0.01b	8.0±0.80b	0.7±0.03a	8.9±0.15a	0.04±0.01b	5.9±0.38b	52.6±2.54b

Results are expressed as mean ± standard deviation. Letters indicate significant differences between treatments for each parameter ($p < 0.05$).

These mechanical properties align with the reduced porosity and smaller pore size seen in Fig. 5, suggesting that a denser microstructure leads to a crumb that requires more chewing due to its stickiness and tends to stick to the palate. However, it is more resistant to fracture than formulations containing SH. Similarly, the specific volume correlates with hardness, where hardness increases as the specific volume decreases; in other words, larger pore size is linked to lower hardness and greater susceptibility to fracture (Alvarez-Ramirez et al., 2020). These studies support the hypothesis that pore size and distribution directly influence mechanical integrity, as smaller and more uniform pores may reinforce the internal structure and reduce susceptibility to deformation. The instrumental texture analysis in this study thus complements the morphological findings. It reinforces the interpretation regarding the mechanical resilience of OM, positioning pore architecture as a critical parameter in functional bread design.

While pore architecture emerges as a key determinant of mechanical resilience, it is important to consider upstream factors that influence its development. One such factor is the oil absorption capacity of the flour, which modulates the distribution and integration of oleogels within the dough

matrix. This property may affect air retention and lipid–starch interactions during mixing and baking, ultimately shaping the microstructure observed in Fig. 5. Although often overlooked, this flour characteristic could explain the differences in crumb density and porosity between formulations.

The correlation between porosity and texture parameters observed in this study reinforces the interpretation of crumb density and air retention. Specifically, formulations with smaller and more uniform pores, as shown in Fig. 5, exhibited higher hardness and lower specific volume, indicating reduced air incorporation and a denser microstructure. These morphological traits are consistent with the instrumental texture results, where increased hardness and adhesiveness suggest a compact crumb with limited expansion. Thus, both analyses morphological and mechanical, converge to support the conclusion that oleogel incorporation, modulated by flour lipid interactions, affects the aeration capacity and structural integrity of cake-type bread. This integrative approach strengthens the reliability of our findings and highlights the importance of considering porosity and texture jointly when evaluating fat substitution strategies.

4. Conclusions

The results of this study show that corn oil oleogels structured with candelilla wax can effectively replace hydrogenated fats in cake-type bread recipes without losing key structural properties. The formulations with oleogels had higher batter density and less baking yield, while still maintaining acceptable porosity and producing a finer, more cohesive crumb. Although oleogels created smaller and less uniform pores compared to shortening, their use did not significantly impact the overall aeration or stability of the final product. These findings support the practical use of oleogels as alternatives in baked goods with high content of saturated fat, where the control of pore size can be to improve mechanical stability in functional bread formulations.

Authors' contributions

Methodology, M.A.G.M.; Software, J.R.G.R.; Research, K.A.V.G.; Data curation, B.O.M.; Writing-original draft, G.A.V.; Writing-review and editing, E.C.V.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments

Our thanks to the Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnologia e Innovacion (SECIHTI) for the scholarships awarded for postgraduate and postdoctoral studies and the Tecnológico Nacional de México, Tierra Blanca Campus, for their support during this research.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest, nor any economic, personal, political, financial, or academic relationships that could influence their judgment. We also declare that we

have not received any monetary benefits, property, or grants from any source that might have an interest in the results of this research.

5. References

- Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J., Carrera-Tarela, Y., Garcia, A., & Roldan-Cruz, C. (2020). Effects of candelilla wax/canola oil oleogel on the rheology, texture, thermal properties and in vitro starch digestibility of wheat sponge cake bread. *LWT*, 130, 109701. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109701>
- Anjali, P. N., Bosco, S. J. D., Navaf, M., & Sunooj, K. V. (2023). Physical Properties of Cereal Grains. In G. A. Nayik, T. Tufail, F. M. Anjum, & M. J. Ansari (Eds.), *Cereal Grains* (1 st editi, pp. 25–47). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003252023-3>
- Awuchi, C. G., Igwe, V. S., & Echeta, C. K. (2019). The functional properties of foods and flours. *International Journal of Advanced Academic Research | Sciences*, 5(11), 2488–9849.
- Buehler, E. (2021). *Bread Science: The Chemistry and Craft of Making Bread* (T. B. Books (ed.)). <https://books.google.com.mx/books?id=RZuczgEACAAJ>
- Chandra, S., & Samsher. (2013). Assessment of functional properties of different flours. *African Journal of Agricultural Research*, 8(38), 4849–4852. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.6905>
- Demirkesen, I., & Mert, B. (2020). Recent developments of oleogel utilizations in bakery products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2460–2479. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1649243>
- Farooq, Z., & Boye, J. (2011). Novel Food and Industrial Applications of Pulse Flours and Fractions. In B. M. Brijesh K. Tiwari, Aoif Gowen (Ed.), *Pulse Foods Processing, Quality and Nutraceutical Applications* (Issue September, pp. 283–323). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-1238-2018-1.00007-0>
- García-Ortega, M. L., Toro-Vazquez, J. F., & Ghosh, S. (2021). Development and characterization of structured water-in-oil emulsions with ethyl cellulose oleogels. *Food Research International*, 150, 110763. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110763>
- Giacomozzi, A. S., Carrín, M. E., & Palla, C. A. (2018). Muffins Elaborated with Optimized Monoglycerides Oleogels: From Solid Fat Replacer Obtention to Product Quality Evaluation. *Journal of Food Science*, 83(6), 1505–1515. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14174>
- Iwe, M. O., Onyeukwu, U., & Agiriga, A. N. (2016). Proximate, functional and pasting properties of FARO 44 rice, African yam bean and brown cowpea seeds composite flour. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1142409>
- Jung, D., Oh, I., Lee, J., & Lee, S. (2020). Utilization of butter and oleogel blends in sweet pan bread for saturated fat reduction: Dough rheology and baking performance. *LWT*, 125, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109194>
- Kim, J. Y., Lim, J., Lee, J., Hwang, H., & Lee, S. (2017). Utilization of Oleogels as a Replacement for Solid Fat in Aerated Baked Goods: Physicochemical, Rheological, and Tomographic Characterization. *Journal of Food Science*, 82(2), 445–452. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13583>

- Kim, S.-H., Jo, Y.-J., Lee, S. H., & Park, S.-H. (2024). Development of Oleogel-Based Fat Replacer and Its Application in Pan Bread Making. *Foods*, 13(11), 1678. <https://doi.org/10.3390/foods13111678>
- Lin, M. J. Y., Humbert, E. S., & Sosulki, F. W. (1974). CERTAIN FUNCTIONAL PROPERTIES OF SUNFLOWER MEAL PRODUCTS. *Journal of Food Science*, 39(2), 368–370. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb02896.x>
- Meng, Z., Keyu, Q., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2018). Effects of thickening agents on the formation and properties of edible oleogels based on hydroxypropyl methyl cellulose. *Food Chemistry*, 246, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.154>
- Mert, B., & Demirkesen, I. (2016). Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product. *Food Chemistry*, 199, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.087>
- Oh, I. K., & Lee, S. (2018). Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins. *Food Hydrocolloids*, 77, 796–802. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.022>
- Okaka, J. C., & Potter, N. N. (1977). Functional and Storage Properties of Cowpea Powder-Wheat Flour Blends in Breadmaking. *Journal of Food Science*, 42(3), 828–833. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb12614.x>
- Patel, A. R., Nicholson, R. A., & Marangoni, A. G. (2020). Applications of fat mimetics for the replacement of saturated and hydrogenated fat in food products. *Current Opinion in Food Science*, 33, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.008>
- Patel, A. R., Rajarethinam, P. S., Grędowska, A., Turhan, O., Lesaffer, A., De Vos, W. H., Van de Walle, D., & Dewettinck, K. (2014). Edible applications of shellac oleogels: spreads, chocolate paste and cakes. *Food Funct.*, 5(4), 645–652. <https://doi.org/10.1039/C4FO00034J>
- Pavlovich-Abril, A., Salazar-Garcia, M. G., Moroyoqui, F. J. C., Ramirez, R. O., & Meza, N. G. (2009). Efectos de una mezcla de estearina de palma y aceite de canola sobre los parámetros reológicos de la masa de trigo y características del pan. *Interciencia*, 34(8), 577–582. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33913144009.pdf>
- Petrusha, O., Daschynska, O., & Shulika, A. (2017). Development of the measurement method of porosity of bakery products by analysis of digital image. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(40)), 61–66. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129520>
- Puşcaş, A., Mureşan, V., Socaciu, C., & Muste, S. (2020). Oleogels in food: A review of current and potential applications. *Foods*, 9(1), 1–27. <https://doi.org/10.3390/foods9010070>
- Quiles Chuliá, M. D., Larrea Santos, V., Hernando Hernando, M. I., & Morell Esteve, P. (2022). Oleogeles, una alternativa saludable a las grasas sólidas tradicionales. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/181711>
- Raghavendra, S., Alvita, P., Hampana, N., & Mahalakshmi, D. (2022). Effect of fats and oils on different properties of flours used in bakery products: A review. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 12, 1000p353. <https://doi.org/10.35248/2155-9600.22.12.1000838>
- Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B., & Navaratne, C. M. (2018). Porous Crumb Structure of Leavened Baked Products. *International Journal of Food Science*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/8187318>

- Sanders, T. H. (2003). GROUND NUT OIL. In *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (pp. 2967–2974). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/01353-5>
- Seena, S., & Sridhar, K. R. (2005). Physicochemical, functional and cooking properties of under explored legumes, Canavalia of the southwest coast of India. *Food Research International*, 38(7), 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.007>
- Sunil, Chauhan, N., Samsher, Chandra, S., Singh, J., & Singh, S. (2019). Assessment of functional properties of composite flours. *Progressive Agriculture*, 19(1), 161. <https://doi.org/10.5958/0976-4615.2019.00001.2>
- Tabara, A., Nakagawa, M., Ushijima, Y., Matsunaga, K., & Seguchi, M. (2015). Effects of heat treatment on oil-binding ability of rice flour. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(10), 1629–1634. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1039479>
- Thirumdas, R. (2023). Partial hydrogenation of oils using cold plasma technology and its effect on lipid oxidation. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1674–1680. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05434-z>
- Tiefenbacher, K. F. (2017). Technology of Main Ingredients—Sweeteners and Lipids. In *Wafer and Waffle* (pp. 123–225). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809438-9.00003-X>
- Vázquez-Chávez, L., & Hernández -López, C. (2023). Características Físicas y Sensoriales de Pastel elaborado con Margarina, Aceite y su mezcla. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 62–67. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.13>
- Yilmaz, E., & Ögütçü, M. (2015). The texture, sensory properties and stability of cookies prepared with wax oleogels. *Food & Function*, 6(4), 1194–1204. <https://doi.org/10.1039/C5FO00019J>
- Zou, X., Wang, X., Li, L., Peng, P., Ma, Q., Hu, X., & Appels, R. (2022). Effects of Composition and Strength of Wheat Gluten on Starch Structure, Digestion Properties and the Underlying Mechanism. *Foods*, 11(21), 3432. <https://doi.org/10.3390/foods11213432>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo Científico

Impacto de la sustitución parcial de harina de trigo refinada por harinas extruidas de grano entero de lenteja y sorgo rojo sobre la textura y composición proximal de galletas

Effect of using extruded whole lentil and sorghum flour on the texture and proximal composition of wheat biscuits

Sara Guajardo-Flores¹, Erick Heredia-Olea¹, Ana Antonieta Chew-Guevara¹ y Esther Pérez-Carrillo^{1*}

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey. Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico, 64700 Monterrey, N.L., México.

*Correspondencia: Correo electrónico: perez.carrillo@tec.mx (Esther Pérez-Carrillo)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1980>

Recibido: 17 de junio de 2025; Aceptado: 11 de noviembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. César Ozuna-López

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de sustituir la harina de trigo por harinas de lenteja y sorgo extruidas, en la composición proximal, digestibilidad *in vitro* de la proteína, color, actividad de agua, perfil de análisis de viscosímetro rápido (RVA) y propiedades texturales de galletas durante un período de almacenamiento de 7 días a 25 °C. Se evaluaron cuatro formulaciones: 100 % harina de trigo (Tratamiento 00), 80 % harina de trigo con 20 % de harina de lenteja extruida (Tratamiento 01), 60 % harina de trigo con 40 % de harina de lenteja extruida (Tratamiento 02) y 30 % harina de trigo, 40 % de harina de lenteja extruida y 30 % de harina de sorgo extruida (Tratamiento 03). Los resultados revelaron que la sustitución parcial de harina de trigo por harinas de lenteja y sorgo extruidas (Tratamiento 03) genera una galleta con tonalidad más rojiza, menor actividad de agua que el control, con una mejora significativa del contenido de proteína, cenizas, así como el índice de expansión de las galletas. En cuanto a textura dentro de los primeros días, esta galleta es la que presenta menos cambios en dureza y fracturabilidad, lo que indica que es más estable. Estos resultados sugieren que la incorporación de harinas de lenteja y sorgo extruidas puede ser una alternativa para incrementar la entrega de proteína de calidad a través de productos de alto consumo como son las galletas.

Palabras clave: proteína, lenteja, sorgo, composición proximal, galleta, extrusión.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the effect of replacing wheat flour with extruded lentil and sorghum flours on the proximate composition, in vitro protein digestibility, color, water activity, and rapid viscosimeter analysis (RVA) profile and textural properties of biscuits during a 7-day storage period at 25 °C. Four formulations were evaluated: 100 % wheat flour (Control), 80 % wheat flour with 20 % extruded lentil flour (Treatment 01), 60 % wheat flour with 40 % extruded lentil flour (Treatment 02) and a formulation composed of 30 % wheat flour, 40 % extruded lentil flour and 30 % extruded sorghum flour (Treatment 03). The results revealed that the partial replacement of wheat flour with extruded lentil and sorghum flours produced a biscuit with a redder hue, lower water activity than the control, and significantly improved protein and ash content and biscuit expansion index. Regarding texture within the first few days, this biscuit showed the least changes in hardness and fracturability, suggesting a greater stability. These results suggest that the addition of extruded lentil and sorghum flours may be an alternative for increasing the delivery of quality protein through high-consumption products such as biscuits.

Keywords: protein, lentil, sorghum, proximal composition, biscuit, extrusion.

1. Introducción

Conforme la población mundial crece, se ha incrementado la necesidad de explorar fuentes de nutrición que sean sustentables, asequibles y amigables con el medio ambiente. Para ello, la FAO ha recomendado el desarrollo de harinas compuestas, definidas como una mezcla de diferentes harinas, como una forma efectiva de incorporar granos nutritivos locales en productos alimenticios (Moin et al., 2025). Además, se debe identificar el producto alimenticio adecuado para hacer llegar los beneficios de las harinas compuestas a los consumidores como es que se adapte a los hábitos alimentarios existentes, que sea estable, de fácil manejo y sin preparación adicional (Taïpe-Lucas et al. 2021). Bajo este contexto, las galletas son un producto horneado altamente consumido, reconocido por su extensa vida de anaquel, conveniencia y palatabilidad. Su popularidad en diferentes demografías hace de ellas un vehículo ideal para la fortificación con nutrientes como el enriquecimiento proteico. La fortificación de galletas con proteínas se ha desarrollado para combatir la malnutrición y mejorar el aporte de proteína en diferentes grupos poblacionales. Sin embargo, esta fortificación representa retos importantes como son cambios en textura, sabor, etc. (Şeren & Çelekli, 2025).

En los últimos años, ha habido un creciente interés en buscar alternativas a base de cereales que puedan mejorar el perfil nutricional de estos productos. El sorgo es un cereal bien adaptado a climas áridos y cálidos, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para el contexto del cambio climático que se está viviendo, como sustituto parcial de trigo (Iacovino et al., 2025). Adicional a esto, en los últimos años el interés en sorgo rojo se ha incrementado debido a que es considerado una buena fuente de compuestos nutraceuticos y fitoquímicos (Aruna et al. 2025). Además, la utilización de sorgo puede dar lugar a la reducción del índice glicémico de productos como las galletas (Camara et al., 2025). En cuanto a las lentejas, como otras leguminosas es una fuente importante de proteínas (20.6 a 31.4 % de su peso), pero además es rica en fibra dietaria y baja en grasa (Jarpa-Parra 2018),

adicional a esto, es rica en compuestos nutraceuticos como polifenoles con beneficios cardioprotectores, antidiabéticos, antiinflamatorios y anticariogénicos (Dewan et al., 2024).

La extrusión es una técnica de procesamiento térmico mecánico que puede modificar las propiedades funcionales y nutricionales de los ingredientes. La extrusión de legumbres y cereales ha demostrado mejorar la digestibilidad de los nutrientes y la calidad sensorial de los productos finales (Mba et al., 2023). En este contexto, el uso de harinas de lenteja y sorgo extruidas puede no solo mejorar el perfil nutricional de las galletas, sino también influir en sus propiedades físicas y sensoriales. Varias investigaciones han evaluado la inclusión de harinas de legumbres y cereales en la elaboración de galletas, reportando mejoras en el contenido de proteína y fibra, así como en la aceptabilidad sensorial (Becerril et al., 2019; Aslan Türker, 2024; Felisiak et al., 2024). Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han centrado en harinas no extruidas, y la información sobre el uso combinado de harinas de lenteja y sorgo extruidas en galletas es limitada.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la sustitución de harina de trigo por harinas de lenteja y sorgo extruidas en la composición proximal, digestibilidad in vitro de la proteína, color, actividad de agua, perfil de análisis de viscosímetro rápido (RVA) y propiedades texturales de galletas durante un período de almacenamiento de 7 días a 25 °C.

2. Materiales y métodos

2.1 Procedimiento Experimental

Para la generación de las harinas modificadas por extrusión, se siguió el procedimiento descrito por Espinosa-Ramirez et al. (2021) para sorgo y lenteja utilizando un extrusor de dos tornillos de 60 cm de longitud y una relación L/D=20 corrotatorios (BTSM.30m Bühler AG, Uzwil, Suiza). Se evaluaron cuatro formulaciones diferentes, las cuales se presentan en la Tabla 1.

En el proceso de elaboración de las galletas, se pesaron todos los ingredientes de forma separada y posteriormente se mezclaron en una batidora KitchenAid durante 15 min a velocidad media, utilizando un aditamento de paleta. Posteriormente, la masa se laminó a un grosor de 2 cm y se cortó en forma de círculo con un diámetro de 10 cm. Las galletas se hornearon en un horno Electrolux a 190 °C durante 14 min. Una vez enfriadas a 25 °C, se empaquetaron en bolsas de celofán para su almacenamiento a 25 °C durante 7 días.

Tabla 1. Formulaciones utilizadas para la producción de galletas de trigo 100 % (Tratamiento 00) y galletas de harinas compuestas: trigo 80 % lenteja 20 % (Tratamiento 01), trigo 60 % lenteja extruida 40 % (Tratamiento 02) y trigo 30 % lenteja extruida 40 % y sorgo extruido 30 % (Tratamiento 03).

Table 1. Formulations used to produce wheat biscuits 100 % (Treatment 00), wheat:extruded lentil 70:30 biscuits (Treatment 01), wheat:extruded lentil 60:40 (Treatment 02) and wheat:extruded lentil: extruded sorghum 30:40:30 (Treatment 03).

Ingredientes	00	01	02	03
Harina de trigo	100	80	60	30
Harina de lenteja extruida	-	20	40	40
Harina de sorgo rojo extruida	-	-	-	30
Agua	54	54	54	54
Azúcar	20	20	20	20
Mantequilla	8	8	8	8
Polvo para hornear	1.5	1.5	1.5	1.5
Leche descremada en polvo	1	1	1	1
Sal	1	1	1	1
Esencial de vainilla	0.5	0.5	0.5	0.5
Lecitina	0.3	0.3	0.3	0.3

2.2 Métodos Analíticos

Determinación de perfil viscoamilográfico de harinas

La determinación del perfil viscoamilográfico de las harinas sin extruir, extruidas y de las harinas compuestas se llevo a cabo utilizando un RVA, (viscosímetro rápido) Modelo 4500 (Perkin Elmer) bajo los estándares del Método 76-21-01 de la AACC (por su nombre en inglés, American Association of Cereal Chemistry). Para ello, se preparó una suspensión al 7 % de sólidos de harina en agua destilada que, posteriormente, se sometió a un perfil de calentamiento iniciando a 50 °C para alcanzar 95 °C en 3.5 min, se mantiene a 95 °C durante 5 min y se enfría en 3.5 min a 50 °C, se mantiene a esta temperatura durante 5 min, todo esto a una velocidad de agitación de 160 rpm.

Composición química y actividad de agua de galletas

En cuanto a la caracterización de las galletas se llevó a cabo la determinación de humedad, proteína cruda, extracto étereo y cenizas totales de acuerdo a protocolos AOAC (por su nombre en inglés, Association of Official Analytical Chemists) 920.151, 920.152, 960.39, 940.26, respectivamente. Para llevar a cabo la determinación de actividad de agua (a_w) se utilizó un equipo Aqualab 4TE. Todas las mediciones se llevaron a cabo por triplicado.

Propiedades físicas de las galletas

Para la determinación de color en la superficie de galleta entera se hizo con la escala CIE LAB (L^* , a^* , b^*) con un espectrofotómetro Minolta (Modelo CM-600d). En el caso del índice de expansión se calculó como la relación del diámetro dividido por el grosor de la galleta. Para la textura, se aplicó la técnica de Flores-Quintanilla y Pérez-Carrillo (2022) al día 0, 1 y 7, para ello se utilizó un texturómetro TA.XT2 (Stable Micro System Ltd. Surrey, UK) con una sonda de metal de 3 mm de diámetro. La velocidad de prueba fue de 1 mm/s y se determinó la dureza (valor máximo en el que se rompe la galleta) y fracturabilidad (valor en que se empieza a romper la galleta). La determinación de A_w , índice de expansión y textura se realizaron 5 repeticiones por tratamiento cada una.

Diseño experimental y análisis de datos

Para este trabajo se estableció un diseño experimental en el cual se compararon galletas elaboradas a base de 100 % harina de trigo (Tratamiento 00) contra galletas elaboradas con una sustitución del de la harina de trigo por harina de lenteja extruida en 20 % (Tratamiento 01), 40 % (Tratamiento 02), 40 % y 30 % harina de sorgo extruida (Tratamiento 03). Se realizaron pruebas para validar que los datos fueran paramétricos (normalidad, homocedasticidad e independencia). Se utilizó una prueba ANOVA con un valor de significancia p de 0.05. La determinación de la diferencia de medias fue hecha utilizando la prueba de Tukey de comparación de medias. Para todas las pruebas estadísticas se utilizó el programa MINITAB® 21. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, con excepción de textura que fueron 5 repeticiones por día de almacenamiento por tratamiento.

3. Resultados y discusión

En la tabla 2 se pueden observar las características reológicas en suspensión de las harinas utilizadas. Los valores obtenidos para sorgo fueron similares a los reportados por Usman et al. (2024) tanto para sorgo sin extruir como extruido (1,386.50 cP y 114.00 cP, respectivamente, como valor de viscosidad máxima). En tanto que los datos para harina de lenteja entera y extruida se asemejan a lo reportado por Masatcioglu y Koksel (2019) obteniendo 285 cP y 84 cP, respectivamente. El tratamiento de extrusión de las harinas enteras derivó en una modificación del almidón presente, reduciendo de manera significativa los parámetros de viscosidad máxima y final (Tabla 2). Durante el proceso de extrusión, las partículas de almidón absorben agua rápidamente y se hinchan, mientras que el calor, las fuerzas de corte y la presión inducen la gelatinización del almidón, lo que da lugar a una transición de una estructura ordenada a una desordenada (Qiu et al. 2024). La gelatinización del almidón resulta en una notable disminución de la viscosidad máxima. En el caso de la harina de trigo, los valores fueron menores que los reportados por Iaconivo et al. (2025) para harinas italianas suaves (2,150 cP y 2,480 cP para viscosidad máxima y final, respectivamente). Estos resultados nos indican que es una harina suave adecuada para la elaboración de galletas.

Según Ragaee y Addel-Aal (2006), el menor valor promedio de viscosidad máxima de los trigos

suaves puede estar asociado con una menor hinchazón de los gránulos de almidón. Se puede observar como a mayor porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de lenteja se reduce el valor de viscosidad máxima y viscosidad final. Esto se debió a que los valores de ambas viscosidades fueron inferiores en el caso de la harina de lenteja entera extruida y la de sorgo rojo extruida. El tiempo que toma llegar a la viscosidad máxima fue estadísticamente el mismo para el tratamiento con sustitución al 20 % que para el tratamiento 100 % trigo, mientras que los tratamientos con un porcentaje de sustitución superior fueron estadísticamente menores. La extrusión deja al almidón ya transformado (pregelatinizado, parcialmente degradado y con menos cristalinidad), por lo que necesita menos tiempo para desarrollar la viscosidad máxima en RVA.

Tabla 2. Datos de viscosidad máxima, tiempo de pico máximo y viscosidad final de harina de trigo, harinas antes de extrusión y después de extrusión (sorgo y lenteja), así como las mezclas de harinas utilizadas para la elaboración de galletas. Letras diferentes en la misma columna representan diferencia estadística ($p>0.05$)¹

Table 2. Data on peak viscosity, peak time, and final viscosity of sorghum and lentil with and without extrusion, wheat flour and composite flours used of biscuit production. Different letters in the same column represent a statistical difference ($p>0.05$)¹

Harina	Viscosidad máxima (cP)	Tiempo de viscosidad máxima (min)	Viscosidad Final (cP)
Sorgo entero	1,276.0 ^b	6.4 ^e	1,653.3 ^b
Lenteja entera	239.5 ^f	7.0 ^d	430.0 ^e
Sorgo extruido	343.6 ^e	3.4 ^f	275.9 ^g
Lenteja extruida	64.5 ^h	2.1 ^g	71.8 ^h
Tratamiento 00	1,779.0 ^a	8.9 ^a	2,012.7 ^a
Tratamiento 01	1,086.7 ^c	8.4 ^a	1,401.3 ^c
Tratamiento 02	597.3 ^d	8.1 ^b	799.0 ^d
Tratamiento 03	282.0 ^g	7.9 ^b	354.3 ^f

¹El tratamiento 00 corresponde a 100% harina de trigo, el tratamiento 01 80:20 harina trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 02 60:40 harina de trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 03 30:40:30 harina de trigo:harina de lenteja extruida:harina de sorgo extruido.

En cuanto a las galletas, en la tabla 3 se pueden observar los valores de color, índice de expansión, a_w , humedad, proteína cruda, extracto crudo y cenizas. En términos de color se puede apreciar que la sustitución parcial tanto por harina de lenteja extruida como por harina de sorgo rojo extruida redujeron el valor de L^* (luminosidad) y b^* (amarillo), pero se incrementa el valor de a^* (rojo) en las galletas elaboradas. Esto se debe al hecho de que ambas harinas son de tonalidades rojizas, siendo más intenso en el caso de la harina de sorgo por ser una variedad roja. En lo que respecta al índice de expansión, al aumentar el nivel de sustitución de harina extruida de lenteja o sorgo, se aumentó este valor. Este efecto fue debido a la sustitución por harinas extruidas. El aumento en el índice de expansión con la sustitución por almidón extruido también se atribuye a la reducción en la consistencia de la masa, ya que una menor consistencia permite una expansión más rápida de la galleta (Sharma et al. 2016) siendo también similar a lo reportado por Aslan Turker (2024) en un trabajo con diferentes variedades de lenteja y Rahman et al. (2025) donde utilizaron harinas de trigo, garbanzo y sorgo germinadas. Las harinas extruidas opusieron menos resistencia a la deformación

de la masa, por lo que aumentaron el índice de expansión. Esto está asociado con las propiedades reológicas (Tabla 2) de las mezclas de harinas donde se puede observar una reducción en el valor de viscosidad. Maache-Rezzoug et al. (1998) reportaron que a menor viscosidad de la masa que se usa en la elaboración de galletas se tiene un producto final con mayor diámetro y menor altura esto es debido a que la baja viscosidad da lugar a una mayor expansión de la masa durante el proceso de horneado, resultando un producto final con mayor diámetro, además que, al extenderse más, se aplanan contribuyendo a una menor altura. Estos datos coinciden con los reportados en este trabajo.

La humedad en galletas está dentro de los valores esperados para este tipo de productos y es similar a la reportada por Rahman et al. (2025). A pesar de que todas las galletas tuvieron valores similares en el contenido de humedad, la actividad de agua, se ve reducida en el producto terminado elaborado con harinas compuestas, esto se puede asociar con la presencia de las proteínas de lenteja ya que en un estudio realizado por Sahni y Sharma (2023) con aislados proteicos de alfalfa observaron una reducción en la actividad de agua de las galletas.

El contenido de extracto etéreo en las galletas se redujo. Nuevamente el efecto de la dilución de la harina de trigo por harina extruida resultó en este cambio, y esto se debe a la composición de las harinas, ya que en promedio el contenido de grasa en la harina de trigo es de 2.5 % (Pareyt et al. 2011) y en lenteja de solo 0.5 % (Liberal et al. 2024). En el caso del contenido de cenizas en galletas, este valor se ve incrementado al utilizar las harinas extruidas, esto está asociado al hecho de que la harina de trigo utilizada es refinada, en tanto que para las harinas extruidas se utilizaron granos enteros. Las lentejas contienen mayor cantidad de minerales, por lo que, a mayor sustitución, mayor cantidad de cenizas (Tabla 3).

Tabla 3. Color, índice de expansión, actividad de agua, humedad, proteína cruda, extracto etéreo y cenizas de galletas producidas con diferentes harinas compuestas. Letras diferentes en la misma fila representan diferencia estadística a un valor $p > 0.05$ ¹

Table 3. Color, expansion index, water activity, moisture, crude protein, ether extract and ash proximate composition of biscuits produced with different composite flours. Different letters in the same row represent a statistical difference ($p > 0.05$)¹

Parámetro	00	01	02	03
Color				
L	68.21 ^a	66.60 ^b	65.55 ^b	56.20 ^d
a	1.13 ^d	1.49 ^c	1.79 ^b	8.55 ^a
b	26.90 ^a	22.36 ^b	21.35 ^c	16.83 ^d
Índice de Expansión	4.78 ^d	6.04 ^c	7.60 ^b	10.04 ^a
a _w	0.79 ^a	0.75 ^b	0.74 ^b	0.74 ^b
Humedad %	4.00 ^a	4.00 ^a	4.00 ^a	4.00 ^a
Proteína Cruda %	9.41 ^b	10.16 ^b	11.58 ^a	10.81 ^{ab}
Extracto Étereo %	15.44 ^a	13.00 ^b	11.30 ^c	11.07 ^c
Cenizas %	1.72 ^c	2.65 ^b	3.15 ^a	3.59 ^a

¹El tratamiento 00 corresponde a 100% harina de trigo, el tratamiento 01 80:20 harina trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 02 60:40 harina de trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 03 30:40:30 harina de trigo:harina de lenteja extruida:harina de sorgo extruido. Porcentajes en base húmeda.

Las galletas con el mayor contenido de proteína fueron las que tuvieron un 40 % de harina de lenteja extruida (Tratamientos 02 y 03). Este resultado estuvo asociado a la sustitución de la harina de trigo por lenteja en productos tipo galleta es similar a lo reportado por Imran et al. (2024), quien reporta en galleta con harina de trigo 5 % de proteína que al adicionar 20 % de harina de leguminosas se incrementa a 8 %.

La utilización de harina de lenteja y harina de sorgo rojo extruidas da lugar a un producto que en términos de color es menos brillante, más rojizo y menos amarillo, con un mayor índice de expansión, menor Aw, menos grasa, pero mayor contenido de proteína y cenizas.

La textura de una galleta es crucial para la experiencia del consumidor. En general, la textura de las galletas está relacionada principalmente con las propiedades mecánicas de las mismas. Dentro de la estructura de la galleta, células de gas de diferentes tamaños y formas, se encuentran embebidas dentro de una matriz compuesta por almidón, grasa y azúcar. El nivel de sustitución de alguno de estos elementos va a tener efecto en las propiedades mecánicas de la galleta y, por lo tanto, en su textura (Arepally et al., 2023). En la tabla 4 se pueden observar los valores de textura y sus cambios durante los 7 días de almacenamiento a 25 °C.

Inicialmente, el producto con mayor dureza se generó con el Tratamiento 03. Esto estuvo relacionado por una parte por el aumento de contenido de proteína (Tabla 3) y por la gelatinización y parcial dextrinización del almidón de sorgo debido a la extrusión (Tabla 2), ya que al disolverse en el agua se genera una solución viscosa que al secarse después del horneado adquiere una mayor dureza, de forma amorfa y vítrea, dando lugar a ese incremento (De Almeida Marques et al., 2016). Sin embargo, al realizar el análisis por regresión lineal de los cambios en textura durante los 7 días de prueba se puede observar que la pendiente de cambio es mayor cuando se utiliza en la elaboración de galletas solo harina de trigo, pero también es la que menos se ajusta a un modelo lineal con un valor de R^2 de 0.63. Al aumentar la proporción de lenteja esta pendiente, se reduce.

Tabla 4. Dureza y fracturabilidad de galletas elaboradas con diferentes harinas almacenadas por 7 días a 25 °C. Letras diferentes en la misma columna representan diferencia entre tratamientos con un valor $p > 0.05$ ¹

Table 4. Hardness and fracturability of biscuits made with different flours and storage for 7 days at 25 °C. Different letters in the same column represent differences between treatments with a $p > 0.05$ ¹.

Tratamiento	Dureza (kg)						Fracturabilidad (g)					
	Día 0	Día 1	Día 7	A	b	R ²	Día 0	Día 1	Día 7	A	b	R ²
00	2.180 ^c	27.51 ^a	37.04 ^a	3.78	12.12	0.63	0.41 ^d	7.82 ^a	10.31 ^a	1.06	3.37	0.61
01	3.242 ^b	19.29 ^b	27.68 ^b	2.76	9.37	0.71	0.56 ^c	2.49 ^b	8.36 ^b	1.07	0.96	0.99
02	3.493 ^b	12.48 ^d	21.33 ^c	2.17	6.64	0.85	0.63 ^b	3.10 ^c	5.95 ^d	0.66	1.47	0.88
03	10.32 ^{2a}	14.81 ^c	19.94 ^c	1.19	11.84	0.88	2.78 ^a	3.02 ^c	6.82 ^c	0.60	2.62	0.99

¹El tratamiento 00 corresponde a 100% harina de trigo, el tratamiento 01 80:20 harina trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 02 60:40 harina de trigo:harina de lenteja extruida, tratamiento 03 30:40:30 harina de trigo:harina de lenteja extruida:harina de sorgo extruido

En el caso del uso de sorgo, la pendiente fue la menor de todas y el valor de ajuste de R aumentó (Tabla 4). En lo que respecta a la fracturabilidad, tenemos que las galletas requieren más fuerza para romperse en el tratamiento 03. En todos los casos presenta cambios y al momento de modelar se observa que las galletas de los tratamientos 00 (solo harina de trigo) y 01 son los que tienen una mayor pendiente de cambio, lo que se puede asociar a una menor estabilidad bajo las condiciones estudiadas en este trabajo. La variación en textura y fracturabilidad en galletas de trigo han sido previamente reportados (Balestra et al. 2019) y se asocian como cambios en el contenido de humedad y actividad de agua debido a la migración de humedad y su redistribución dentro de las galletas teniendo efecto sobre las propiedades físicas de los componentes y sus interacciones (Balestra et al. 2019).

Hasta el momento de realizar este trabajo, no hemos encontrado reportes sobre cambios texturales en galletas con harinas compuestas, siendo este trabajo uno de los primeros acercamientos al tema. De ahí la relevancia de conocer este aspecto en este tipo de productos.

4. Conclusions

La sustitución de harina de trigo por 40 % de harina de lenteja extruida y 30 % de harina de sorgo extruida da lugar a una galleta con mayor índice de expansión, contenido de proteína y cenizas, con menos cambios en textura durante los primeros 7 días posteriores a su producción almacenada a 25 °C. La utilización de harina entera extruida de lenteja y sorgo aumenta el aporte de proteína de la galleta sin comprometer la actividad de agua ni la textura del producto. Esta investigación sienta un precedente para que la industria de panadería y snacks considere la integración de harinas de leguminosas y cereales extruidos en las formulaciones de productos, contribuyendo así a la diversificación de ingredientes y la producción sostenible de alimentos.

Contribuciones de los autores

La conceptualización fue realizada por SGF y EPC. En el presente artículo se realizó la metodología proyecto fue realizada por SGF. El desarrollo y producción de la harina de garbanzo en el extrusor fue realizado por EHO. El proceso de análisis fue desarrollado por SGF y EPC. La redacción del artículo fue realizada por y la revisión de artículo la hizo AACG y EPC. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que **no existe ningún conflicto de interés, real o potencial**, que pudiera haber influido en la realización de la presente investigación o en la interpretación de sus resultados.

5. Referencias

AACC International. (2010). AACC International Approved Methods of Analysis, (11th ed.). Method 10-31.03 (St. Paul, MN).
<https://www.cerealsgrains.org/resources/methods/Pages/default.aspx>

- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemistry, (17th ed.). Gaithersburg MD, USA.
- Arepally, D., Reddy, R. S., Coorey, R., & Goswami, T. K. (2023). Evaluation of functional, physicochemical, textural and sensorial properties of multi-millet-based biscuit. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(5), 2437-2447. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16381>
- Aruna, C., Meena, K., Visarada, K. B. R. S., Hariprasanna, K., Deepika, C., Venkateswarlu, R., Venkateswarly, R., Das, I.K., Meena, D.K., Madhusudhana, R. & Satyavathi, C. T. (2025). Red sorghum variety: A dual solution for functional food and grain mold resistance. *Journal of Cereal Science*, 123, 104150. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104150>
- Aslan Türker, D. (2024). Determination of the physical quality, structural characteristics, and sensory acceptability of biscuits prepared from einkorn-based lentil composite flours. *Harran Tarım Ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 28(3), 430-443. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1477200>
- Balestra, F., Verardo, V., Tappi, S., Caboni, M. F., Dalla Rosa, M., & Romani, S. (2019). Chemical and physical changes during storage of differently packed biscuits formulated with sunflower oil. *Journal of food science and technology*, 56(10), 4714-4721. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03918-z>
- Becerril-Ibarra, O. A., Sosa-Morales, M. E., Rodriguez-Hernández, G., & Gómez-Salazar, J. A. (2019). Efecto de la concentración de harina de garbanzo en las propiedades fisicoquímicas de salchicha tipo frankfurt durante su almacenamiento. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(686-694). <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/7/96.pdf>
- Camara, F., Coulibaly, W. H., Mian, T. M. A. S., Ahoussi, K. J. B., Coulibaly, S., Varadarajan, V., Diguta, C., & Matei, F. (2025). Household production of cookies from sorghum (*Sorghum bicolor*) with a low glycaemic index in prevention and management of type 2 diabetes in Côte d'Ivoire. *Current Nutrition & Food Science*, 21(3), 341-349. <http://dx.doi.org/10.2174/0115734013307493240627033411>
- de Almeida Marques, G., de São José, J. F. B., Silva, D. A., & da Silva, E. M. M. (2016). Whey protein as a substitute for wheat in the development of no added sugar cookies. *LWT-Food Science and Technology*, 67, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.044>
- Dewan, M. F., Shams, S. N. U., & Haque, M. A. (2024). A review of the health benefits of processed lentils (*Lens culinaris* L.). *Legume Science*, 6(2), e232. <https://doi.org/10.1002/leg3.232>
- Espinosa-Ramírez, J., Rodríguez, A., De la Rosa-Millán, J., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E. & Serna-Saldívar, S. O. (2021). Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion. *Food Hydrocolloids* 111, 106400. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106400>
- Felisiak, K., Przybylska, S., Tokarczyk, G., Tabaszewska, M., Słupski, J., & Wydurska, J. (2024). Effect of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour incorporation on quality, antioxidant properties, and bioactive compounds of shortbread cookies. *Foods*, 13(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/foods13152356>
- Flores-Quintanilla, R.D., & Pérez-Carrillo, E. (2022). Evaluation of the effect of replacing shortening for sesame paste (*Sesamum indicum*) in nixtamalized maize cookies. *Food Research*, 6(5):365-369. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(5\).602](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(5).602)

- Iacovino, S., Garzon, R., Rosell, C. M., Marconi, E., Albors, A., & Martín-Esparza, M. E. (2025). Evaluation of the technological performance of soft wheat flours for fresh-pasta production as affected by industrial refining degree. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 2854–2866. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03638-z>
- Imran, A., Suleria, H. A., Arshad, M. U., Wei, C. R., Zarikian, N. A., Afzaal, M., & Islam, F. (2024). Unleashed protein power: redefining baked goods with legume flour mixtures. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2407652. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2407652>
- Jarpa-Parra, M. (2018). Lentil protein: A review of functional properties and food application. An overview of lentil protein functionality. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(4), 892-903. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13685>
- Liberal, Â., Almeida, D., Fernandes, Â., Pereira, C., Ferreira, I. C. F. R., Vivar-Quintana, A. M., & Barros, L. (2024). Nutritional, chemical, and antioxidant screening of selected varieties of lentils (*Lens culinaris* spp.) from organic and conventional agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(1), 104-115. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12896>
- Maache-Rezzoug, Z., Bouvier, J. M., Allaf, K., & Patras, C. (1998). Effect of principal ingredients on rheological behaviour of biscuit dough and on quality of biscuits. *Journal of Food Engineering*, 35(1), 23-42. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00017-X)
- Masatcioglu, M.T., & Koksels, F. (2019). Functional and thermal properties of yellow pea and red lentil extrudates produced by nitrogen gas injection assisted extrusion cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(15), 6796-6805. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9964>
- Mba, J. C., Paes, L. T., Viana, L. M., Ferreira, A. J. C., Queiroz, V. A. V., Martino, H. S. D., Azevedo, L., de Carvalho, C. W. P., Felisberto, M. H. F., & de Barros, F. A. R. (2023). Evaluation of the physical, chemical, technological, and sensorial properties of extrudates and cookies from composite sorghum and cowpea flours. *Foods*, 12(17), 3261. <https://doi.org/10.3390/foods12173261>
- Moin, A., Hosseini, E., Smaoui, S., & Varzakas, T. (2025). Research progress on lentil-based composite flours: physicochemical, techno-functional properties, and high-performance food applications. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 17(2), 232-250. <https://doi.org/10.15586/qas.v17i2.1540>
- Pareyt, B., Finnie, S. M., Putseys, J. A., & Delcour, J. A. (2011). Lipids in bread making: sources, interactions, and impact on bread quality. *Journal of Cereal Science*, 54(3), 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.08.011>
- Qiu, C., Hu, H., Chen, B., Lin, Q., Ji, H., & Jin, Z. (2024). Research progress on the physicochemical properties of starch-based foods by extrusion processing. *Foods*, 13(22), 3677. <https://doi.org/10.3390/foods13223677>
- Rahman, S., Kumar Dubey, P., & Singh, H. (2025). Development of a cost-effective and protein-enhanced germinated cereal–legume–millet flour based multigrain cookie: a step towards sustainable goals. *International Journal of Food Science and Technology*, 60(1), vvae064. <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvae064>
- Ragaei, S., & Addel-Aal, E. A. (2006) Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry*, 95(1), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.012>

- Sahni, P., & Sharma, S. (2023). Quality characteristics, amino acid composition, and bioactive potential of wheat cookies protein-enriched with unconventional legume protein isolates. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 15(2), 1-10. <https://doi.org/10.15586/qas.v15i2.1160>
- Sharma, S., Singh, N., & Katyal, M. (2016). Effect of gelatinized-retrograded and extruded starches on characteristics of cookies, muffins and noodles. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2482–2491. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2234-8>
- Şeren, E., & Çelekli, A. (2025). Functional biscuits with alternative protein sources. Proceeding Book of 4th International Conference on Contemporary Academic Research ICCAR 2025. pp. 355-360. Published by: All Science Academy. Konya, Turkey. <https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/274323>
- Taipe-Lucas, C., Espinoza-Calderón, G. A., Ruiz-Rodríguez, A., & Salazar-Silvestre, E. (2021). Principios metodológicos fundamentales para las mezclas alimenticias instantáneas con harina de haba, quinoa y maíz. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(5), 1128-1154. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2734/5762>
- Usman, S., Suhartono, M. T., Purwani, E. Y., Sitanggang, A. B., & Trisnawati, W. (2024). Characteristics of sorghum flour modified with physical and enzymatic treatments. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 36, 1-9. <https://doi.org/10.3897/ejfa.2024.119095>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Comparación entre diferentes métodos de pretratamiento para la producción de azúcares fermentables a partir de rastrojo de amaranto

Comparison between different pretreatment methods to obtain fermentable sugars from amaranth stubble

María de Jesús García-Gómez^{1,3,4*}, Dalia Yvette Chávez-Valerio², Oscar Nuñez-Gaona^{1,2,3}, Cirilo Nolasco-Hipólito^{1,2,3}, Jesús Carrillo-Ahumada³

¹Centro de Investigaciones Científicas/²Maestría en Biotecnología/³Cuerpo Académico Biotecnología Sustentable, Universidad del Papaloapan. Tuxtepec, Oaxaca, México.

⁴Red Temática 12.3 para la Reducción de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos, Durango, México

*Correspondencia: Correo electrónico: unpal7@gmail.com (María de Jesús García-Gómez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i4.1765>

Recibido: 28 de noviembre de 2024; Aceptado: 24 marzo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Dra. Esther Pérez-Carrillo

Resumen

Los residuos agroindustriales adquieren cada vez mayor importancia por su utilización en diversos procesos fermentativos, incluyendo la producción de sustancias con actividad biológica de valor industrial. Los azúcares fermentables (AF) constituyen un grupo de compuestos clave para estos procesos. Sin embargo, se deben llevar a cabo una serie de pasos para su liberación. El pretratamiento es un paso crucial para la obtención de estos compuestos. Por ello, el objetivo de este trabajo de investigación fue establecer un método adecuado para la deslignificación del rastrojo de amaranto (RA) y la posterior producción de AF. Se evaluaron cinco pretratamientos: físico (I. vapor y II. ultrasonido), químico (III. NaOH 3.5 N) y combinado (IV. NaOH 3.5 N + vapor y V. NaOH (2, 2.5, 3, 3.5 N) + ultrasonido). Se utilizó el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) para azúcares reductores y así determinar la concentración de AF, lo que indicaría la degradación de la lignocelulosa. Esto fue corroborado mediante análisis FTIR. Los métodos que obtuvieron mayor concentración de AF fueron el II y el combinado V (3.5 N NaOH). Una vez definido el método de pretratamiento, se realizó el proceso de sacarificación mediante hidrólisis enzimática convencional e hidrólisis asistida por ultrasonidos, siendo esta última la que mostró mayor eficiencia.

Palabras clave: amaranto, rastrojo, pretratamiento, azúcares reductores, deslignificación.

Abstract

Agro-industrial residues are gaining increasing importance for their use in various fermentation processes, including the production of substances with the biological activity of industrial value. Fermentable sugars (FS) are a key group of compounds for these processes. However, a series of steps must be carried out to facilitate their release. Pretreatment is a crucial step in obtaining these compounds. Therefore, the objective of this research work was to find a suitable method for delignification of amaranth stubble and subsequent production of fermentable sugars. For this purpose, five pretreatment methods were tested, which were classified as follows: physical (I. steam and II. ultrasound), chemical (III. 3.5N NaOH), and combined (IV. 3.5N NaOH + steam and V. NaOH (2, 2.5, 3, 3.5 N) + ultrasound). The Miller method (DNS) for reducing sugars was used to determine the concentration of FS, which would indicate the degradation of lignocellulose. This was corroborated by FTIR analysis. The methods that obtained the highest concentration of FS were the physical pretreatment (II. ultrasound) and the combined pretreatment (V. 3.5 N + ultrasound). Once the pretreatment method was defined, the saccharification process was carried out through conventional enzymatic hydrolysis and ultrasound-assisted hydrolysis, with the latter showing greater efficiency.

Keywords: amaranth, stubble, pretreatment, reducing sugars, delignification.

1. Introducción

Actualmente, los residuos agroindustriales no tienen una disposición final adecuada, y la mayoría terminan siendo quemados, lo que conduce a la liberación de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero. La investigación actual se ha centrado en encontrar alternativas para la eliminación de estos residuos mediante su utilización en la producción de sustancias industriales valiosas. El uso de materiales lignocelulósicos derivados de actividades agrícolas contribuye a mitigar el proceso de contaminación ambiental, ya que estos residuos, en sus diferentes etapas de producción, son actualmente un problema debido a la falta de un manejo adecuado o disposición final (Vargas-Radillo *et al.*, 2016). Aunque la biomasa lignocelulósica obtenida a partir de residuos agroindustriales ofrece una alternativa considerable, el proceso de transformación es complejo y consta de tres pasos fundamentales: pretratamiento, sacarificación y fermentación (Subhedar *et al.*, 2018). Los AF son un grupo clave de compuestos intermedios, y el pretratamiento es el paso más crucial para la sacarificación de la lignocelulosa. Los pretratamientos aumentan significativamente el rendimiento al liberar una mayor concentración de azúcares para la etapa de hidrólisis. La eliminación de lignina y la hidrólisis de hemicelulosa hace que el sustrato sea más accesible al ataque enzimático, lo que resulta en mejores rendimientos (Araújo *et al.*, 2019) en comparación con la hidrólisis realizada en sustratos no tratados. Cabe destacar que, dependiendo del método de pretratamiento, éste puede ser costoso, consumir tiempo y representar incluso posibles amenazas ambientales, especialmente al usar productos químicos agresivos (Subhedar *et al.*, 2018). Por otro lado, la sacarificación se puede llevar a cabo mediante hidrólisis enzimática, que es más eficiente en comparación con otros métodos como la hidrólisis química (Chu *et al.*, 2020). Los procesos de pretratamiento pueden mejorarse mediante la aplicación de ultrasonido ya que mejora el contacto entre la biomasa y los reactivos, reduciendo el tiempo requerido y logrando mejores rendimientos. Lo mismo se aplica a la hidrólisis enzimática asistida por ultrasonido, que resulta en mayores

rendimientos en un tiempo de reacción más corto en comparación con el enfoque convencional (Shah y Mohanraj, 2014).

En el caso del cultivo de amaranto, sus residuos, como la paja que queda después de la cosecha de semillas, se tratan de diversas maneras, no sólo para producir biopéptidos activos (Nolasco-Hipólito *et al.*, 2022), sino también para producir AF (Gong *et al.*, 2020). Se ha dedicado una cantidad considerable de investigación a explorar la viabilidad para usar el RA mediante la implementación de diversas técnicas para convertir el material lignocelulósico en AF. En un estudio sobre la tecnología de proceso óptimo de biomasa de amaranto para la producción de biocombustibles, se determinó que los pretratamientos alcalinos (NaOH 1 %) y ácidos suaves (H₂SO₄ 2 %), seguidos de la hidrólisis enzimática, complementada con un 8 % de proteínas endógenas, lograron casi la completa sacarificación enzimática, alcanzando rendimientos de glucosa del 99 % y 97 %, respectivamente (basados en el contenido de celulosa) (Madadi *et al.*, 2022). Otro estudio se centró en la producción de AF a partir de las raíces y tallos del amaranto, que contenían 363.5 g kg⁻¹ de celulosa y 124.9 g kg⁻¹ de hemicelulosa. Los investigadores emplearon microondas con diferentes potencias y la presencia de diferentes catalizadores alcalinos como NaOH, KOH o Ca(OH)₂. Sus hallazgos revelaron que el KOH, seguido de la hidrólisis enzimática, resultó en el mayor rendimiento total de azúcar (488.23 g kg⁻¹ basado en la carga original de biomasa) (Marx *et al.*, 2014). Teniendo en cuenta que el rendimiento nacional del cultivo de amaranto es de 1.1 a 2.3 ton de grano ha⁻¹ bs (base seca) y 3.8 a 4.1 ton de hoja ha⁻¹ bs, generando aproximadamente 271,100 ton de residuos agrícolas por ciclo de cultivo, cuya duración es de 150-180 días; si se tienen hasta 2 ciclos por año (riego y temporal), la producción de rastrojo de amaranto sería de aproximadamente 542,200 ton por año. (Arce, 2011). Se sabe que el amaranto no sólo contiene proteínas con características funcionales superiores para proporcionar nutrición humana (Bressani, 1989), sino que también es una fuente de materia prima para producir AF, razón clave del aumento en el interés de investigar y aprovechar el RA (Madadi *et al.*, 2022). Con este enfoque, el objetivo de este trabajo fue seleccionar un método de pretratamiento y sacarificación del rastrojo de amaranto con el que se obtuvieran la mayor concentración de AF.

2. Materiales y métodos

2.1 Reactivos y material de estudio

Los reactivos utilizados fueron: NaOH (J.T. Baker, México), celulasas de *Aspergillus niger* (Sigma-Aldrich, EE. UU). La celulasa de *Aspergillus niger* cataliza la hidrólisis de los enlaces endo-1,4-β-D-glucosídicos en la celulosa. Una unidad libera 1.0 μmol de glucosa de la celulosa en una hora a pH 5.0 a 37 °C.

2.2 Biomasa (Rastrojo de amaranto, RA)

El RA (*Amaranthus hypochondriacus*) se recolectó en parcelas ubicadas en el municipio de Santa Apolonia Teacalco (19°13'48.7"N 98°18'12.8"W) sembradas en el ciclo de temporal (abril-junio) en el estado de Tlaxcala, México. Las hojas y tallos de la planta se recolectaron después del proceso de trilla en sacos y se secaron al sol. Posteriormente, el material se trituro en un molino agrícola No.

20 (marca Swissmex turbo, México). El rastrojo triturado se tamizó con una malla No. 18 (Tyler, EE. UU) para obtener una homogeneización del tamaño de partícula (1 mm) y se depositó en bolsas de plástico.

2.3 Composición química proximal

La composición química proximal de la harina de RA se determinó de acuerdo con la metodología de la NORMA OFICIAL MEXICANA: Humedad (NMX-116 SSA1-1994), cenizas (NMX-F-607-NORMEX-2013), proteínas (NOM-155-SCFI-2012), extracto etéreo (contenido lipídico) (NOM-086-SSA1-1994), finalmente los carbohidratos totales se determinaron por diferencia.

2.4 Tratamientos físicos

a) Vapor (Rastrojo + Agua)

Se preparó una suspensión (RA/agua destilada) en una proporción de 1:10 p/v, ésta se molió mecánicamente durante 5 minutos. Posteriormente, se colocó en una autoclave a una temperatura de 121 °C y una presión de 1.05 kg cm⁻² por 5 horas. Se tomaron muestras de 2 mL a intervalos de una hora, y las muestras obtenidas se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 minutos a 25 °C (Subhedar y Gogate, 2016). La concentración de AF se determinó utilizando el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) con glucosa como estándar (Miller, 1959), para lo cual 1 mL de sobrenadante se mezcló con 1 mL de reactivo DNS. La mezcla de reacción se calentó a 100 °C por 10 minutos hasta obtener un color rojo-marrón, se dejó enfriar y se le añadieron 8 ml de agua destilada; finalmente, se midió la absorbancia a 540 nm.

b) Ultrasonido (Rastrojo + Agua)

Todos los experimentos con pretratamiento de ultrasonido se llevaron a cabo utilizando agua destilada para la suspensión 1:10 p/v (RA/agua destilada). Se utilizó un dispositivo ultrasónico Cole Parmer CPX 750, con frecuencia de 20 kHzv, potencia nominal de 750 W, sonda de titanio con diámetro de 1 cm. La sonda se insertó, aproximadamente, 2 cm en la mezcla de reacción (Subhedar et al., 2018). Los parámetros utilizados para el tratamiento de ultrasonido se resumen en la Tabla 1. Se tomaron muestras de 2 mL a intervalos regulares de 10 minutos por 60 minutos. Las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C (Subhedar y Gogate, 2016), el sobrenadante se utilizó para determinar los AF.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el tratamiento por ultrasonido.

Table 1. Parameters used in ultrasound treatment.

Parámetro	Valor
Tiempo de tratamiento	60 min
Potencia ultrasónica	100 W
Temperatura	50°C
Profundidad de inserción	≈2 cm
Ciclo de trabajo ^(a)	50 %, 70 %, 90 %
Amplitud ^(b)	75 %, 50 %
Intervalo de muestra	10 min

- (a) Se refiere a los ciclos de compresión y descompresión de la onda ultrasónica, ya sea continua (100 %) o pulsada (porcentajes)
- (b) Se refiere a la altura máxima de una onda, es decir, punto en el que la onda experimenta su alargamiento o distensión máximo desde la posición de equilibrio (75 % mayor alargamiento de onda que 50 %) (García, 2007).

2.5 Tratamiento químico

Se llevó a cabo en matraces Erlenmeyer de 200 mL, utilizando 100 mL de NaOH 3.5 N, obteniendo una suspensión 1:10 p/v (RA/solución alcalina). La suspensión se agitó a una velocidad de 200 rpm, se tomaron muestras de 2 mL a intervalos de 1 hora durante 5 horas continuas (Torres *et al.*, 2016). Las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C, el sobrenadante se utilizó para determinar los AF.

2.6 Tratamientos combinados

a) Pretratamiento alcalino con vapor

Se preparó una suspensión en una proporción de 1:10 p/v (RA/NaOH 3.5 N), que se trituró mecánicamente durante 5 minutos. Posteriormente, se colocó en una autoclave (120 °C, presión 1.06 kg cm⁻²) (Subhedar y Gogate, 2016). Se tomó una muestra de 2 mL cada hora durante el período de tratamiento de 5 horas. Las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C, el sobrenadante se utilizó para determinar los AF.

b) Pretratamiento alcalino-ultrasónico

En este tratamiento, se estudió el efecto de la concentración de NaOH (2 N, 2.5 N, 3 N y 3.5 N) en la producción de AF utilizando ultrasonido bajo las condiciones mencionadas en la Tabla 1. Se extrajeron muestras de 2 mL a intervalos regulares (cada 10 minutos por 60 minutos). Todas las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C, el sobrenadante se utilizó para determinar los AF; mientras que el precipitado se utilizó para el análisis de FTIR.

2.7 Análisis FTIR

El análisis de la estructura de las muestras de RA pretratadas se realizó utilizando un espectroscopio FTIR (modelo Dynascan Spectrum 100, Perkin Elmer, EE. UU.) empleando 2 mg del material de cada uno de los pretratamientos descritos. Los espectros se obtuvieron con una resolución de 4 cm⁻¹, en un rango de 4000-550 cm⁻¹ (Luo *et al.*, 2018).

2.8 Sacarificación del RA pretratado

a) Hidrólisis enzimática convencional

Después del pretratamiento, las muestras se hidrolizaron enzimáticamente con celulasa de *Aspergillus niger* (Sigma-Aldrich, EE. UU.) a pH 5.0. En un matraz Erlenmeyer de 100 mL se agregaron el RA pretratados (5 % p/v) y la enzima (0.5 % p/v). La mezcla se agitó a 300 rpm a 50 °C

por 8 horas con muestreo cada hora (Patil *et al.*, 2019). Las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C utilizando el sobrenadante para determinar los AF (azúcares reductores) por el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico, DNS (Miller, 1959).

b) Hidrólisis enzimática asistida por ultrasonido

Para investigar el efecto del ultrasonido en la hidrólisis enzimática del RA pretratado, se utilizó un dispositivo de ultrasonido a una frecuencia de 20 kHz y una potencia nominal de 750 W. Las condiciones específicas empleadas fueron: potencia de 50 W, 50 °C, ciclo de trabajo del 50 %, y amplitud del 75 % (Patil *et al.*, 2019; Subhedar *et al.*, 2018). La concentración del sustrato fue del 5 % p/v, mientras que la de la enzima fue del 0.5 % p/v. Se muestreó cada 15 minutos durante 120 minutos. Posteriormente, las muestras se centrifugaron 10 minutos a 10,000 rpm y 25 °C, el sobrenadante se utilizó para determinar los AF.

2.9 Diseño experimental y análisis de datos

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab 18. Cada análisis se realizó por triplicado y los resultados se expresaron como la media de estos. Se realizó un análisis de varianza para cada tratamiento, utilizando un ANOVA de una vía para tratamientos con una sola variable (I. Vapor, III. Hidrólisis alcalina, IV. Pretratamiento alcalino + vapor, V. Pretratamiento alcalino + ultrasonido). Se utilizó un diseño factorial 2³ para el tratamiento II, ultrasonido, donde se probaron 2 factores (amplitud (75 % y 50 %) y ciclos de trabajo (50 %, 70 %, 90 %)), para probar la diferencia de medias se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia ≤ al 0.05 %.

3. Resultados y discusión

3.1 Composición química proximal del RA

La composición química proximal de la harina de RA (Tabla 2) mostró valores similares a los reportados por Méndez-Arango *et al.* (2019), que encontraron porcentajes de proteínas carbohidratos, lípidos y cenizas de 10-11 %, 69-72 %, 0.7-1 % y 12 % respectivamente; al utilizar el tallo y las hojas de la planta. También informaron un mayor contenido proteico y de minerales que podría atribuirse a la presencia de microorganismos en las muestras. En otro estudio, se analizaron variedades de *Amaranthus hypochondriacus* (variedad No. 1008) para determinar su valor nutricional; el período experimental abarcó desde la emergencia de la inflorescencia hasta la maduración completa del grano, es decir, del día 80 hasta el día 120 del cultivo (Tabla 3). En este periodo, el contenido de proteína bruta y de ceniza cruda disminuyeron significativamente; mientras que el contenido de extracto etéreo y el de la fibra cruda aumentaron significativamente. La cantidad de proteína en el período entre los días 80 y 90 de cultivo sugiere que las plantas podrían usarse como sustituto de nutrientes para forrajes convencionales (Písaříková *et al.*, 2006). Del mismo modo, Nogoy *et al.* (2020) mostraron contenidos de 11.95–14.19 % de proteína bruta, 45.53–70.88 % de fibra detergente neutro (FDN) y 34.17–49.83 % de fibra detergente ácida (FDA) en forraje de amaranto. La alta composición de nutrientes, la degradabilidad efectiva de la materia seca y la proteína bruta, junto con las características de fermentación favorables, sugieren que el forraje de amaranto permitiría una calidad de alimentación de buena a excelente para el ganado. La variación en los

porcentajes de composición química observados en estos estudios puede atribuirse a factores como la especie de planta, las condiciones ambientales y las características fisiográficas de los lugares de cultivo (García-Pereyra *et al.*, 2009).

Tabla 2. Composición química en porcentaje base seca de los rastrojos de amaranto de la especie *Amaranthus hypochondriacus*.

Table 2. Chemical composition in dry percentage of amaranth stubble of the species *Amaranthus hypochondriacus*

Parámetro	Contenido (%)*
Humedad	9.6 ± 0.05
Cenizas	5.9 ± 0.00
Grasa	0.3 ± 0.02
Proteína	9.6 ± 0.09
Carbohidratos totales	74.6 ± 0.6

*Media ± desviación estándar, n=3.

Tabla 3. Valor nutricional de variedades de *Amaranthus hypochondriacus* (variedad No. 1008) desde la emergencia de la inflorescencia hasta la maduración completa del grano

Table 3. Nutritional value of *Amaranthus hypochondriacus* varieties (variety No. 1008) from inflorescence emergence to full grain maturation

Parámetro	Emergencia de la inflorescencia Contenido (%)	Maduración completa del grano Contenido (%)
Cenizas	16.99 ± 0.014 – 19.22 ± 0.042	12.97 ± 0.014 – 13.84 ± 0.021
Grasa	1.22 ± 0.014 – 1.59 ± 0.028	2.80 ± 0.028 – 3.64 ± 0.014
Proteína	15.82 ± 0.120 – 18.54 ± 0.233	10.38 ± 0.120 – 11.31 ± 0.001
Fibra cruda	14.49 ± 0.212 – 17.00 ± 0.368	18.36 ± 0.70 – 27.60 ± 0.120

(Písaříková *et al.*, 2006)

3.2 AF de diferentes métodos de pretratamiento

Un criterio importante para medir la efectividad de los pretratamientos es la determinación del contenido de AF, que puede tomarse como un indicador indirecto de la degradación lignocelulósica (Reales *et al.*, 2016).

a) Vapor (presión y temperatura)

La Fig. 1 muestra los resultados obtenidos en el pretratamiento con vapor, donde se logró una concentración de 6.3 mg mL⁻¹ de AF en 5 horas de tratamiento. Se observó que no hubo diferencias significativas en la concentración de AF a las 4 y 5 horas, por lo que no se consideró necesario prolongar el tiempo de tratamiento y se fijó en 5 horas de exposición al vapor. Los tratamientos de 1, 2 y 3 horas exhiben diferencias significativas en comparación con los demás (Fig. 1). La presión y

la temperatura son factores clave en este tratamiento (1.05 kg cm^{-2} , 121°C). Según la literatura, este método induce la autohidrólisis ácida, que se atribuye a la liberación de residuos acetilos de las hemicelulosas. Estos residuos producen ácido acético, que, debido a las temperaturas del proceso, cataliza la hidrólisis de la hemicelulosa (Harmsen, 2010).

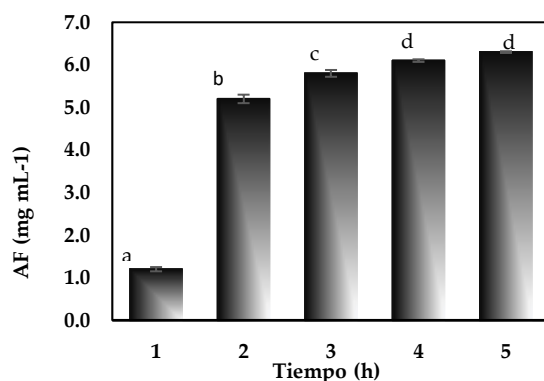


Figura. 1. Concentración de AF obtenidas en el tratamiento con vapor.

Figure. 1. FS concentration obtained in steam treatment.

Las medias señaladas con diferente letra a, b, c, y d son significativamente diferente a una * ($P \leq 0.05$)

b) Pretratamiento con ultrasonido

En este pretratamiento, se estudió el efecto del ciclo de trabajo y la amplitud de onda (Patil *et al.*, 2019; Subhedar *et al.*, 2018) en la producción de azúcares reductores. Los resultados se pueden observar en la Fig. 2, que muestra los tratamientos con diferentes combinaciones de ciclo de trabajo y amplitud obtenidos en 1 hora de tratamiento. La concentración más alta de AF se obtuvo con la combinación II-A (ciclo de trabajo del 50 % (encendido 25 s, apagado 25 s) y amplitud de onda del 75 %. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en comparación con los resultados obtenidos con la combinación II-B (ciclo de trabajo del 70 % y amplitud del 75 %) y II-C (ciclo de trabajo del 90 %, amplitud del 75 %), pero hubo diferencias en comparación con II-D (ciclo de trabajo del 50 %, amplitud del 50 %). Los tratamientos II-E (ciclo de trabajo del 70 %, amplitud del 50 %) y II-F (ciclo de trabajo del 90 %, amplitud del 50 %) fueron significativamente similares al tratamiento II-C. Por otro lado, se encontraron diferencias significativas entre los dos porcentajes de amplitud probados (75 % y 50 %). El efecto del ultrasonido en el material vegetal se refleja en la estructura de la pared celular, donde los ciclos de ondas de alta y baja presión generan pequeñas burbujas o microburbujas (cavitación) que implosionan debido a cambios abruptos de presión, causando cizallamiento en el material vegetal. Esto significa que hay una interrupción del material fibroso y de celulosa (Subhedar *et al.*, 2018). Como se mencionó anteriormente, se encontró que el efecto del ciclo de trabajo del 50 % (II-A) en combinación con una amplitud del 75 % era adecuado para el proceso de pretratamiento del RA. Los resultados obtenidos con respecto al porcentaje de ciclo de trabajo (50 %) difieren de los presentados por Patil *et al.* (2019), quienes investigaron el efecto del ciclo de trabajo en la sonicación de aserrín para obtener azúcares reductores, encontrando que un ciclo de trabajo del 70 % era adecuado para este material vegetal. Sin embargo, para el RA, un ciclo de trabajo del 70 % no se considera adecuado ya que produjo un resultado inferior (7.4 mg mL^{-1}) en comparación con el ciclo

del 50 %, aunque estadísticamente no hay diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la producción de AF entre ambos ciclos.

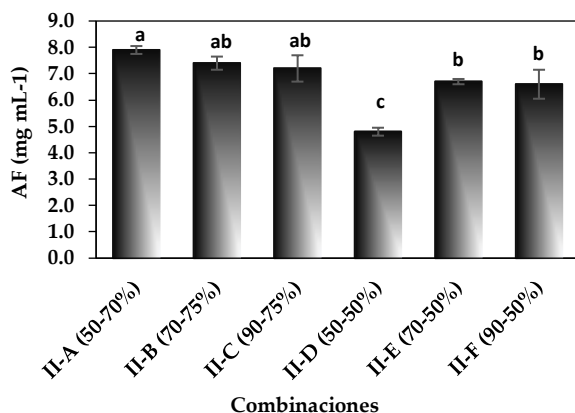


Figura 2. Efecto del ciclo de trabajo y la amplitud de sonicación en la producción de azúcares reductores en el tratamiento con ultrasonido

Figure 2. Effect of duty cycle and sonication amplitude on the production of reducing sugars in ultrasound treatment

Las medias señaladas con diferente letra a, b, c, y d son significativamente diferente a una * ($P \leq 0.05$).

Por otro lado, Subhedar *et al.* (2018) investigó la producción de AF a partir de cáscaras de nuez, coco y pistacho utilizando el mismo ciclo de trabajo (70 %) reportado por Patil *et al.* (2019), obteniendo resultados variados dependiendo del material vegetal utilizado (Subhedar *et al.*, 2018). Sin embargo, Nagula y Pandit (2016) estudiaron diversas técnicas de deslignificación, incluido, el tratamiento alcalino asistido por ultrasonido, de pasto Napier, y encontraron que un ciclo de trabajo del 50 % es óptimo para este material, lo cual es consistente con los hallazgos de este estudio. Por lo tanto, se considera que el tipo de material vegetal influye en la selección de los parámetros del proceso. Yadav *et al.* (2023) mencionaron que, a mayor tamaño de partícula, se requiere más energía y tiempo para que las ondas penetren. Cabe mencionar que el ciclo de trabajo es uno de los factores determinantes para el proceso de sonicación. Es importante tener en cuenta que el uso de un ciclo de trabajo excesivamente alto causará problemas como el aumento de la temperatura de reacción, la disipación de energía, la erosión del transductor y la formación de espuma, por lo tanto, se debe evitar (Patil *et al.*, 2019).

c) Pretratamiento alcalino

La Fig. 3 muestra los resultados obtenidos en el pretratamiento con NaOH 3.5 N durante un tiempo total de tratamiento de 5 horas. Se puede observar que no hay diferencias significativas entre los tiempos de 1 y 2 horas, ni entre los tiempos de 3 y 4 horas. Sin embargo, la producción de AF a las 5 horas fue significativamente diferente de las demás. El grado de deslignificación aumenta proporcionalmente con la concentración de álcali, confirmando que un valor de pH alcalino es favorable para el pretratamiento de material lignocelulósico (Jiang *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2019; Subhedar *et al.*, 2018; Qing *et al.*, 2017). El mecanismo general de los efectos del pretratamiento con NaOH sobre los componentes estructurales de la biomasa ya se ha informado en otros trabajos (Modenbach y Nokes, 2014; Xu y Cheng, 2011), en términos generales, el NaOH provoca la hinchazón de la biomasa debido a los iones generados; también saponifica los enlaces éster de la

lignina y la hemicelulosa, rompiendo los enlaces lignina-carbohidrato (C-O), lo que resulta en un aumento en la superficie interna y una disminución en el área cristalina de la celulosa, haciéndola más accesible para las enzimas (Chen *et al.*, 2007). En paja de arroz, cuando se probaron diferentes concentraciones de NaOH (2-6 % p/v), la mayor concentración de glucosa (18 mg mL^{-1}) se obtuvo cuando se utilizó 6 % p/v de NaOH (Xu y Cheng, 2011). Por otro lado, para el pretratamiento de bagazo de caña de azúcar Meléndez *et al.* (2015) obteniendo una concentración de 25 mg mL^{-1} de azúcares reductores después de 8 horas de tratamiento en una mezcla con 60 g de bagazo natural y 35 mL de NaOH al 50 % p/v. Estos valores fueron más altos que los obtenidos en este estudio, sin embargo, la concentración de álcali y el tiempo de tratamiento fueron menores.

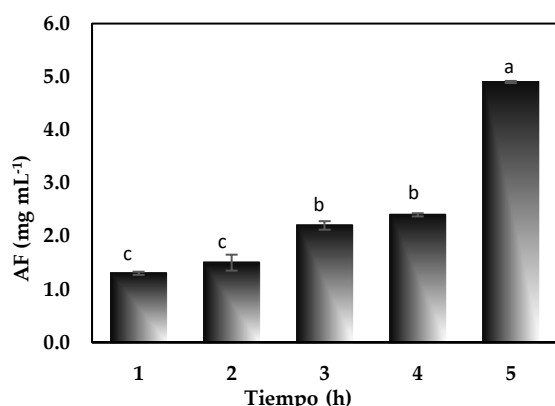


Figura 3. Concentración de AF obtenida en el tratamiento químico (NaOH 3.5 N).

Figure 3. Concentration of FS obtained in chemical treatment (3.5 N NaOH).

Las medias sin compartir letras son significativamente diferentes * ($P \leq 0.05$).

d) Pretratamiento alcalino + vapor

En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos de este tratamiento. En la primera hora de exposición al vapor, se obtuvo una concentración de 1.9 mg mL^{-1} de AF, que aumentó a 2.4 mg mL^{-1} después de 3 horas de tratamiento; estas concentraciones no fueron significativamente diferentes. En un estudio realizado por Gómez *et al.* (2013), donde utilizaron residuos de diferentes maderas (*Pinus patula* y *Eucalyptus camaldulensis*) para obtener AF, probaron la misma temperatura que en este estudio (121°C) pero a una presión más alta (29 PSI). Emplearon una relación sólido-líquido de 1:15 p/v y una concentración de NaOH al 1 % p/p durante 30 minutos, lo que resultó en rendimientos respectivos de 2.17 y 2.61 mg mL^{-1} de AF. Dado que es un método combinado, se esperaban mejores resultados, ya que teóricamente, el vapor causaría una interrupción de las paredes celulares mediante la hinchazón, permitiendo una mejor penetración del ion OH^- del NaOH rompiendo los enlaces de la estructura básica de la lignina, mientras que los iones Na^+ se unirían a la lignina para formar fenolato de sodio (Modenbach y Nokes, 2014).

Este fenolato es soluble con color negro en la solución, y se llama lixiviado negro o licor negro (Dewi *et al.*, 2019). Sin embargo, se considera que ocurrió una reacción de Maillard en este método, ya que las condiciones necesarias para esta reacción estaban presentes: la presencia de un compuesto carbonílico (azúcares reductores) y una amina (aminoácido, péptido o proteína), ambos presentes en el RA. Esta reacción se favorece a pH alcalino (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019). Uno de los factores físicos atribuidos a la ocurrencia de esta reacción es el aspecto oscuro de la suspensión, así

como el aroma a pan horneado que se liberó (Arias-Giraldo and López-Velasco, 2019). Por lo tanto, este método no se consideró viable para su uso como pretratamiento para el RA.

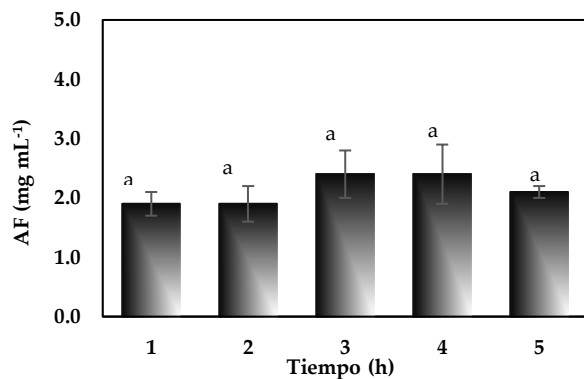


Figura 4. Concentración de AF obtenida en el tratamiento combinado (NaOH 3.5 N + vapor).

Figure 4. Concentration of AF obtained in the combined treatment (3.5 N NaOH + steam).

Las medias sin compartir letras son significativamente diferentes * ($P \leq 0.05$).

e) Pretratamiento alcalino + Ultrasonido

En este método, se evaluó el efecto de la concentración de NaOH (2N, 2.5N, 3N y 3.5N) y la potencia de ultrasonido en la producción de azúcares reductores. Como se puede observar en la Fig. 5, no hubo diferencias significativas entre las concentraciones de NaOH 2N y 2.5N, mientras que en las concentraciones de 3N y 3.5N se encontraron diferencias significativas en la producción de AF. El contenido de celulosa del RA aumentó con la concentración creciente de NaOH, siendo la concentración más alta (3.5N) la que ofreció los mejores resultados en términos de obtención de AF. Estos resultados son consistentes con los mencionados por (Wu *et al.*, 2017), quienes afirmaron que una mayor concentración alcalina conduce a una mayor degradación de la lignina y la hemicelulosa, sin degradar la celulosa.

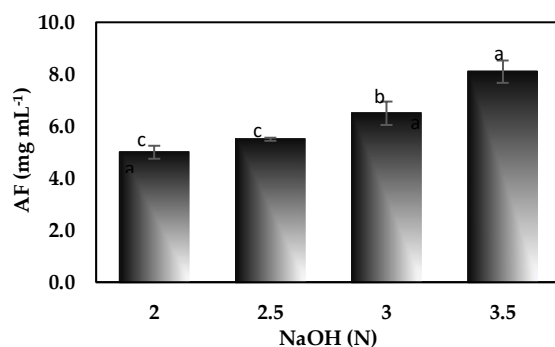


Figura 5. Efecto de la concentración de NaOH en la producción de AF después del tratamiento de ultrasonido

Figure 5. Effect of NaOH concentration on the production of FS after ultrasound treatment

Las medias sin compartir letras son significativamente diferentes * ($P \leq 0.05$).

En otros estudios en los que se utilizó bagazo de caña de azúcar como sustrato (Torres *et al.*, 2016), se encontró que con 0.125 g de hidróxido de sodio y una potencia de 140 W durante 30 minutos, se podían obtener 24 mg mL⁻¹ de AF. Wu *et al.* (2017) utilizaron paja de arroz como sustrato, probando varias concentraciones de NaOH (0.4 %, 0.6 %, 0.8 % y 1.0 % p/v) y dos temperaturas (23 °C y 50 °C). Mantuvieron el tratamiento con ultrasonido durante una hora a 22 kHz, con un tiempo de encendido/apagado de 2 y 4 segundos. Cabe destacar que la potencia utilizada (300 W) fue mayor que la utilizada en este estudio. Por otro lado, Wang *et al.* (2017) obtuvieron 2.8 mg mL⁻¹ de glucosa utilizando residuos de hierba podada, empleando un 5 % p/p de NaOH, una frecuencia de 25 kHz (mayor que la utilizada en este estudio, 20 kHz) y una potencia de 60 W.

Es importante destacar que los valores más altos de AF en este estudio se obtuvieron con este pretratamiento alcalino asistido por ultrasonido, lo que puede atribuirse a la alta concentración de hidróxido de sodio utilizada. A medida que aumenta la concentración de NaOH, aumentan los iones hidroxilo, facilitando la degradación de la lignina. Además, según la literatura (Araujo *et al.*, 2019; Hernández-Beltrán *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2017; Subhedar y Gogate, 2016; Harmsen, 2010), los iones Na⁺ tienen un diámetro capaz de penetrar en los poros más pequeños de la matriz lignocelulósica y, debido a su capacidad oxidativa, actúan sobre los enlaces éster y éter de la lignina. Varios estudios (Torres da Silva *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017; Gómez *et al.*, 2013; Xu y Cheng, 2011) centrados en procesos de deslignificación han informado que el requerimiento alcalino es menor en procesos asistidos por ultrasonido en comparación con los procesos convencionales. Sin embargo, esto no se observó en este trabajo. La asistencia ultrasónica hace que la matriz lignocelulósica del material vegetal se abra, facilitando la penetración del reactivo alcalino y ayudando en la degradación de la lignocelulosa, junto con un tiempo de reacción más corto (Patil *et al.*, 2019), sin embargo, esto depende de la biomasa vegetal que se esté utilizando. Por otro lado, el control de la temperatura es un factor importante en tales tratamientos porque el NaOH, junto con la potencia del sonicator, puede aumentar la temperatura, afectando la liberación de AF (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019). Por eso, en este trabajo, la temperatura se mantuvo constante a 50 °C.

f) Comparación de la productividad entre los métodos empleados

Los resultados obtenidos de los tratamientos aplicados al RA se observan en la Fig. 6. Se muestra la concentración de AF obtenida en un tiempo de reacción de 1 hora para cada tratamiento. Se observaron diferencias significativas en los tratamientos ultrasónicos (ultrasonido y ultrasónico asistido químicamente) en comparación con los métodos convencionales (vapor, alcalino, alcalino + vapor), lo que es consistente con la literatura existente sobre el uso del ultrasonido. Las operaciones de pretatamiento tradicionales para la biomasa lignocelulósica se han encontrado ineficientes para la adaptación industrial. Por lo tanto, se han explorado tecnologías alternativas como microondas, ultrasonido, solventes eutécticos profundos, irradiación y métodos de pretatamiento asistidos por alta fuerza para la valorización efectiva de la biomasa lignocelulósica (Halder y Purkait, 2021).

Es evidente que la eficiencia de la conversión de materiales lignocelulósicos en AF debe estudiarse, no sólo en términos de la cantidad de AF producidos, sino también en términos de la energía consumida para el proceso de conversión. Se espera una correlación directa entre estos dos factores, que debe destacarse en un análisis integral, abarcando tanto la eficiencia de conversión como el costo del proceso. El pretratamiento químico ha ganado atención significativa debido a su menor costo, tasas de reacción más rápidas y eficiencia superior para mejorar la degradación de moléculas orgánicas complejas (Hernández-Beltrán *et al.*, 2019).

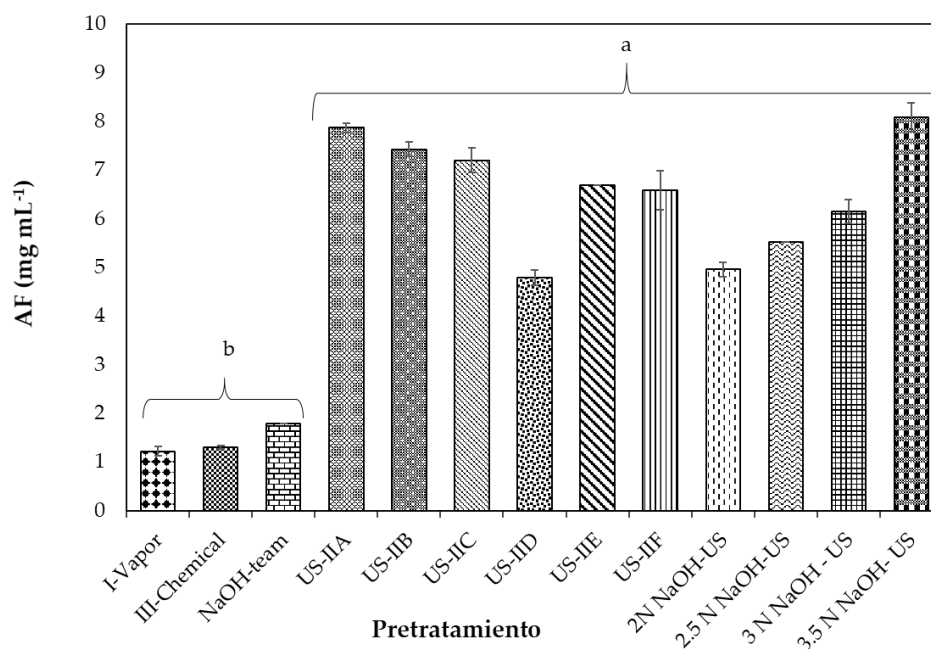


Figura 6. Comparación del efecto del ultrasonido combinado con diferentes pretratamientos.

Figure 6. Comparison of the effect of ultrasound combined with different pretreatments.

Las medias sin compartir letras son significativamente diferentes $^*(P \leq 0.05)$.

3.3 Análisis estructural mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR del RA (Fig. 7) revelan que los perfiles espectrales de la mayoría de las bandas son similares, indicando que las muestras de RA con diferentes tratamientos de pretratamiento conservan los mismos grupos funcionales. Sin embargo, se observa una diferencia significativa entre los picos de los tratamientos químicos asistidos por ultrasonido y los tratamientos físicos asistidos por ultrasonido, en comparación con el rastrojo sin tratar utilizado como referencia. Se puede observar (Fig. 7) que todas las muestras, incluida la referencia, presentan una banda ancha entre 3200 y 3400 cm^{-1} , que se atribuye a las vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo. Aunque otros autores (Luo *et al.*, 2018; Ghaffar y Fan, 2013) sitúan este grupo en 3310-3350 cm^{-1} , principalmente proveniente de la asociación entre celulosa y hemicelulosa, influenciada por su concentración en las muestras analizadas. Este grupo funcional se encontró en el rango de 3000-3650 cm^{-1} , mientras que el grupo metilo (CH_3) se posiciona en 2934 cm^{-1} (Luo *et al.*, 2018).

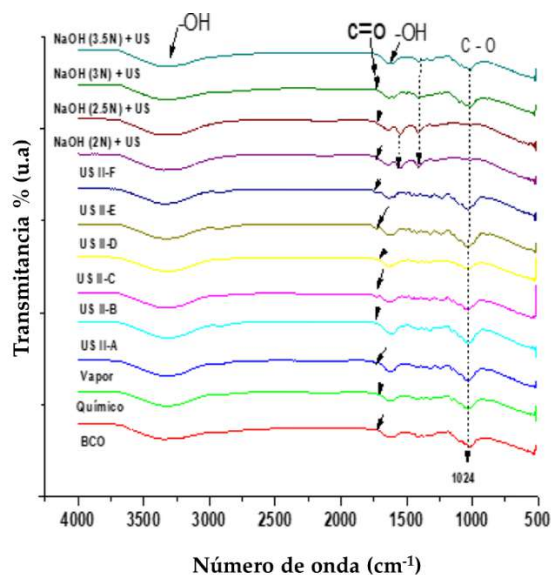


Figura 7. Espectros de FTIR de los diferentes pretratamientos aplicados al RA
Figure 7. FTIR spectra of the different pretreatments applied to amaranth stubble

Los picos ubicados a 1634.91 cm^{-1} y 1024 cm^{-1} corresponden al estiramiento característico de grupos carbonilo, que están interconectados con las cadenas de celulosa mediante enlaces de hidrógeno. La presencia de este grupo se puede observar en la mayoría de las muestras, excepto en los tratamientos con NaOH N + US, con una ausencia más notable en el tratamiento con NaOH 3.5 N + US. Este resultado puede indicar la eficiencia de este método, y se puede corroborar aún más en la Fig. 8, donde sólo se presentan los espectros de los tratamientos con los mejores resultados en términos de liberación de AF (US II A y NaOH 3.5 N + US).

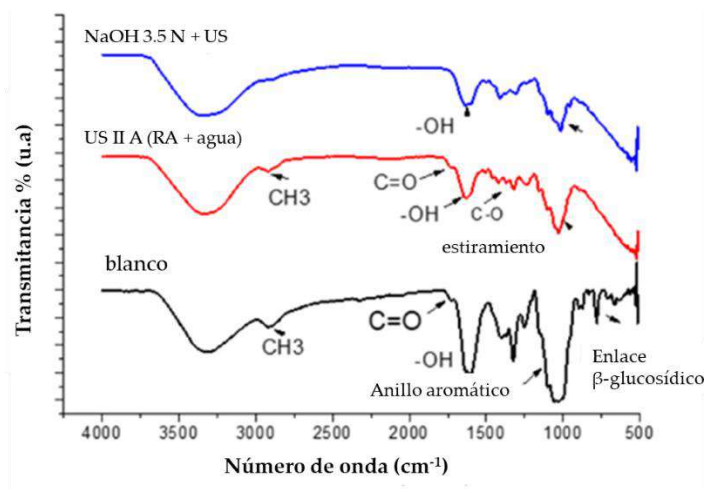


Figura 8. Espectros de FTIR de los tratamientos que produjeron la mayor concentración de AF
Figure 8. FTIR spectra of the treatments that produced the highest concentration of FS

La banda de absorción en el rango de $1015\text{--}1027\text{ cm}^{-1}$, asociada con hemicelulosa, se atribuye a la flexión del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). El pico a 1024.15 cm^{-1} se atribuye al estiramiento del enlace $\text{C}-\text{O}$, y las bandas indican deformaciones en celulosa y hemicelulosa. En los tratamientos con hidróxido de sodio (NaOH) 2 N y 2.5 N (Fig. 7), se observa la presencia de dos picos de corta duración en las bandas $1570\text{--}1414\text{ cm}^{-1}$, que no se visualizan en las otras concentraciones (3 N y 3.5 N). La asignación de bandas de absorción para lignina incluye típicamente la vibración del anillo aromático a 1606 , 1507 y 1434 cm^{-1} , con la vibración aromática en un semicírculo (involucrando estiramiento $\text{C}-\text{C}$ y un cambio en el ángulo de enlace $\text{H}-\text{C}-\text{C}$) asignada a 1507 cm^{-1} .

El estiramiento de los grupos carbonilo, de las cetonas y carboxilos no conjugados se extiende a 1732 cm^{-1} (Ghaffar y Fan, 2013). Las bandas 1606 cm^{-1} y $1645\text{--}1507\text{ cm}^{-1}$ se han atribuido al anillo aromático de la lignina por Luo *et al.* (2018), mientras que Ghaffar y Fan (2013) lo ubican en 1434 cm^{-1} . Además, se detectó una banda semiancha en el rango de $897\text{--}918\text{ cm}^{-1}$, típicamente asociada con uniones β -glucosídicas entre unidades de azúcares en hemicelulosa, particularmente en la región anómera (Luo *et al.*, 2018). Los picos por debajo de 500 cm^{-1} corresponden a compuestos inorgánicos presentes en la muestra. La Fig. 8 presenta exclusivamente los espectros de los tratamientos más exitosos, junto con el espectro de referencia no tratado (rastreo no tratado), con fines comparativos.

En la banda 2934 cm^{-1} , se observa el pico correspondiente al grupo metilo (CH_3). El grupo carbonilo, representativo de la lignina, está presente a 1737 cm^{-1} tanto en el blanco como en el tratamiento de ultrasonido, pero está ausente en el tratamiento químico asistido por ultrasonido. Además, se indica la presencia de grupos hidroxilo en la posición 1636 cm^{-1} , seguido de picos correspondientes al estiramiento de los enlaces Carbono-Oxígeno ($\text{C}-\text{O}$). Estos espectros confirman cambios notables en la estructura del material lignocelulósico, siendo el tratamiento con NaOH más ultrasonido el que exhibe cambios más pronunciados. Cualitativamente, basándose en los resultados de las derivadas obtenidas con el software Origin 8.5.1 (OriginLab Corporation, USA), se estimó que el tratamiento de ultrasonido con agua destilada redujo el contenido de lignina en un 70 %, mientras que el tratamiento de NaOH 3.5 N más ultrasonido logró una reducción del 99 % (Fig. 9).

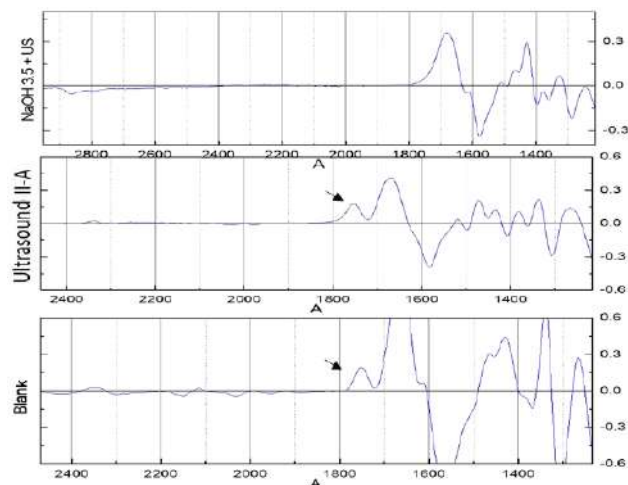


Figura 9. Derivada del pico de absorción perteneciente al grupo carbonilo de la lignina.

Figure 9. Derivative of the absorption peak belonging to the carbonyl group of lignin

Existen varios estudios que utilizaron pretratamiento de la biomasa con NaOH asistido de ultrasonido reportando diversos porcentajes de deslignificación. Uno de los estudios fue el realizado por Subhedar *et al.* (2018) quienes reportaron el 68 % de eliminación de lignina en semillas de bon bogori (*Ziziphus rugosa*), 65 % en cáscara de nuez de areca (*Areca catechu*) y 64 % en semillas de moj (*Albizia lucida*). Además, Subhedar *et al.* (2018) reportaron la eficiencia de deslignificación del 70.4 % (cáscara de cacahuete), 80.0 % (fibra de coco) y 78.9 % (cáscaras de pistacho) Por otro lado, (Mohapatra *et al.*, 2017) informaron eficiencias de eliminación de lignina del 80.4 % y 82.1 % para la hierba Denanath y la hierba híbrida Napier, respectivamente, después del pretratamiento ácido asistido por ultrasonido. También se observó que un aumento en la potencia de la sonicación mejoró la eficiencia de deslignificación.

3.4 Hidrólisis enzimática convencional

La liberación de AF en la etapa de sacarificación dependerá de la eficiencia del pretratamiento (Reales *et al.*, 2016); de los 2 tratamientos con los que se obtuvo la mayor concentración de azúcares fermentables (NaOH 3.5 N US y US II A) se seleccionó, para realizar la hidrólisis enzimática convencional y la asistida con US, el que tuvo menor gasto de insumos y generó menos residuos contaminantes, es decir, el producto del pretratamiento US II A (RA + agua). Los resultados de la cinética de hidrólisis enzimática del RA pretratado para la conversión a AF y la productividad en gramos de AF por gramo de sustrato utilizado ($\text{g AF g}_{\text{sustrato}}^{-1}$) se muestra en la Fig. 10. La mayor concentración de AF (4.8 mg mL^{-1}) se alcanzó a las 4 horas. Otros estudios han informado tiempos de reacción de 4.5 y 6 horas, con resultados comparables a los obtenidos en este estudio (Patil *et al.*, 2019; Subhedar *et al.*, 2018). El análisis del rendimiento de la enzima se llevó a cabo durante períodos más largos, como 75 y 80 horas; la productividad se mantuvo constante alrededor de $0.08 \text{ (g AF g}_{\text{sustrato}}^{-1})$. Estos datos no se muestran, pero demostraron que la actividad enzimática fue máxima a las 8 horas de tiempo de reacción. La composición química del sustrato influye en el rendimiento de la hidrólisis, así como en la cantidad de azúcares liberados. Además, factores como la concentración del sustrato, el tipo y el tamaño de partícula juegan un papel en la eficiencia del proceso. Cabe destacar que algunos estudios (Subhedar y Gogate, 2016) utilizaron tamaños de partícula definidos, que probablemente sean más pequeños que los utilizados en este estudio.

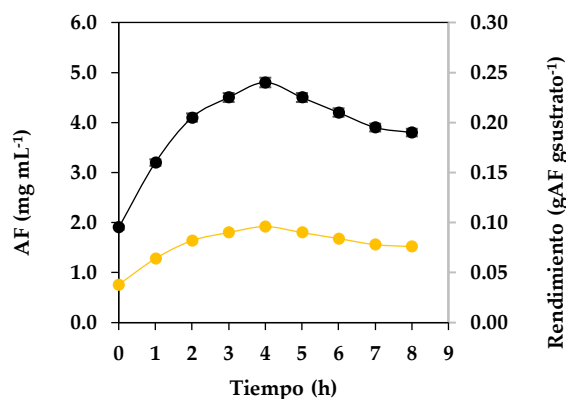


Figura 10. AF obtenidos durante el proceso de hidrólisis enzimática convencional de RA pretratado.

Figure 10. FS obtained during the conventional enzymatic hydrolysis process of AS pretrated.

Dewi *et al.* (2019) evaluaron la hidrólisis de la cáscara de arroz utilizando la misma enzima usada en este estudio a un pH de 5.0, 50 °C y 72 horas de hidrólisis, con sustrato del 5 % (p/v) y 0.3 mL g⁻¹ de la enzima; obteniendo 39.89 mg mL⁻¹ de AF con un rendimiento del 73.2 %. Por otro lado, Cruz-Cardona *et al.* (2019) utilizaron residuos de cebada como sustrato y evaluaron Viscozyme L (actividades β-glucanasa, celulasa, hemicelulasa y xilanasa), Celluclast 1.5L (derivado de *Trichoderma reesei*), Hemicelulasa (derivada de *Aspergillus niger*) y Xilanasa (derivada de *Aspergillus oryzae*). Los tratamientos enzimáticos se llevaron a 50 °C, con agitación constante a 250 rpm, pH 5.0, sustrato 5 % (p/v). El valor máximo de glucosa obtenido fue de 16.5 mg mL⁻¹ para Viscozyme L. En otro estudio, utilizaron residuos de poda de 2 variedades de césped: elefante (*Pennisetum* sp) y King (*Pennisetum hybridum*) (Cardona *et al.*, 2013); la reacción se llevó a cabo de la siguiente manera: 30 FPU g⁻¹ de biomasa de Accellerase 1500, 50 °C, agitación a 180 rpm, pH 4.8 y 11 % (p/v) de césped. Las concentraciones máximas de AF fueron de 515.6 y 563.3 mg g⁻¹ de biomasa para césped elefante y césped King respectivamente. Las variables con mayor influencia en el proceso de hidrólisis fueron la accesibilidad del sustrato al ataque enzimático, la temperatura y la cantidad de sustrato utilizada; que en este trabajo fue similar a la utilizada en los estudios mencionados (Dewi *et al.*, 2019; Patil *et al.*, 2019).

3.5 Hidrólisis enzimática asistida por ultrasonido

Los resultados obtenidos de la hidrólisis asistida por ultrasonido se presentan en la Fig. 11. Se puede observar un aumento en la liberación de AF a medida que aumenta el tiempo de reacción. Sin embargo, la mayor concentración de obtuvo a los 75 minutos, y a partir de los 90 minutos en adelante, la concentración de AF se mantuvo constante. Además, el uso del ultrasonido mostró un aumento significativo y una reducción en la concentración y el tiempo requerido para la liberación de AF, en comparación con el enfoque convencional. Estos resultados se atribuyen al efecto de cavitación de las ondas ultrasónicas, que genera fuerzas de corte elevadas que rompen los conglomerados de partículas, dispersándolos en partículas individuales y facilitando la acción de las enzimas sobre el sustrato (Dewi *et al.*, 2019). El rendimiento fue mayor en comparación con el obtenido con el enfoque convencional (Fig. 11), esto podría atribuirse a la asistencia del ultrasonido.

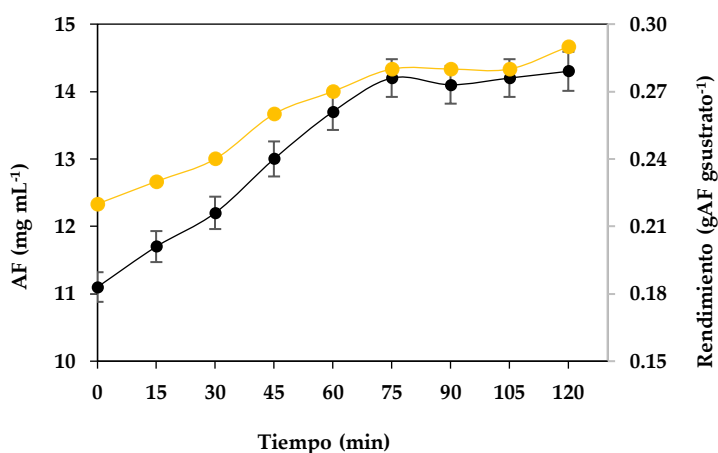


Figura 11. AF obtenidos durante la hidrólisis enzimática asistida por ultrasonido y la productividad del sistema de RA pretratado.

Figure 11. FS obtained during ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis and system productivity of AS pretrated.

En estudios centrados en la obtención de AF en el proceso de sacarificación, Huang *et al.* (2020) obtuvieron un concentrado de glucosa de 3.1 mg mL^{-1} en 24 horas utilizando corontas de maíz y celulasa comercial. Mencionan que el sustrato pretratado con ultrasonido produjo un rendimiento de glucosa más alto (45.5-52.1 %) en comparación con el sustrato no tratado (19.9 %). De manera similar, Lunelli *et al.*, (2014) utilizaron bagazo de caña de azúcar y obtuvieron un rendimiento de $0.26 \text{ gAF g de sustrato}^{-1}$. Por otro lado, Subhedar *et al.* (2018) investigaron las condiciones óptimas para obtener AF a partir cáscaras de cacahuete, fibra de coco y cáscaras de pistacho; el rendimiento fue de 10.2, 12.1 y 8.1 mg mL^{-1} , respectivamente. Reportaron en su estudio que el ultrasonido mejoró la actividad catalítica y redujo la barrera de difusión que rodea al sustrato, lo que lleva a un aumento de las tasas de reacción de hidrólisis (Subhedar *et al.*, 2018). Las condiciones utilizadas en su investigación (temperatura, potencia, ciclo de trabajo) fueron similares a las de este estudio. Gasparotto *et al.*, (2015), por otro lado, probó que el uso bagazo de caña de azúcar y una celulasa comercial aplicando ultrasonido mejoró la hidrólisis enzimática, dando como resultado 89.37 % más AF que con el sustrato no sonificado. En otro estudio con bagazo de caña de azúcar (Meléndez-Hernández *et al.*, 2016) en el que trabajaron bajo condiciones óptimas obtuvieron un rendimiento del 62.69 % y una concentración de AF de 24.99 mg mL^{-1} . En general, con la hidrólisis enzimática asistida con ultrasonido, las concentraciones de AF fueron mayores en comparación con la hidrólisis convencional, junto con una reducción significativa en el tiempo de reacción.

4. Conclusiones

Los mejores resultados se obtuvieron con pretratamientos asistidos por ultrasonido. El proceso de deslignificación se ve favorecido por la asistencia del ultrasonido. No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de AF obtenidas con los métodos físicos (rastrojo + agua asistido por ultrasonido) y el método combinado (NaOH 3.5 N + US) ($P \leq 0.05$). Los espectros FTIR demostraron que la modificación estructural de la lignina y de compuestos con enlaces β -glucosídicos fueron observados con el método físico (US II A) y el método combinado (NaOH 3.5 N + US), obteniéndose el mayor porcentaje de modificación estructural con este último. Sin embargo, es importante especificar que, desde una perspectiva ecológica y económica, el método apropiado para el rastro de amaranto es el método físico US II A (RA + agua + ultrasonido). Basándonos en los resultados obtenidos en el proceso de sacarificación, se sugiere utilizar la hidrólisis enzimática asistida por ultrasonido en futuros estudios para la sacarificación del rastrojo de amaranto pretratado.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, M.J.G.G.; investigación, D.Y.C.V.; recursos, M.J.G.G., O.N.G., C.N.H. y J.C.A.; redacción-redacción del borrador original, M.J.G.G.; redacción-revisión y edición, O.N.G., C.N.H. y J.C.A.; visualización, M.J.G.G., O.N.G., C.N.H. y J.C.A.; supervisión, M.J.G.G.; administración del proyecto, M.J.G.G.; obtención de financiación, M.J.G.G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Chávez-Valerio, D. Y. agradece la beca de Maestría de CONAHCyT (942292). Proyecto financiado por CONAHCyT convocatoria Ciencia Básica y de Frontera 2023-2024 (CBF2023-2024-4368).

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés para la publicación de estos resultados.

Nomenclatura

AF	Azúcares fermentables
RA	Rastrojo de amaranto
bs	base seca
DNS	Ácido dinitrosalicílico
NaOH	Hidróxido de sodio
N	Concentración Normal
FTIR	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio
KOH	Hidróxido de potasio
p/v	Relación peso volumen
p/p	Relación peso peso
rpm	Revoluciones por minuto
FDN	fibra detergente neutra
FDA	fibra detergente ácida
CH ₃	grupo metilo
US	ultrasonido
M	Concentración molar
AS	Amaranth stubble

5. Referencias

- Araújo, D., Vilarinho, M., & Machado, A. (2019). Effect of combined dilute-alkaline and green pretreatments on corn cob fractionation: Pretreated biomass characterization and regenerated cellulose film production. *Industrial Crops and Products*, 141: 111785. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111785>
- Arce, M. B. (2011). Obtención de compuestos biofuncionales a partir del material lignocelulósico de *Amaranthus hypochondriacus* L. (Tesis de Maestría, Universidad de Autónoma Metropolitana). <https://doi.org/10.24275/uami.2b88qc43c>

- Arias-Giraldo, S., & López-Velasco, D. M. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, 22: 123–136. <https://doi.org/10.21501/21454086.3252>
- Bressani, R. (1989). The proteins of grain amaranth. *Food Reviews International*, 5(1), 13–38. <https://doi.org/10.1080/87559128909540843>
- Cardona, E. M., Rios, J. A., Peña, J. D., & Rios, L. A. (2013). Pretratamiento Alcalino de Pasto Elefante (*Pennisetum* sp) y King Grass (*Pennisetum hybridum*) Cultivados en Colombia para la Producción de Bioetanol. *Información Tecnológica*, 24(5): 69–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000500009>
- Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H., Zhou, Q., & Gu, G. (2007). Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs. *Water Research*, 41(3): 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.030>
- Chu, Q., Wang, R., Tong, W., Jin, Y., Hu, J., & Song, K. (2020). Improving Enzymatic Saccharification and Ethanol Production from Hardwood by Deacetylation and Steam Pretreatment: Insight into Mitigating Lignin Inhibition. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(49): 17967–17978. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05583>
- Cruz-Cardona, Y., Cadena-Chamorro, E., & Arango-Tobón, J. C. (2019). Procesamiento de la Cascarrilla de Cebada Cervecera por Vía Enzimática para la Obtención de AF. *Información Tecnológica*, 30(4): 41–50. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400041>
- Dewi, R.-K., Hudha, M. I., Rauda, A., & Taulusia, S. (2019). Chemical and Physical Process Combinations: Microwave in Lignin Degradation of Pecan Shells as Alternative Fuel Raw Materials. *Atlantis Highlights in Chemistry and Pharmaceutical Sciences*, 1: 63–67. <https://www.atlantis-press.com/article/125929209>
- García-Pereyra, J., Valdés-Lozano, C., Olivares-Saenz, E., Alvarado-Gómez, O., Alejandre-Iturbide, G., Salazar-Sosa, E., & Medrano-Roldán, H. (2009). Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus* spp.) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. *Phyton (B. Aires)*, 78(1): 53–60. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-56572009000100010
- García-Pérez, J. V. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. (Tesis doctoral) Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/1890>
- Gasparotto, J. M., Werle, L. B., Mainardi, M. A., Foletto, E. L., Kuhn, R. C., Jahn, S. L., & Mazutti, M. A. (2015). Ultrasound-assisted hydrolysis of sugarcane bagasse using cellulolytic enzymes by direct and indirect sonication. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(4): 480–485. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.07.006>
- Ghaffar, S. H., & Fan, M. (2013). Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw. *Biomass and Bioenergy*, 5: 264–279. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.015>
- Gómez, E. A., Ríos, L. A. & Peña, J. D. (2013). Effect of Pretreatment of Woody Biomass on Ethanol Yield. *Información tecnológica*, 24(5): 113-122. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000500013>
- Gong, Z., Wang, X., Yuan, W., Wang, Y., Zhou, W., Wang, G., & Liu, Y. (2020). Fed-batch enzymatic hydrolysis of alkaline organosolv-pretreated corn stover facilitating high concentrations and yields of fermentable sugars for microbial lipid production. *Biotechnology for Biofuels*, 13: 13. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1639-9>
- Haldar, D., & Purkait, M. K. (2021). A review on the environment-friendly emerging techniques for pretreatment of lignocellulosic biomass: Mechanistic insight and advancements. *Chemosphere*, 264(Part 2): 128523. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128523>

- Harmsen, PFH, Huijgen, W, Bermudez, L & Bakker, R. (2010). Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass. *Report / Wageningen UR, Food & Biobased Research*, no. 1184, Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/150289>
- Hernández-Beltrán, J. U., Hernández-De Lira, I. O., Cruz-Santos, M. M., Saucedo-Luevanos, A., Hernández-Terán, F., & Balagurusamy, N. (2019). Insight into Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass to Increase Biogas Yield: Current State, Challenges, and Opportunities. *Applied Sciences*, 9(18): 3721. <https://doi.org/10.3390/app9183721>
- Huang, J., Khan, M. T., Perecin, D., Coelho, S. T., & Zhang, M. (2020). Sugarcane for bioethanol production: Potential of bagasse in Chinese perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133: 110296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110296>
- Jiang, L., Wu, Y., Wu, N., Zhong, H., Zhang, Y., Zhao, Z., Li, H., & Zhang, F. (2020). Selective saccharification of microwave-assisted glycerol pretreated corncobs via fast pyrolysis and enzymatic hydrolysis. *Fuel*, 265: 116965. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116965>
- Lunelli, F. C., Sfalcin, P., Souza, M., Zimmermann, E., Dal Prá, V., Foletto, E. L., Jahn, S. L., Kuhn, R. C., & Mazutti, M. A. (2014). Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for the production of fermentable sugars. *Biosystems Engineering*, 124: 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.004>
- Luo, X., Wang, Q., Fang, D., Zhuang, W., Chen, C., Jiang, W., & Zheng, Y. (2018). Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120(Part B): 1461–1467. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.149>
- Madadi, M., Wang, Y., Zhang, R., Hu, Z., Gao, H., Dan Zhan, Yu, H., Yang, Q., Wang, Y., Tu, Y., Xia, T., & Peng, L. (2022). Integrating mild chemical pretreatments with endogenous protein supplement for complete biomass saccharification to maximize bioethanol production by enhancing cellulases adsorption in novel bioenergy Amaranthus. *Industrial Crops and Products*, 177: 114471. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114471>
- Marx, S., Xaba, N., & Chiyanzu, I. (2014). Amaranth lignocellulose as feedstock for bioethanol production: effect of microwave assisted alkaline pretreatment on reducing sugar yield. 22nd European Biomass Conference and Exhibition, 896–900. https://repository.nwu.ac.za/bitstream/handle/10394/16671/Amaranth_lignocellulose_as_feedstock.pdf?sequence=2
- Meléndez-Hernández, P. A., Hernández-Beltrán, J. U., Hernández-Escoto, H., & Morales-Rodriguez, R. (2016). Análisis del Pretratamiento de Residuos Lignocelulósicos para La Producción de Biocombustibles y Bioproductos de Alto Valor Agregado. *Jóvenes En La Ciencia*, 2(1): 508–512. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1094/727>
- Méndez-Arango, M. F., López-Sosa, D., Núñez-Gaona, O., & García-Gómez, M. de J. (2019). Evaluación del crecimiento radial sobre forraje de amaranto de hongos filamentosos aislados de hojas de café. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(2): 47–59. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.2.47>
- Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3): 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Modenbach, A. A., & Nokes, S. E. (2014). Effects of Sodium Hydroxide Pretreatment on Structural Components of Biomass. *Transactions of the ASABE*, 57(4): 1187–1198. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10046>
- Mohapatra, S., Dandapat, S. J., & Thatoi, H. (2017). Physicochemical characterization, modelling and optimization of ultrasono-assisted acid pretreatment of two *Pennisetum* sp. using Taguchi and

- artificial neural networking for enhanced delignification. *Journal of Environmental Management*, 187: 537–549. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.060>
- Nagula, K. N. & Pandit, A. B. (2016). Process intensification of delignification and enzymatic hydrolysis of delignified cellulosic biomass using various process intensification techniques including cavitation. *Bioresource Technology*, 213: 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.152>
- Nolasco-Hipólito, C., Ramírez-Isidro, O., Núñez-Gaona, O., Ávila-Alejandre, A. X., Hernández-López, A., & García-Gómez, M. de J. (2022). Antioxidant activity of peptides obtained by enzymatic hydrolysis from proteins of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) stubble. *Agrociencia* 56(3): 434–450. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i3.2800>
- Patil, R. S., Joshi, S. M., & Gogate, P. R. (2019). Intensification of delignification of sawdust and subsequent enzymatic hydrolysis using ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58: 104656. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104656>
- Písaříková, B., Peterka, J., Trčková, M., Moudrý, J., Zralý, Z., & Herzig, I. (2006). Chemical Composition of the Above-ground Biomass of *Amaranthus cruentus* and *A. hypochondriacus*. *Acta Veterinaria Brno*, 75(1): 133–138. <https://doi.org/10.2754/avb200675010133>
- Qing, Q., Guo, Q., Zhou, L., Gao, X., Lu, X., & Zhang, Y. (2017). Comparison of alkaline and acid pretreatments for enzymatic hydrolysis of soybean hull and soybean straw to produce fermentable sugars. *Industrial Crops and Products*, 109: 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.051>
- Reales, J. G., Castaño, H. I., Zapata, J. E. (2016). Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico sobre la Deslignificación de Tallos de Yuca. *Información Tecnológica*, 27 (3): 11–22. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000300003>
- Secretaría de Economía [SE]. (2013). NMX-F-607-NORMEX-2013. Alimentos-determinación de cenizas en alimentos-método de prueba. Ciudad de México: SE. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5311757&fecha=27/08/2013#gsc.tab=0
- Secretaría de Economía [SE]. (2012). NOM-155-SCFI-2012. Leche-Denominaciones, especificaciones físicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Ciudad de México: SE. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4692/seeco/seeco.htm>
- Secretaría de Salud [SSA]. (1994). NOM-116-SSA1-1994. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Ciudad de México: SSA. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4728942&fecha=15/08/1994#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud [SSA]. (1994). NOM-086-SSA1-1994. Alimentos y bebidas no alcohólicas con modificaciones en su composición. Especificaciones nutrimentales. Ciudad de México: SSA. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4890075&fecha=26/06/1996#gsc.tab=0
- Shah, J. J., & Mohanraj, K. (2014). Comparison of Conventional and Microwave-assisted Synthesis of Benzotriazole Derivatives. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 76(1): 46–53. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4007255/>
- Subhedar, P. B., & Gogate, P. R. (2016). Use of Ultrasound for Pretreatment of Biomass and Subsequent Hydrolysis and Fermentation. In Solange I. Mussatto (Eds) *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery* (pp. 127–149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00006-2>
- Subhedar, P. B., Ray, P., & Gogate, P. R. (2018). Intensification of delignification and subsequent hydrolysis for the fermentable sugar production from lignocellulosic biomass using ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40(Part B): 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.030>

- Torres da Silva, G., Chiarello, L. M., Lima, E. M., Ramos, L. P. (2016). Sono-assisted alkaline pretreatment of sugarcane bagasse for cellulosic ethanol production. *Catalysis Today*, 269: 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.11.023>
- Vargas-Radillo, J. J., Salazar-Ríos, E., Barrientos-Ramírez, L., Pérez-Centeno, A., Rentería-Urquiza, M., Rodríguez-Rivas, A., Navarro-Arzate, F., & Rutiaga-Quíñones, J. (2016). Pasta blanqueada y AF a partir de médula de bagazo de caña. *Madera y Bosques*, 21(2): 117-130. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.212449>
- Wang, S., Li, F., Zhang, P., Jin, S., Tao, X., Tang, X., Ye, J., Nabi, M. & Wang, H. (2017). Ultrasound assisted alkaline pretreatment to enhance enzymatic saccharification of grass clipping. *Energy Conversion and Management*. 149: 409–415. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.042>
- Wu, H., Dai, X., Zhou, S.-L., Gan, Y.-Y., Xiong, Z.-Y., Qin, Y.-H., Ma, J., Yang, L., Wu, Z.-K., Wang, T.-L., Wang, W.-G., & Wang, C.-W. (2017). Ultrasound-assisted alkaline pretreatment for enhancing the enzymatic hydrolysis of rice straw by using the heat energy dissipated from ultrasonication. *Bioresource Technology*, 241: 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.090>
- Xu, J., & Cheng, J. J. (2011). Pretreatment of switchgrass for sugar production with the combination of sodium hydroxide and lime. *Bioresource Technology*, 102(4): 3861–3868. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.038>
- Yadav, A., Sharma, V., Tsai, M.-L., Chen, C.-W., Sun, P.-P., Nargotra, P., Wang, J.-X., & Dong, C.-D. (2023). Development of lignocellulosic biorefineries for the sustainable production of biofuels: Towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 381: 129145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129145>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

TECNOCENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

2683-3360

GUÍA PARA AUTORES



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

Política editorial

Se aceptan manuscritos originales e inéditos de tipo científico y tecnológico, que deberán estar escritos con un lenguaje claro y accesible para lectores con formación profesional o de interés científico, y con una estructura lógica. *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* publica artículos de investigación, notas científicas y artículos de revisión actualizados. Todo manuscrito recibido es revisado en primera instancia por el [Equipo Editorial](#) para verificar que cumpla con el formato y contenido establecido por las normas editoriales de *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*. El Equipo Editorial verificará que el envío cumpla con todos los requisitos de postulación, incluyendo su revisión bajo el software antiplagio iThenticate, donde el porcentaje de similitud con otros trabajos ya publicados (ajenos o propios) deberá ser menor al 10 %. Los artículos se enviarán a revisión con un [Editor Asociado](#) y, una vez revisado y teniendo en cuenta las sugerencias y cambios realizados al manuscrito, los editores asociados determinarán su viabilidad para su publicación, notificándose la aceptación o el rechazo al autor y asignando a un [Editor de Sección](#) especialista en el tema proveniente de nuestro Comité Científico. Si después del proceso de arbitraje, el manuscrito es aceptado, la revista lo enviará al proceso de edición y el responsable se contactará con el autor de correspondencia para la revisión y aprobación de las pruebas de galera. También se le solicitará un resumen gráfico que describa visualmente el contenido del artículo, así como cuatro o cinco aspectos relevantes del trabajo a publicar.

Para evaluar los manuscritos, se aplican los siguientes criterios: rigor científico, calidad y precisión de la información, relevancia del tema y claridad del lenguaje. Los árbitros serán quienes determinarán la calidad científica del manuscrito y su aprobación para su publicación. Los artículos de investigación deben presentar un análisis detallado de los resultados originales, así como un desarrollo metodológico riguroso que resalte los logros científicos. Las notas científicas o comunicaciones cortas deberán mostrar resultados novedosos, modificaciones de técnicas o desarrollo de técnicas emergentes innovadoras. Asimismo, los artículos de revisión deberán abordar temáticas novedosas y fundamentar el estado del arte en una revisión de la literatura actualizada sobre temas actuales y de interés para el lector.

La revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es acceso abierto diamante por lo que proporciona un acceso abierto e inmediato a su contenido. Su objetivo es ofrecer al público un acceso libre a información científica original e inédita, así como a revisiones críticas actualizadas, para favorecer una mayor difusión global del conocimiento y cumplir así con la normativa de acceso abierto de DOAJ.

Arbitraje

El proceso de evaluación de manuscritos es el siguiente: Un [Editor de Sección](#) del Comité Científico evaluará cada contribución, y podría rechazar trabajos en esta etapa por razones tales como: carecer de originalidad, tener serias deficiencias científicas, un uso inadecuado del lenguaje y de la gramática en general, o que el contenido esté fuera de los alcances de la revista. Los autores deberán proporcionar los datos de contacto completos de cuando menos tres árbitros potenciales adscritos a una institución distinta a la del autor, sin embargo, la asignación de los árbitros para revisión del manuscrito será una decisión de la revista. La revista opera bajo un sistema de doble ciego y favorecerá la participación de revisores externos a la institución y al país de los autores. Tras el proceso de arbitraje, el Editor de Sección emitirá un dictamen respecto a la evaluación del trabajo a los autores el cual puede ser: aceptar este envío o no publicable.



En caso de controversia, el Editor de Sección podrá solicitar una evaluación adicional o dictaminar el manuscrito.

Derechos de autor

Una vez aceptado el manuscrito, se solicitará al Autor enviar el formato de cesión de derechos de autor para la difusión del artículo a *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*. Los autores concederán por escrito a la revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*, la propiedad de los derechos de autor, únicamente para su difusión, los autores retienen su propiedad intelectual, lo que permite que su artículo y materiales puedan ser reproducidos, publicados, editados, fijados, comunicados y transmitidos públicamente en cualquier forma o medio, así como su distribución en el número de ejemplares que se requieran y su comunicación pública, en cada una de sus modalidades, incluida su puesta a disposición del público a través de medios electrónicos, ópticos o de cualquier otra tecnología, con fines exclusivamente científicos, culturales, de difusión y sin fines de lucro.

Los artículos publicados en *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*, se distribuirán amparados bajo la [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](#)

Costo y tiempo de publicación

La Revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* es gratuita y está financiada por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Se solicita a los autores se inscriban a la Revista para estadísticas de acceso y autoría.

El tiempo para la recepción y envío a revisión será en un máximo de tres días. El tiempo promedio para la primera respuesta de los árbitros es de cuatro semanas. El tiempo estimado para la aceptación del artículo es de tres meses y su publicación dependerá de la cantidad de trabajos que estén en espera de publicación.

Contribuciones

1. Tipos de contribuciones

Las contribuciones se clasifican en artículos de investigación, notas científicas, así como artículos de revisión en español e inglés.

No se aceptan contribuciones que se limiten a reportar información general sin fundamento estadístico, encuestas, composición química, u optimización de formulaciones (superficie de respuesta). Debe haber una aportación científica, tecnológica o ingenieril original, inédita y que no esté siendo considerada para su publicación simultánea en otro medio. Una descripción de los envíos se encontrará en el siguiente apartado.

2. Áreas de las contribuciones

Las áreas que abarca la Revista *TECNOCENCIA CHIHUAHUA* son las siguientes: Alimentos, Biológica, Salud, Agropecuaria, Cultura Física, Ingeniería y Tecnología, Química y Recursos Naturales. Al someter su contribución se deberá indicar la categoría que le corresponde. De no ser esto posible, es responsabilidad del autor proporcionar el área sugerida de su contribución.



3. Idioma de las contribuciones

El idioma de las contribuciones será inglés o español. Se recomienda que los autores lleven a cabo una cuidadosa revisión del correcto uso del lenguaje para que los revisores puedan evaluar los méritos científicos del trabajo. Los editores podrán rechazar cualquier contribución que no cumpla los estándares.

4. Preparación y envío de las contribuciones

Es indispensable que el autor se registre para postular el manuscrito a la revista. Se recomienda que el autor complete en su totalidad todos los datos solicitados en su perfil incluyendo su identificador [ORCID](#).

¿No está registrado? [Regístrese aquí](#)

¿Ya está registrado? [Ingresa aquí](#)

Los autores, deberán seguir las directrices del sitio web de la revista para el envío de las contribuciones.

Lineamientos generales para envío de manuscritos

Guía práctica para subir un envío a la plataforma

Las contribuciones deben ir acompañadas de una carta al editor ([Carta de presentación del artículo](#)) en donde explícitamente se describirá la relevancia del trabajo, manifestando que el trabajo no ha sido publicado o está siendo considerado para publicación en otra parte. Así mismo, se hará de manifiesto que la publicación ha sido aprobada por todos los autores y que el manuscrito una vez aceptado no será publicado de la misma forma en otra revista, en inglés, español, o cualquier otra lengua, ni electrónicamente, sin el consentimiento de la revista. Las secciones que integrarán a cada una de las contribuciones se muestran a continuación:

1) Artículos científicos

Se constituirán de los resultados parciales o finales de investigaciones originales fundamentadas en metodologías científicas. Los artículos de investigaciones deben presentar: un análisis detallado de los resultados, así como un desarrollo metodológico original, resaltando los aportes científicos logrados. Estos artículos se conforman de las siguientes secciones:

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Introducción
- d) Materiales y métodos

Materiales

Métodos



Métodos fisicoquímicos

Métodos biológicos

Métodos estadísticos

- e) Resultados y discusión
- f) Conclusiones
- g) Agradecimientos
- h) Conflicto de interés
- i) Referencias

En la descripción de la sección de Materiales y métodos y Resultados y discusión, puede redactarse y presentarse en una sola sección o estructurarse con subtítulos para una mejor descripción. Deberá tener una extensión de 18 cuartillas como máximo, incluyendo Resumen y Referencias

2) **Notas científicas**

Es una comunicación corta, sobre resultados novedosos, modificaciones de técnicas o desarrollo de técnicas emergentes innovadoras, informes novedosos de investigaciones en el área de agropecuaria, salud, deportes o ingeniería. Para la presentación de este documento, se incluirán las secciones.

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Texto
- d) Conclusiones
- e) Agradecimientos
- f) Conflicto de interés
- g) Referencias

El texto de las notas científicas, se presentará en forma corrida, pero en forma clara y con coherencia, que permita su fácil comprensión. Deberá tener una extensión máxima de 9 cuartillas, incluyendo Resumen y Referencias

3) **Artículos de revisión**

Se conformarán, de revisiones críticas actualizadas de un tópico en especial novedoso de las áreas temáticas de la revista. El objetivo de estos artículos, es presentar al lector una perspectiva de un tema en específico, a través de su análisis de la información, discusión y tendencias. La estructura de este artículo se conformará de las secciones:

- a) Título del artículo
- b) Resumen/Abstract
- c) Introducción
- d) Texto
- e) Conclusiones



- f) Agradecimientos
- g) Conflicto de interés
- h) Referencias

El texto deberá ser coherente con el objetivo y podrá redactarse con los subtítulos que sean necesarios, para una mayor comprensión del tema. Deberá tener una extensión máxima de 20 cuartillas, incluyendo Resumen y Referencias.

Plantillas de los artículos

La descripción de las secciones están incluidas en la siguiente sección de esta Guía para Autores, además de en la plantilla para cada tipo de artículo: Artículo de Investigación: [Plantilla de Artículo de Investigación](#); Notas científica: [Plantilla de Notas Científicas](#); Artículo de Revisión: [Plantilla Artículo de Revisión](#). En estas se consideran sus especificaciones, las cuales deben ser acatadas por el autor. Asimismo, en cada una de las plantillas vienen las especificaciones del formato de texto (tamaño y tipo de fuente, márgenes, interlineado, etc.) el cual debe estar a una columna. Todas las páginas deben ser numeradas secuencialmente.

Descripción de los elementos de un artículo

Título

Deberá incluir versiones en español e inglés, ser conciso y explicar la naturaleza del trabajo. Este deberá tener una extensión máxima de 20 palabras. La plantilla incluye la sección de autores, los cuales deberán ser correctamente descritos, incluyendo su afiliación. En caso de existir varios autores, deberá indicarse con un asterisco el autor para la correspondencia, así como la cuenta de correo electrónico del mismo.

Resumen

Éste deberá presentarse en español e inglés, respectivamente. Con la extensión máxima de palabras como se muestra en la plantilla. Este debe de incluir en forma clara el objetivo, descripción breve de la metodología, resultados y discusión relevantes conclusiones y aporte del trabajo. En éste se incluirán cinco palabras claves, en español e inglés, que permitan ligar informáticamente el contenido del artículo.

Introducción

La introducción describe el estado actual del conocimiento sobre el tópico de investigación abordado, su justificación e importancia, así como la inclusión de la hipótesis y el objetivo del trabajo. Esta sección no deberá ser mayor a dos cuartillas.

Materiales y métodos

Materiales

En esta sección se describen los materiales o sustancias empleadas para el desarrollo de la investigación. Especificando las características y fuentes de obtención, condiciones de manejo,



almacenamiento y grado de pureza de sustancia o reactivos si ese es el caso. Señalando el nombre de compañías, ciudad y país donde los materiales y sustancias fueron adquiridos.

Métodos

Descripción de técnicas y procedimientos, así como el análisis de datos de los resultados obtenidos. En el caso de metodologías novedosas, estas se describirán detalladamente y cuando sean métodos comunes, se indicará la referencia correspondiente.

Ética de la investigación

Al informar sobre una investigación en la que participen seres humanos, material humano, tejidos humanos, datos humanos (estudios clínicos o pruebas sensoriales), grupos vulnerables y/o animales, favor de seguir las instrucciones de la sección de [Ética y buenas prácticas editoriales de esta revista](#).

Los autores deben declarar en este apartado de «Materiales y métodos» lo siguiente:

1. En investigación con seres humanos debe incluir una declaración ética que especifique lo siguiente:
 - El nombre de la junta de revisión institucional aprobadora o del comité equivalente y el número de autorización.
 - La descripción del consentimiento informado, oral y/o por escrito, de las personas participantes en el estudio.
2. En investigaciones con animales deben incluir una declaración ética obligatoria que especifique lo siguiente:
 - El nombre completo del Comité de Ética pertinente que aprobó el trabajo y el número o números de permiso asociados.
3. Los ensayos clínicos deben citar el registro público en el que se inscribieron.
4. En investigaciones con líneas celulares:
 - Deberá indicarse el origen de las líneas celulares utilizadas.
 - Si la línea es de origen humano, deberá proporcionarse una aprobación del comité de revisión institucional o del comité de ética y confirmarse por escrito el consentimiento informado.

Resultados y discusión

Los resultados y discusión se presentarán en una sola sección. Los resultados podrán presentarse en tablas, figuras, fotografías o datos, los cuales se describirán y se justificarán con base a conocimientos o fundamentos existentes. En esta sección se contrastan los resultados obtenidos con la hipótesis planteada y sus semejanzas o diferencias con resultados de investigaciones previamente realizadas y publicadas. El empleo de tablas y figuras deberá ser en forma complementaria del texto de la sección.

Conclusión

Es una generalización de los resultados obtenidos y representan las aportaciones concretas del estudio. Incluyen magnitudes relativas o absolutas de las respuestas sin argumentación complementaria. Resaltando los aspectos novedosos e importancia de los resultados obtenidos, especificando mejores condiciones o parámetros finales del estudio. Debe mostrar congruencia con el título, resumen y objetivo del trabajo.



Agradecimientos

Esta sección es opcional y tendrá un máximo de cuatro renglones para expresar agradecimientos a personas o instituciones que hayan contribuido a la realización del trabajo.

Conflicto de Interés

Escribir un párrafo señalando la inexistencia de conflicto de intereses, en la publicación de estos resultados.

Declaración de IA generativa y tecnologías asistidas por IA (solo en caso de su uso)

El uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en la redacción científica debe declararse en esta sección.

Esta declaración no se aplica al uso de herramientas básicas, como las utilizadas para comprobar la gramática, la ortografía y las referencias. Si no tiene nada que declarar, no es necesario que añada ninguna declaración.

Referencias

Las referencias que se incluyan en el texto deberán ser pertinentes, originales y modernas; se citarán acorde al formato sistema Harvard, en el cual se incluye el apellido de los autores y año de la publicación entre paréntesis. En el caso de que sean dos autores irán unidos por “y” (Choi y Garza, 2020). Cuando sean más de dos autores, se citará el apellido del primero seguido por “et al.” (en cursiva) y el año de publicación (Gu *et al.*, 2019). Si se citan varias referencias, éstas se separarán por punto y coma y en orden cronológico ascendente (Gu *et al.*, 2019; Choi y Garza, 2020). La relación de autores en la sección de referencias será por orden alfabético de acuerdo al formato APA.

IMPORTANTE: Toda vez que la referencia cuente con el registro internacional **DOI** debe incluirlo utilizando el siguiente formato **<https://doi.org/XXXXXX>**. Aun cuando la referencia no cuente con **DOI**, favor de poner el enlace donde puede ser encontrada.

A continuación, se muestran algunos ejemplos:

Artículos de revistas científicas

Braber, N. V., Vergara, L. D., Rossi, Y. E., Aminahuel, C. A., Mauri, A. N., Cavaglieri, L. R., & Montenegro, M. A. (2020). Effect of microencapsulation in whey protein and water-soluble chitosan derivative on the viability of the probiotic *Kluyveromyces marxianus* VM004 during storage and in simulated gastrointestinal conditions. *LWT*, 118, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108844>

Capítulos de libros

Ho, Y. C., Chua, S. C., & Chong, F. K. (2020). Coagulation-Flocculation Technology in Water and Wastewater Treatment. In *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment* (pp. 432-457). IGI Global.



Libros

Low, I. M. (Ed.). (2018). *Advances in ceramic matrix composites*. Woodhead Publishing.

Patnaik, A., & Patnaik, S. (Eds.). (2019). *Fibres to Smart Textiles: Advances in Manufacturing, Technologies, and Applications*. CRC Press.

Patentes

Götz, M. R., Holmgren, K., Larsson, N., Fiebich, B., & Wade, W. (2019). *U.S. Patent Application No. 16/478,514*.

Tesis

Ríos, E. A. (2018). *Incidencia y control de tipos patógenos de Escherichia coli (STEC y EPEC) en leche de vaca y quesos derivados en Castilla y León* (Tesis doctoral, Universidad de León). <http://hdl.handle.net/10612/7957>

Boletín

Kirk, M. D., Angulo, F. J., Havelaar, A. H., & Black, R. E. (2017). Diarrhoeal disease in children due to contaminated food. *Bulletin of the World Health Organization*, 95(3), 233.

Páginas electrónicas

Inegi. (2017). <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>

Base de datos

Wishart, D. S., Feunang, Y. D., Marcu, A., Guo, A. C., Liang, K., Vázquez-Fresno, R., ... & Sayeeda, Z. (2017). HMDB 4.0: the human metabolome database for 2018. *Nucleic acids research*, 46(D1), D608-D617.

Citas la abreviación de la revista TECNOCENCIA CHIHUAHUA en los índices internacionales es *Rev. TECNOCENCIA CHIH.*

Tablas, figuras y ecuaciones, las tablas y figuras deben enviarse en un archivo adjunto al manuscrito; de preferencia en un archivo Word. O bien, crear un archivo comprimido (.zip o .rar) que contenga los archivos de tablas y figuras. Adicionalmente, las tablas y figuras del manuscrito, se colocarán dentro del texto principal en el lugar indicado por los autores, con títulos en español e inglés. El título de la figura debe presentarse como Fig. 1. Título de la figura.

Es recomendable que las figuras se preparen con software específico. Tome en cuenta que el tamaño de las figuras se ajustará en el proceso de edición para ajustarse a los márgenes de impresión. Por ello, se recomienda hacer ejes, cuadros, etc., suficientemente grandes para que resulten legibles aún al reducir el tamaño. Las extensiones aceptables para las figuras son JEPG y TIF, considerando las siguientes características de calidad (en puntos por pulgadas):

- 300 ppp para imágenes a escala de grises o color.



- 600 ppp para combinaciones imagen texto.
- 1,200 ppp para imágenes a línea.

Las tablas deben presentar tres bordes horizontales completos (en la fila de encabezados y al final), cualquier otro borde horizontal debe ser parcial, no deben tener bordes verticales y no se aceptarán en forma de imágenes.

Las ecuaciones deben estar escritas con un editor de ecuaciones y deben aparecer en el manuscrito numeradas con el formato de número arábigo. Las ecuaciones insertadas como imágenes no son aceptables.

En el texto del manuscrito, al referirse a una ecuación debe escribirse de la siguiente manera: Ec. (1) o bien Ecs. (1) -(4), al referirse a una figura, seguir la misma regla, por ejemplo: Fig. 1, o bien Figs. (1) -(5) y al referirse a una tabla, por ejemplo: Tabla 1 o bien Tablas (1) -(3).

Figuras y cuadros (versión para producción)

Las figuras y gráficos deben proporcionarse en el texto principal y numerarse consecutivamente con números arábigos y sus subtítulos respectivos deben incluirse dentro del texto principal en el lugar indicado por los autores.

Cuando se incluyan figuras que contengan fotografías o micrografías, asegurarse que sean de alta resolución para que cada foto tenga al menos 300 ppp para imágenes a escala de grises o color. Todas las fotografías deben contener el nombre del autor.

Tablas (versión para producción)

Las tablas deben proporcionarse en el texto principal y como archivo adjunto, y numerarse con números arábigos. Deben estar incrustados en el texto del manuscrito, en el lugar indicado por el autor. Las tablas deben prepararse con Microsoft Word® 2007 o posterior; no deben importarse de Excel® o Powerpoint®, y deben:

- Tener un número y un título (en inglés y en español)
- Sea auto-explicable
- Tener los dígitos significativos con la desviación estándar definidos de acuerdo con el criterio estadístico
- Mostrar datos que no se muestran en los gráficos
- Tener el formato más simple posible; no está permitido el uso de sombras, color o filas verticales y diagonales
- Solo tienen letras minúsculas en el superíndice que indiquen notas al pie de tabla (abreviaturas, unidades, diferencias estadísticas, etc.). Un ejemplo de tabla se muestra en los formatos de **"Plantillas de artículos"**



Abreviaturas, los nombres científicos se escribirán en cursivas, el género de la especie podrá abreviarse después de que se mencione por primera ocasión en el texto. Las unidades de cualquier dato científico o de laboratorio deberán seguir el sistema internacional de medidas y usar las abreviaturas o símbolos recomendados por las normas internacionales. No deberá usarse punto en las abreviaciones Ej.: kg (NO kg.). Se utilizará espacio entre la cantidad y la unidad o símbolo Ej. 8 cm, 100 %. Las notas a pie de página deberán ser evitadas.

Material adicional, si los autores lo desean, pueden proporcionar material adicional o complementario como soporte al artículo (texto, tablas, figuras o multimedia), el cual estará disponible en la página web de la revista una vez que sea publicado. Si el manuscrito ha sido aceptado, también se le solicitará al autor un resumen gráfico y los puntos relevantes del trabajo. El resumen gráfico debe describir en forma general el contenido del artículo, este resumen debe tener las siguientes características: archivo editable en diapositiva de Powerpoint, NO usar datos, tablas o figuras contenidos en el artículo, contener figuras libres de restricciones de derechos de autor, debe incluir un resumen que incluya de dos a tres enunciados donde se describe los antecedentes, como fue realizado el trabajo y los principales resultados. Los puntos relevantes del trabajo, deberán ser cuatro aspectos alcanzados, presentados en forma de enunciado con un máximo de 80 caracteres con espacios.

Los archivos que el autor deberá preparar para el envío serán:

(Formatos)

El texto principal del manuscrito debe presentarse de la siguiente manera:

1) El manuscrito en Word para producción

Este archivo, corresponde a las "**Plantillas de artículos**" presentadas en esta guía de autores, cuyas características de formato se muestran a continuación.

- Formato Microsoft Word® 2007 (o posterior)
- 10 puntos Palatino Linot
- Espaciado especificado en la plantilla
- Texto completo del manuscrito (extensión de acuerdo al tipo de manuscrito)
- Las figuras, cuadros, tablas, ecuaciones y sus respectivos títulos deben estar incorporados en el texto principal en el lugar indicado por los autores.
- Las páginas deben estar numeradas secuencialmente
- La carta de presentación debe presentarse por separado
- La página principal debe incluir los nombres e instituciones de los autores
- El archivo deberá llamarse "**Apellidos autor producción**".doc.



2) En el manuscrito en Word para revisión

Este archivo es una copia del **manuscrito en Word para producción** pero se editará sin los nombres de los autores e Instituciones para enviar este archivo cegado a revisión con los árbitros.

Este archivo deberá ser nombrado **“Apellidos de autor revisión”.doc**: versión para evaluación del revisor. Las características de formato incluyen las siguientes especificaciones:

- Las líneas del texto al igual que las páginas deben estar numeradas secuencialmente
- **No debe incluir** los nombres e instituciones de los autores ni en la página principal del manuscrito, ni en la información del archivo

3) Carta de presentación de artículo o autoría.

La carta de presentación del manuscrito ([Carta de presentación del artículo](#)) debe incluir la relevancia e importancia del trabajo (un breve texto que describa la relevancia del trabajo de investigación o artículo de revisión de manera concisa (con no más de 100 palabras). Además, incluirá la declaratoria de que el documento presentado no ha sido publicado (parcial o totalmente) ni ha sido sometido a arbitraje simultáneamente en otra revista. Haciendo constar que cuenta con la aprobación para su publicación por los autores y coautores.

4) Los archivos de Tablas y Figuras para producción (especificaciones que se describen en la **sección de Tablas, figuras y ecuaciones** en esta guía)

5) Resumen gráfico (características descritas en la **sección de Material adicional** en esta guía)

Después de verificar el estilo de formato (acorde a la plantilla y especificaciones en esta guía de autores) y crear los archivos de acuerdo a las especificaciones presentadas, continúe con el envío en línea.

¿No está registrado? [Regístrese aquí](#)

¿Ya está registrado? [Ingresa aquí](#)

Una vez registrado en la plataforma de la revista, entrar y dar clic en 'Nuevo envío', después seguir las instrucciones y completar cada una de las 5 pestañas del envío.





UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

Latin**2024** Food**2024**

**11th Food Science,
Biotechnology & Safety Congress**

Asociación Mexicana de Ciencia de los Alimentos A.C.
MEXICAN ASSOCIATION OF FOOD SCIENCE



CHIAPAS

MEXICO | 13-15 NOVEMBER 2024



IBERO
PUERTO RICO



Universidad
Autónoma
de Coahuila



www.amecamex.mx