



Ingeniería en Industrias Alimentarias

ISSN: En trámite

26 de Abril de 2024

Volumen I/Número 1/2024

Ingeniería en Industrias Alimentarias: retos, perspectivas y tendencias

La trascendencia de la Ingeniería en Industrias Alimentarias

Los insectos como alternativa para la Ingeniería en la Industria Alimentaria



Opinión:

**Dr. José Alberto Gallegos Infante
Dra. Asli Can Karancan
Dra. María Elena Sosa Morales**

Análisis bibliográfico:

Sied M. Jafari: the boom in publishing food engineering books

Artículos Científicos con Arbitraje

Residuos agroindustriales como fuentes de compuestos antioxidantes

Técnicas de formación de almidón resistente para la industria alimentaria: una revisión

Directorio

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General
Tecnológico Nacional de México

Dra. Nayelli del Carmen Ramírez Segovia
Directora
TecNM/I. T. Roque

Mtro. Fernando Germán Flores Guillén
Subdirector Académico
TecNM/I. T. Roque

M.C. Julián Ferrer Guerra
Subdirector de Planeación y Vinculación
TecNM/I. T. Roque

Ing. Raúl René Robles Lacayo
Subdirector Administrativo
TecNM/I. T. Roque

M. C. Violeta Herrera Enciso
Jefa del Departamento de Ingenierías
TecNM/I. T. Roque

EDITORES

Formadores:

Editor General

Dr. Christian Oliver Díaz Ovalle

Editor Ejecutivo

Dr. Ahuizolt de Jesús Joaquín Ramos

TecNM/I. T. de Roque

COMITÉ EDITORIAL

Química de Alimentos

Dr. José Alberto Gallegos Infante
TecNM/I.T. Durango, Durango, México

Bioprocesos y Biotecnología de Alimentos

Dr. José Ángel Huerta Ocampo
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo,
A. C., Hermosillo, Sonora, México

Revista de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Año 1, número 1, 26 de abril de 2024 es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 033305, teléfono 5536002511 Ext. 65092, www.tecnm.mx, correo d_vinculación05@tecnm.mx, Editor Responsable Dr. Christian Oliver Díaz Ovalle. Reserva de derechos al uso exclusivo No. **04-2023-122017411500-102**, ISSN: **en trámite**, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Departamento de Comunicación y Difusión, Ing. Christian Ulises Hernández Montoya, Instituto Tecnológico de Roque, Km. 8.0 carretera Celaya-Juventino Rosas, C.P. 38124, Celaya, Guanajuato, México, tel. +52-4616116361 Ext. 116, fecha de última actualización 26 de Abril de 2024. Tamaño del archivo 2.71 MB

El objetivo de la Revista de Ingeniería en Industrias Alimentarias es generar un espacio para la difusión de conocimiento científico, tendencias y novedades en la tecnología y ciencia de los alimentos, el aprendizaje y difusión en los avances de la industria alimentaria.

La revista acepta, para publicación en español e inglés, artículos de: divulgación, difusión, avance técnico-científico, revisión, educación y opinión de expertos. Estos son sometidos a revisión editorial y de lenguaje. Se aplicará arbitraje por pares a los artículos científicos y artículos de revisión, el proceso de evaluación del artículo guardará estrictamente el anonimato y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación. Enviar manuscritos a: rjia.editor@roque.tecnm.mx Se autoriza la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación con crédito de la fuente.

EDITORIAL

En las pasadas décadas, la investigación en la Ciencia de los Alimentos ha incrementado con avances notables, desde el diseño de tratamientos no térmicos hasta el desarrollo de alimentos funcionales. Esto garantiza los principios humanos del derecho de tener alimentos nutritivos y salubres. En la actualidad, la diversidad de áreas de conocimiento sobre este tópico es extensa y en proporción con el número de revistas de publicación internacional. Aquí, les damos la bienvenida a una revista enfocada al desarrollo tecnológico, educativo, divulgativo y científico de la Ingeniería en Industrias Alimentarias.

El Tecnológico Nacional de México oferta este tópico como una carrera que se ha distinguido por su demanda y aporte tecnológico y científico. En este número, el tópico está enfocado a los Retos, Perspectivas y Tendencias de esta rama del conocimiento, donde expertos en el área concluyen que estos elementos competen a las tecnologías emergentes. Además, la trascendencia y las alternativas son panoramas expuestos sobre la Ingeniería en Industrias Alimentarias, cuya comprobación está dada en los artículos tecnológicos y científicos de este número.

En este inicio de la revista, los editores agradecemos profundamente la confianza de los autores y de las autoridades del Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque, en particular el Departamento de Ingenierías.

Christian Oliver Díaz Ovalle
Ahuitzolt de Jesús Joaquín Ramos
Editores



La ingeniería en industrias alimentarias y su compromiso con los alimentos funcionales

José Alberto Gallegos Infante

Laboratorio Nacional CONAHCYT de Apoyo a la Evaluación de Productos Bióticos (LaNAEPBi), Unidad de Servicio Tecnológico Nacional de México/I.T. de Durango, Durango, México

Un alimento funcional es aquel que proporciona un beneficio a la salud más allá de la nutrición, su desarrollo ha traído problemas a resolver por la ingeniería en industrias alimentarias, como la obtención, extracción, innovación, optimización de un grupo de moléculas, denominadas bioactivos (polifenoles, péptidos bioactivos, terpenoides, entre otros) altamente reactivas y presentes a nivel de trazas, por lo que las estrategias tradicionales como el empleo de calor, solventes, tensoactivos, estabilizadores, entre otros, deben ser minimizados, en orden de mantener la integridad de la biomolécula o bien desarrollar tecnologías innovadoras de procesamiento mínimo. Es en este contexto, donde el

ingeniero en industrias alimentarias debe ser capaz de desarrollar estrategias de procesamiento novedoso (ultrasonido, pulsos eléctricos, infrarrojo, luz UV, presión, etc.), capaces de proveer alimentos que sean inocuos, atractivos y con efectos de beneficio a la salud.

Trends and Perspectives in Food Engineering

Asli Can Karaca

Department of Food Engineering, Faculty of Chemical and Metallurgical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

Food engineering is a multidisciplinary field that is based on the application of basic engineering knowledge in manufacturing, storage and distribution of high quality, safe, nutritious, economical, and value-added foods with improved sensory and nutritional properties. Food engineering principles are applied to ensure product quality, consumer health, production

efficiency, and environmental sustainability. Researchers and food engineers have concentrated their efforts on developing innovative methods and technology to meet the rising demand for safe, nourishing, and sustainable food products. The evolution in food engineering is still continuing with an increased focus on new product development and parameters affecting food ingredients and formulation. The focus of food engineering research is recently shifting from food safety and processing efficiency to nutritional quality, including innovative aspects such as digital production, biotechnology, and sustainability. The future of food engineering research will continue to concentrate on the development of new processing techniques, optimization of manufacturing systems, digitalization, environmental protection, and sustainable development. Future efforts should be directed toward meeting the consumer expectations for safe, nutritious, and convenient foods. Furthermore, the efforts in the shaping of new advanced technologies should involve a comprehensive and integrated approach empowering new forms of food production that are healthier, safer, smarter, more efficient, and sustainable.

RESEÑA DE AUTORES:

Dr. José Alberto Gallegos Infante es profesor investigador del Tecnológico Nacional de México/I.T. Durango miembro del SNII III. Obtuvo su doctorado en la Universidad Autónoma de Querétaro y forma parte del Grupo de Investigación de Alimentos Funcionales y Nutraceuticos del Laboratorio Nacional CONAHCYT de Apoyo a la Evaluación de Productos Bióticos (LaNAEPBi), Unidad de Servicio Tecnológico Nacional de México.

Dr. Asli Can Karaca received her Ph.D. in Food Science from University of Saskatchewan in Saskatoon, Canada. She has 10 years of industrial

Tecnologías Emergentes en Industrias Alimentarias

María Elena Sosa Morales

Departamento de Alimentos de la Universidad de Guanajuato, Campus Salamanca-Irapuato, Guanajuato, México

Las Tecnologías Emergentes, también conocidas como No térmicas o No convencionales, es un grupo de procesos para conservar mejor las características sensoriales y nutricionales o funcionales de los alimentos. Estos procesos se están incorporando a la Industria de Alimentos, sustituyendo a métodos como la pasteurización y la esterilización térmica. Entre las tecnologías emergentes se encuentra la alta presión hidrostática (HHP), la luz ultravioleta (UV), los pulsos eléctricos (PEF) y la irradiación (IR). En México, ya se aplican para algunos alimentos y bebidas, por ejemplo, HHP para jugos y puré de aguacate, UV para agua purificada y crema de leche, e IR para chiles secos y condimentos. Estas tecnologías son totalmente seguras para los consumidores y permiten eliminar bacterias y extender la vida útil de los alimentos.

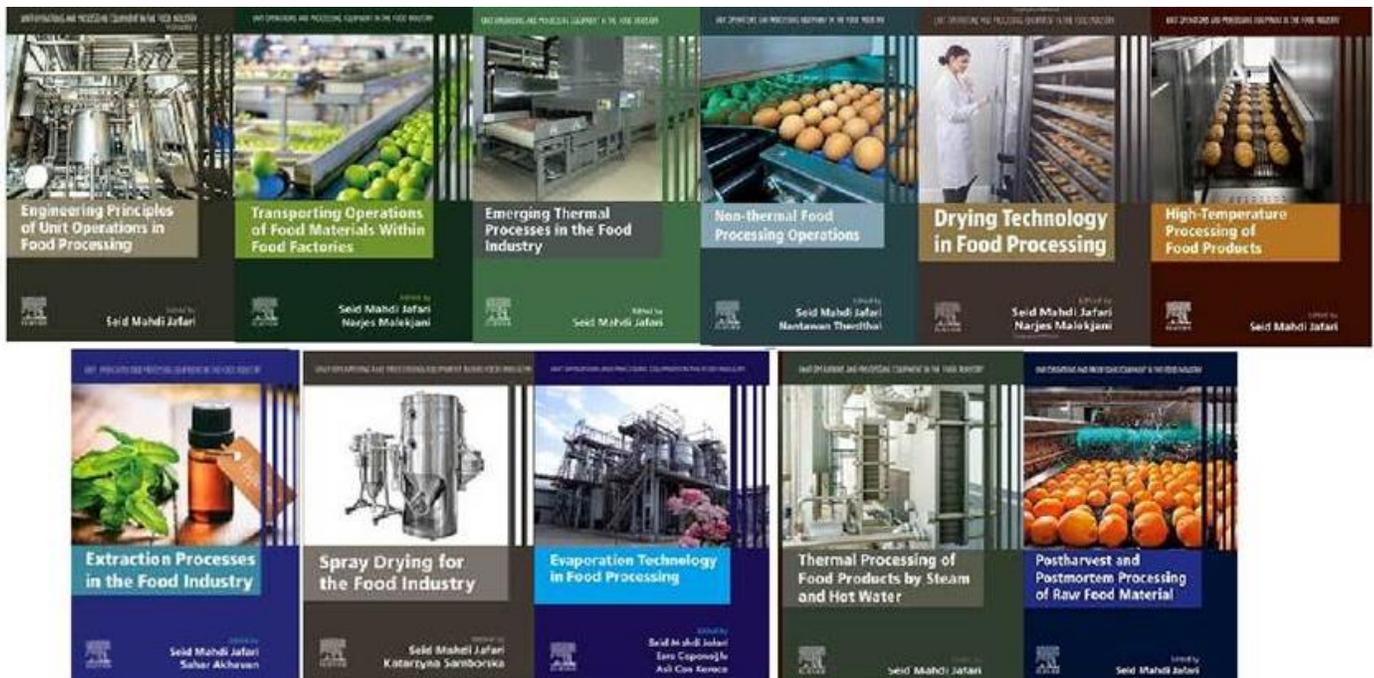
experience in an international medium-sized flavor house. Currently, she is working as an Associate Professor within the Department of Food Engineering at Istanbul Technical University. Her research interest lies in developing value-added protein-based ingredients from sustainable and low-cost resources, investigating their functionality and utilization in innovative food products.

Dra. María Elena Sosa Morales es profesora Titular B del Departamento de Alimentos de la Universidad de Guanajuato, miembro del SNII Nivel 2, y del Consejo de IFT Mexico Section.

Seid M. Jafari: boom in publishing food engineering books

Since 2020, Prof. Seid Mahdi Jafari from Gorgan University, Iran, presents a wide and impressive production of books in food engineering. This note shortly describes the Series: *Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*,

published by Woodhead Publishing® (Elsevier®). Until now, the Series contains 11 published volumes that describe each area of Food Engineering Production. The image collects some of these titles.



As Editor-in-Chief of the Series, Prof. Jafari has continuously invited scientists and researchers around the world, who have expanded the food engineering topics due to their expertise and recent contributions. Despite the similarity with other publications, Jafari's Series bets on novel topics to steer a better design in process and equipment for the food industry. In principle, the editor does not pretend to race with well-known titles, such as *Unit Operations in Food Processing* (Earle, 1983) and the outstanding *Unit Operations in Food Engineering* (Ibarz and Barboza-Cánovas, 2010).

The series exposes practical elements to benefit the food industry, where the theoretical basis extends to recurrent, and severe problems. Elsevier ® will launch more volumes in 2024, such as *Spray Drying and Evaporation Technology*, and even is working on

additional topics for further volumes in the series (around a total of 20 volumes), for instance, *Mechanical Separation Process in the Food Industry*, *Mass Transfer Operations in the Food Industry* and *Extrusion and Size Change Processes in the Food Industry*. Most of them will be launched in 2025-2026. This author appreciates the invitation from Prof. Jafari to collaborate in the upcoming volume *Evaporation Technology in Food Processing*. Hence, I hope most of our readers may get the opportunity to update their skills under the direction of this series in Food Engineering.

Christian O. Díaz-Ovalle, Edito

CONTENIDO

Sección de Divulgación

La Trascendencia de la Ingeniería en Industrias Alimentarias Christian Oliver Díaz Ovalle ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN	1
Los insectos como alternativa para la Ingeniería en la Industria Alimentaria Ma. Cristina Vázquez Hernández ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN	5
Análisis bromatológico de una tortilla multiprotéica con características funcionales Karen E. Martínez-Jiménez y Ma. Cristina Vázquez-Hernández ARTÍCULO TECNOLÓGICO	10
Bebida a base de suero de leche dulce fortificada con germinado de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i>) María del Carmen Ramírez-Mota y Susana Elizabeth Altamirano-Romo ARTÍCULO TECNOLÓGICO	16

Sección de Arbitraje

Residuos agroindustriales como fuentes de compuestos antioxidantes Edith Estefanía Duarte Llanes y Ana Angélica Feregrino Pérez ARTÍCULO DE REVISIÓN	22
Técnicas de formación de almidón resistente para la industria alimentaria: una revisión María Guadalupe Hernández-Ángel y Ahuizolt Joaquín-Ramos ARTÍCULO DE REVISIÓN	31

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

La Trascendencia de la Ingeniería en Industrias Alimentarias



Christian Oliver Díaz Ovalle
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Roque

RESUMEN

La evolución social actual ha demandado cambios notorios en los procesos de transformación global. En el caso de los alimentos, varios elementos son considerados fundamentales: el procesamiento a gran escala, la conservación de la originalidad organoléptica, la preservación de compuestos benéficos para la salud, la garantía de seguridad alimentaria, etc. Estos han sido los retos fundamentales de la industria alimentaria actual.

La industria alimentaria es un baluarte de la sociedad moderna que en las últimas décadas ha tomado un papel decisivo en la economía y el desarrollo social. La sociedad observa que esta industria está centrada en la producción en cadena con una connotación financiera influyente y

controladora sobre el desarrollo agropecuario de regiones productoras. Esta percepción ha politizado el objetivo de la industria de alimentos: proveer alimentos saludables a la mayor cantidad de miembros de la sociedad. Este objetivo involucra los factores esenciales tiempo y distancia de entrega. El tiempo es una restricción inherente en los alimentos y, al pasar, demerita las cualidades organolépticas y nutricionales. La distancia de entrega es un elemento dependiente de la logística y los puntos de

producción. No obstante, la industria de alimentos es altamente dinámica y oferta productos novedosos para los sentidos de los consumidores (aquí está oculta una sombra vinculada a la venta de productos).

La industria de alimentos está sujeta a riesgos, retos y restricciones (3R), que deben ser solventados con el avance científico y su proyección en la trascendencia tecnológica. Estos elementos consideran tópicos particulares en el estudio de los alimentos. La Ciencia de los Alimentos ha retomado lo referente a la solución de las 3R de la industria de alimentos e incluye un catálogo de áreas especializadas como: Química de alimentos, Análisis sensorial, Desarrollo de nuevos productos, Tecnología de alimentos, Seguridad alimentaria, Microbiología de alimentos, Empacado de alimentos e Ingeniería de alimentos. Inclusive, el alcance temático ha sido extendido a temas académicos novedosos y vanguardistas, que pueden ser incluidos en una clasificación más detallada. Claro está que, esta lista puede ser modificada al punto de vista de los expertos en estos tópicos.

La industria de alimentos requiere personal capacitado para la toma de decisiones en los procesos, la proyección de nuevos productos, la manutención de sistemas de gestión de calidad y seguridad alimentaria, la aplicación de técnicas actualizadas de análisis, etc. Esto ha justificado la demanda de un especialista para la industria de alimentos, quien no sería solamente un administrador o técnico de laboratorio, sino la persona que debería englobar la transformación y procesado de alimentos. En un momento anterior, durante la evolución de la industria de alimentos, esto justificó la creación de especialidades en Ingeniería química (alimentos, procesos alimentarios, etc.) y en Ingeniería Bioquímica (bioprocesos, sistemas de fermentación, etc.). En la actualidad, las especialidades

de ambas ingenierías son opciones aceptables, pero son ramas de un objetivo mayor. En ingeniería química, todo lo concerniente a los procesos, reactores y operaciones unitarias son su objetivo mayor, así el ingeniero químico fue adaptado a los procesos de alimentos (y continúa adaptándose), similarmente ocurre en la ingeniería bioquímica. Pero, una opción mejor es un objetivo mayor enfocado en alimentos, ya que englobaría su conocimiento particular a la industria de alimentos. Por este motivo, la ingeniería en industrias alimentarias es la opción viable en este aspecto. Esto no indica que las dos opciones anteriores sean demeritadas, sino que la extensión actual de la industria alimentaria reclama mayor profundización en tópicos especializados. Además, el ingeniero en industria alimentarias toma bases y sustentos de la ingeniería química y la ingeniería bioquímica.



Temas académicos actuales para Ingeniería en Industrias Alimentarias.

Química de Alimentos
<ul style="list-style-type: none"> *Análisis de reacciones lipídicas, hidrolizantes, etc. *Composición y componentes de los alimentos. *Nuevas tendencias y aplicaciones de técnicas de análisis de los alimentos. *Nuevos alimentos y su análisis. *Propiedades de los alimentos.
Ingeniería de Alimentos
<ul style="list-style-type: none"> *Avances en operaciones unitarias en el procesamiento de los alimentos. *Avances en el transporte y almacenaje de alimentos. *Desarrollo de tratamientos térmicos de alimentos. *Nuevas técnicas de tratamiento no térmicas. *Envasado, empaques y transporte de productos alimentarios. *Avances en sistemas de limpieza y saneamiento de procesos alimentarios.
Seguridad Alimentaria
<ul style="list-style-type: none"> *Evaluación y garantía de la calidad alimentaria. *Soberanía alimentaria. *Autosuficiencia alimentaria. *Cadena de suministros y distribución de los alimentos. *Almacenamiento, escasez y hambruna. *Mitigación y prevención de problemas en la producción alimentaria.
Bioprocesos y biotecnología de alimentos
<ul style="list-style-type: none"> *Mejoras en la calidad de los productos alimentarios. *Uso de enzimas, aditivos y conservación de productos. *Extracción, formación y producción de vitaminas y proteínas. *Tratamientos postcosecha y trazabilidad. *Inoculación microbiológica y fermentación. *Detección de patógenos e ingredientes alimentarios.
Ingeniería de procesos en alimentos
<ul style="list-style-type: none"> *Nuevas tendencias en el control de procesos de alimentos. *Diseño de equipos y plantas procesadoras de alimentos. *Modelado, simulación y optimización de procesos de alimentos. *Inteligencia artificial en análisis de procesos de alimentos. *Simulación asistida por computadora. *Desarrollo de software de simulación.

Este panorama formativo, como profesionales en el área de alimentos, trata las 3R de la industria de alimentos bajo elementos trascendentes, por ejemplo: a) alta diversidad en procesos de producción, b) desconocimiento de cinéticas de reacción que afectan el control del proceso, c) existencia de ensuciamiento y d) sistemas multifásicos sujetos a fenómenos de transporte complejos. Si se desea analizar rigurosamente los sistemas productivos, los elementos de las 3R son la limitante en la operatividad industrial.

No obstante, los procesos productivos de los alimentos mantienen operaciones aceptables e incluso altas eficiencias. ¿Esto indica que los análisis rigurosos de los sistemas de procesos de alimentos no son necesarios? Todo lo contrario, los análisis explican los fenómenos físicos y químicos que dominan los procesos y aclaran percepciones técnicas espurias. Bajo estos conocimientos, los procesos son dominados para generar nuevos productos y llevar las condiciones de operación más allá de lo esperado. Pero, el

conocimiento total de la operatividad de procesos particulares sigue sin ser dominado, un ejemplo puede ser en los granos: el tostado conlleva a cambios de componentes, en los cuales la coloración es un indicador somero y limitado para predecir el avance de la hidrolización de proteínas y formación de nitrosodimetilamina, por lo cual una prueba de laboratorio guiaría en la toma de decisiones; no obstante, los fundamentos bioquímicos del tostado y los lotes constantes que el ingeniero de proceso observa la han permitido tomar decisiones factibles sobre el proceso: *toma una muestra de grano previo al secado para determinar su dureza, la prueba y observa, y declara un valor aproximado del valor de set-point en la temperatura de aire caliente; al final del proceso, realiza lo mismo con el grano seco; el resultado de laboratorio a posteriori le corrige o sustenta su predicción.* ¿Este ejemplo demuestra que el ingeniero evadió un elemento 3R? No, lo atenuó con un sentido común impregnado de teoría-práctica en la industria alimentaria. Claro, esto depende de las cualidades personales del ingeniero, las cuales no se intentan explicar aquí.

El ejemplo mencionado parece simple y lejano a todo rigor científico, pero la explicación de la razón de la decisión tomada es la motivación para profundizar en la solución de los problemas 3R de la industria alimentaria. En la actualidad, y con proyección futurista, la inteligencia artificial y la tecnología 4.0 empujan la industrialización vanguardista, donde la industria alimentaria trasciende a través de sus publicaciones científicas: solución de problemas, interpretación de resultados, pronóstico de sistemas, etc., todo sobre el manejo, procesamiento y producción de alimentos. Entonces, si la particularización del conocimiento de ingeniería en industrias alimentarias fue ligeramente

extensa, a un futuro una diversificación de tópicos de solución de problemas existirá. El uso de interpretación de imágenes podría ser un caso al respecto: planta de pasteurización de leche, un ingeniero de proceso por turno, planta totalmente automatizada y comienza una fuga de leche en una válvula, *solución:* cámara supervisora de movimiento continuo detecta un cambio de color en el suelo (análisis de la imagen), manda una señal al sistema de mantenimiento que detiene la línea de envasado con un enjuague de agua, un sistema de rieles aéreos permite que un brazo mecánico llegue al área para efectuar el cambio de válvula. Un sistema futurista e irreal, así decía la sociedad al ver en la televisión (1960's) a alguien hablar a través de un reloj de pulsera.

La ingeniería en industrias alimentarias trasciende por la necesidad social y su proyección es posible con el avance de la tecnología. Esto demanda ingeniero contemporáneo con elementos teóricos suficientes. El fin último es lograr un ingeniero de industrias alimentarias con un sentido común total. Esto aumentaría la trascendencia que la ingeniería en industrias alimentarias ha provisto a la sociedad.

Referencias

- Clark, J.P. (2009). *Case Studies in Food Engineering. Learning from experience:* Springer.
- Fryer, P.J., Pyle, D.L., & Rielly, C.D. (Eds.). (1997). *Chemical engineering for the food industry:* Springer Science.
- Yanniotis, S. (2008). *Solving problems in food engineering.* New York, U.S.: Springer Verlag.

RESEÑA DEL AUTOR

Docente de TecNM-Roque (México) de la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Especialista en Ingeniería de Procesos en Alimentos y experto en Simulación de Procesos y Dinámica Computacional de Fluidos. Autor de más de cuarenta artículos internacionales, varios capítulos de libro y el libro *Diseño de Plantas Alimentarias*. Revisor de revistas como *J. of Food Engineering* y *Food and Bioproducts Processing*. Miembro de SNII nivel 1.

LOS INSECTOS COMO ALTERNATIVA PARA LA INGENIERÍA EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA



Ma. Cristina Vázquez-Hernández

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Roque

RESUMEN

Los insectos son una alternativa para combatir la inseguridad alimentaria debido a su alto valor nutrimental, bajo impacto ambiental, alta eficiencia de conversión de alimento en nutrimentos, alto rendimiento ciclos de vida corto. En México se consumen desde tiempos prehispánicos, por lo cual más del 70% de la población en algún momento los ha degustado. El consumo como alimento de diversos insectos (Chapulines, grillos, chinche de agua, chicanas, escamoles, jumiles, entre otros) es una práctica conocida como entomofagia y en México es llevada a cabo en la mayoría de los estados de la república más comúnmente en el sur en estados como Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Yucatán.

La población mundial alcanzará la cantidad de al menos 9,000 millones para el año 2050, y un buen estado nutricional es posible con al menos 75% de proteínas. Esto podría generar una crisis de escasez en productos alimenticios seguros, inocuos y nutritivos. Sin embargo, la brecha económica de los diferentes estratos sociales ha provocado, que

entre 2019 y 2021, el número de personas que padecen hambre en el mundo aumentó a 828 millones (FAO, 2022), incluyendo los casos desnutrición severa debidos a la pandemia (SARs-CoV2, COVID). En el año 2020, casi 3100 millones de personas no tuvieron acceso a una dieta saludable debido a las repercusiones económicas de la pandemia (pérdida de empleos y la inflación de los precios), al consumo excesivo de alimentos chatarra (con un exceso de calorías y bajo contenido nutrimental) y al aumento en la incidencia

de enfermedades crónico-degenerativas (obesidad, hipertensión, diabetes, etc.). La FAO y la ONU prevén que para el año 2030 casi el 8% de la población mundial seguirá pasando hambre debido a la inseguridad alimentaria. La producción de carne (res, pollo, cerdo, pescado, etc.), vegetales y derivados de estos alimentos requiere de una gran inversión económica y tecnología que va desde los fertilizantes, suplementos alimenticios, hormonas, etc. El uso excesivo de estos productos puede perjudicar la salud de los consumidores y distorsionar los mercados, lo cual promueve la producción de alimentos no nutritivos, costosos y con riesgo a generar enfermedades a largo plazo. Así, los insectos son una alternativa para ofrecer alimentos a bajo costo, con alto valor nutrimental que pueden ser incluidos en la canasta básica desplazando o supliendo los productos existentes. De los 17 objetivos del Desarrollo Sostenible, la erradicación de la pobreza y la seguridad alimentaria son primordiales para la humanidad. Para lograr su cumplimiento, no cabe duda, que los insectos están implicados.

En un estudio realizado por Escalante-Aburto et al. (2022), la práctica de la entomofagia es reportada con aceptación en Brasil, Sudáfrica, China, Australia y México, con un registro de 549 especies. En México, la entomofagia existe desde la época prehispánica y, actualmente, es asociada a una acción desagradable, alimento de consumo inseguro con riesgo de infección, enfermedad o intoxicación, pero es una opción viable de consumo para la supervivencia. La mayoría de los mexicanos (un poco más del 70%), por curiosidad, han llegado a consumir insectos o productos que contengan harina o insectos en polvo, sin considerar su composición nutrimental. En algunos casos, el consumo es por tradición o por algunos otros factores, como experiencia cultural o estatus académico (las personas con mayor nivel educativo se interesan más en los beneficios nutrimentales). Sin embargo, la población mexicana no desarrolla una ingesta regular para garantizar un cambio en los hábitos alimenticios y nivel significativo en la dieta. La necesidad de romper con los paradigmas es otro elemento esencial de este tema, pues lo convencional es el consumo preferente de proteínas de origen animal.

Actualmente, en México existen diversas empresas dedicadas a la producción de insectos y su procesamiento que forman parte de APICAL, una alianza de empresas pioneras en Latinoamérica en la producción, procesamiento y comercialización de insectos. Entre estas empresas destacan: griYUM (harina de grillo), aceta (proteína de origen vegetal

y harina de grillo), Illucens (proteína de la larva soldado negro), Cochua (grillos enteros sazonados y harina de grillo), Be Ento (grillo en polvo), Entomolov (producción de insectos), Insect Nutrition (producción de chapulín y grillo), Magribe (alimentos adicionados con harina de grillo), Mel Bugs (productos alimenticios elaborados con grillo, chapulín y tenebrio), Nutrinsectos (investigación y desarrollo tecnológico de sistemas de crianza y procesamiento de insectos), OptiProt (proteína de insectos), Santena (alimentos elaborados con insectos), Zuustento (producción y procesamiento de tenebrio molitor) y la Fundación Mexicana de Criaderos de Insectos Comestibles.

La producción y consumo de alimentos adicionados con harina de insectos están relacionados con la seguridad alimentaria y con la frase de *“Los insectos son el alimento del futuro”*, debido a que el recurso para su crianza y procesamiento es mínimo en comparación con las proteínas animales y vegetales, y el aporte nutricional es mayor en proteínas, fibra, vitaminas y minerales. La harina de chapulín, grillo, tenebrio o cualquier otro insecto comestible son fuente de nutrientes que contribuye a disminuir el impacto al medio ambiente mediante una bioeconomía circular. Uno de los aspectos relevantes de la producción y consumo de harina de insecto es la inocuidad, puesto que la existencia de enfermedades o parásitos es posible en los vegetales que los insectos consumen. Así, un protocolo adecuado, para su sanitización y correcta eliminación del sistema digestivo, es necesario bajo la Norma Oficial Mexicana (NOM-251-SSA1-2009: Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios). Esto aseguraría la protección contra riesgos sanitarios durante la elaboración de los productos con insectos. Aunque a nivel mundial, una regulación específica para este tipo de productos no existe y la calidad e inocuidad de los alimentos elaborados debe ser garantizada.

El mercado de las harinas de insecto es considerado un nicho de oportunidad y es clasificado como: Mercados tradicionales (caso de México con consumo regular de algún tipo de insecto en casi todo el territorio) y los Mercado emergente (oportunidad para dar a conocer y comercializar los productos elaborados con insectos, como la Unión Europea, Estados Unidos, etc.). No obstante, los insectos también pueden ser importante fuente alimenticia para la parte pecuaria, acuícola o avícola, por ejemplo, la harina de chapulín y chíá para tilapias en etapa juvenil. Este producto fue formulado por estudiantes del TecNM-campus Roque, cuya evaluación fue posible en

granjas de tilapia con beneficios en el peso y costo de inversión al compararse con el alimento comercial.

El chapulín es considerado el insecto más comestible en México y las especies más comunes, para la zona del Bajío de México, son *Sphenarium purpurascens*, *Melanoplus differentialis* y *Brachystola mexicana*, según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Los beneficios de su consumo han sido documentados en años recientes por diversos investigadores (Escalante-Aburto et al., 2022), los cuales incluyen un alto contenido proteico de alta digestibilidad, calcio, magnesio y vitaminas del complejo B.

Estos insectos son recolectados en el campo y con ello se disminuye su impacto ambiental, lo cual es beneficioso pues son considerados plaga que consumen gran parte de los cultivos y provocan repercusiones económicas. Los chapulines son

El ciclo reproductivo de los chapulines comienza cuando las hembras adultas antes de morir (época de otoño-invierno) ovopositan en el suelo a una profundidad de entre 3 a 5 cm, a estas hueveras se les llama ootecas y pueden llegar a contener de 15 a 60 huevecillos lo cual dependerá de la especie; cada hembra puede llegar a ovopositar desde 4 a 7 ootecas en su ciclo de vida. Las ootecas permanecen en el suelo hasta las primeras lluvias debido a que la humedad ocasiona la eclosión de los huevecillos y emergencia de los chapulines en etapa ninfal. El ciclo de vida de estos insectos es corto y en promedio necesitan 500 unidades calor para completar su ciclo de vida (las unidades calor refieren el ritmo de desarrollo en proporción con la temperatura).

consumidos de diversas formas, como preparaciones gastronómicas, deshidratados, salados, asados, enchilados, en salmuera, etc. Aunque, el procesamiento en forma de harina sobresale para la adición y elaboración de productos alimenticios como pan, galletas, barras energéticas, etc. La harina de chapulín está compuesta de 60-70% de los insectos, de los cuales su 80% es digerible. Sin embargo, el cambio climático, ocasionado por los gases de efecto invernadero en respuesta a la sobreexplotación de los bosques, la producción pecuaria, entre otros factores que afectan el medio ambiente, ha provocado cambios en los ciclos de lluvia en 2023; particularmente, las primeras precipitaciones pluviales en la zona del Bajío fueron a finales del mes de junio, lo cual ocasionó la baja población de chapulines, esto fue beneficioso para los agricultores (disminución de esta plaga). No obstante, en los últimos ciclos, los productores de alimentos derivados o adicionados con chapulín han recolectado entre 100-200 g/ha que en años anteriores era de 250-500 g/ha. En algunas regiones del país, la sobreexplotación de los insectos también ha contribuido a una disminución en su población, por lo cual se ha optado por la producción controlada en granjas, las cuales usan un cultivo intensivo bajo condiciones de invernadero y logran horas calor óptimas para generar poblaciones adultas de insectos sin parásitos (inocuas).

Como se ha mencionado, los chapulines contienen gran cantidad de nutrimentos, pero su producción controlada es complicada. Las ootecas son difíciles de conservar y cuando no se alimentan lo suficiente se vuelven caníbales; por lo cual, las empresas dedicadas a su producción generan costos altos y llegan a comercializar los productos, como las harinas, hasta en \$1,100.00 MXN/kg. Además del elevado precio comercial, la aversión al consumo de insectos es un tabú para la mayoría de los mexicanos, sobre todo de zonas urbanas no acostumbradas a su consumo cotidiano y con una barrera emocional. Esto provoca que, a pesar de los grandes beneficios de su consumo, los productos alimenticios adicionados con proteína de chapulín, o algún otro insecto, no logren posicionarse en el mercado.

El grillo (*Acheta domestica*) es considerado uno de los insectos prometedores para la elaboración de alimentos fortificados debido a su perfil nutrimental (alto aporte de aminoácidos esenciales y antioxidantes). Contiene de 65 a 75% de proteína, *entomoproteínas*, y, al igual que los chapulines, tiene un mayor coeficiente de conversión de

alimento a proteína, aportan 6.7 g de grasa y contienen vitamina B12 y minerales esenciales (hierro, fósforo, potasio y magnesio). La ingesta de harina de grillo se ha relacionado con una mejora en la memoria y sistema nervioso y aumento de energía. Este insecto puede producirse en una reducida área y con casi nula emisión de gases de efecto

invernadero. Su ciclo de vida es corto y puede ser cosechado cada 40-50 días. Los residuos o subproductos alimenticios, como frutas y verduras, son la alimentación de los grillos, y se estima una producción de 12,000 grillos/m², lo cual representa una oportunidad de negocio rentable. A partir de este insecto, la producción de harina o pasta permitiría la elaboración de hamburguesas, salchichas, tortillas, totopos, tostadas, salsas, galletas, etc.

Tenebrio molitor, también conocido como el gusano de la harina, es otra opción de consumo, además el cual es utilizado como biofertilizante, farmacéutico, cosmético. Tiene un tiempo de eclosión de 1 a 4 semanas y de etapa larvaria de 8 a 10 semanas, esta última presenta el mayor contenido de proteína. Posteriormente, pasa a una etapa de transición hacia la fase adulta, etapa de pupa (1 a 3 semanas), donde permanece inmóvil alimentándose de sus reservas de nutrientes. Después de la etapa de pupa, este insecto llega a su etapa adulta: un escarabajo sexualmente activo para llegar a producir hasta 500 huevecillos. Este gusano está reconocido y certificado por la Agencia Europea para la Seguridad Alimentaria (EFSA) como seguro para el consumo humano. Nutricionalmente, la fase larvaria contiene entre un 50 a 60% de proteína de alta digestibilidad, grasas insaturadas, vitaminas (A, D, E, C, B2 y B9) y

minerales (hierro, calcio, fósforo, magnesio, potasio y zinc).

Reducir el consumo de proteínas de origen animal y vegetal es un reto debido a los hábitos alimenticios desarrollados a lo largo del tiempo; sin embargo, es necesario reflexionar y crear conciencia sobre el impacto negativo de su consumo. Antes de preferir

el consumo de alimentos de origen animal o vegetal respecto a los producidos con harina de insecto, debemos considerar que, además de la huella de carbono, también se ocasiona una huella hídrica por los recursos utilizados para la producción de proteínas animales que implica el cultivo de forraje, transporte, infraestructura, etc. La eficiencia de producir estos alimentos se

traduce en cuantos kilogramos de proteína se obtienen por kilogramo de alimento, cuantos litros de agua se utilizan para su crianza y la cantidad de CO₂ producida por los desechos pecuarios.

Retomando la pregunta inicial de este artículo, sobre si los insectos son el alimento del futuro, y considerando las ventajas y desventajas, desde mi punto de vista la respuesta es SI. No podemos seguir manteniendo durante largo tiempo el estilo de consumo de proteínas convencionales actual. Y, los insectos son una alternativa para erradicar la inseguridad alimentaria y contribuir al cuidado del medio ambiente en un entorno sostenible amigable con la naturaleza. Así, la pregunta final aquí es: *¿Estás dispuesto a incluir en tu dieta diaria algún producto adicionado con harina de insecto?*



Referencias

- CIAD. (2023). <https://www.ciad.mx/potencial-de-la-harina-de-grillo-para-la-produccion-sostenible-de-alimentos/>.
- Contreras Jiménez, B., Oseguera Toledo, M.E., Garcia Mier, L., Martínez Bravo, R., González Gutiérrez, C.A., Curiel Ayala, F., & Rodríguez-García, M.E. (2020). Physicochemical study of nixtamalized corn masa and tortillas fortified with “chapulin” (grasshopper, *Sphenarium purpurascens*) flour. *CyTA-Journal of Food*, 18(1), 527-534. DOI: 10.1080/19476337.2020.1794980.
- Escalante-Aburto, A., Rodríguez-Sifuentes, L., Ozuna, C., Mariscal-Moreno, R.M., Mulík, S., Guiné, R., & Chuck-Hernández, C. (2022). Consumer perception of insects as food: Mexico as an example of the importance of studying socio-economic and geographical differences for decision-making in food development. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(10), 6306-6316. DOI: 10.1111/ijfs.15995.
- FAO. (2022). <https://www.fao.org/newsroom/detail/un-report-global-hunger-SOFI-2022-FAO/es>.
- Vauterin, A., Steiner, B., Sillman, J., & Kahiluoto, H. (2021). The potential of insect protein to reduce food-based carbon footprints in Europe: The case of broiler meat production. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128799.
- Villaseñor, V.M., Enriquez-Vara, J.N., Urias-Silva, J.E., & Mojica, L. (2022). Edible insects: Techno-functional properties food and feed applications and biological potential. *Food Reviews International*, 38(sup1), 866-892. DOI: 10.1080/87559129.2021.1890116.

RESEÑA DE LA AUTORA

Ingeniera Bioquímica en Alimentos con Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y Doctorado en Ingeniería de Biosistemas, profesora del Tecnológico Nacional de México-Campus Roque. Miembro del SNII nivel C. Línea de investigación: *Innovación y desarrollo tecnológico en el cultivo y procesamiento de alimentos con alto valor nutrimental*. Líder del Cuerpo Académico: *Innovación en Bioprocesos Sustentable*.

ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE UNA TORTILLA MULTIPROTÉICA CON CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

*Karen E. Martínez-Jiménez y Ma. Cristina Vázquez-Hernández**

RESUMEN

El maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las poáceas, a partir del cual se producen diversos alimentos, entre ellos la tortilla. En México, esta es un producto primordial dentro de la canasta básica, que en 2016 su consumo fue 57-80 kg per cápita al año, según encuestas de CONEVAL. La tortilla aporta el 47% de la ingesta calórica y es deficiente en aminoácidos esenciales y hierro. En zonas rurales de México, la aportación nutrimental llega al 70% de calorías totales y 50% de proteínas, lo cual ha contribuido a la desnutrición. El objetivo de esta investigación fue diseñar, elaborar y analizar los componentes de una tortilla con características funcionales para ofrecer un producto con alto valor nutricional a los consumidores. Los resultados mostraron un alto contenido proteico (10.08%) y de fibra (6.23%).

Palabras clave

Desnutrición, enfermedades crónico-degenerativas, alimentos endémicos.

ABSTRACT

Corn (*Zea mays*) belongs to the Poaceae family, from which various foods are produced, including tortillas. In Mexico, it is a primary product within the basic food basket in 2016 its consumption was around 57-80 kg per capita per year, according to surveys conducted by CONEVAL. Tortilla provides 47% of caloric intake and is deficient in essential amino acids and iron. In rural areas of México, it is estimated to provide up to 70% of total calories and 50% of proteins, contributing to malnutrition. This research aimed to design, prepare, and analyze the components of a tortilla with functional characteristics to offer a product with high nutritional value. Results showed a high protein (10.08%) and fiber (6.23%) content.

Keywords:

Malnutrition, chronic-degenerative diseases, endemic foods.

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque. km 8 Carretera Celaya-Juventino Rosas. C.P. 38124, Roque, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia: ma.vh@roque.tecnm.mx

1. Introducción

En México, el grano de maíz es utilizado para la producción de diversos alimentos como harinas, almidón modificado, jarabes de alta fructosa, etanol, entre otros productos dentro de los cuales destaca la tortilla. Actualmente, este alimento forma parte de la canasta básica y es altamente consumido por su sabor, diversificación en otros productos y por tradición (Aproximadamente el 94% de los mexicanos consumen tortilla) (Toledo et al., 2019). Como lo menciona el CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social), en 2016 el consumo per cápita es de entre 57 a 80 kg de tortillas por año tanto en zonas rurales como urbanizadas. Desde la antigüedad, el proceso de obtención se lleva a cabo mediante la nixtamalización (agregando hidróxido de calcio al agua de cocción), molienda, prensado y cocción en comal. Este procedimiento agrega calcio al producto final y características fisicoquímicas y reológicas agradables al consumidor; sin embargo, este producto es deficiente en aminoácidos esenciales (triptófano y lisina) (Chaudhary et al., 2014; Santiago-Ramos et al., 2018; Escalante-Aburto et al., 2020).

La pobreza alimentaria se relaciona con la seguridad alimentaria y el consumo alimentario, además está asociada con el entorno social y cultural y la capacidad económica de un estrato social (López Salazar, 2015). El hambre y la pobreza han aumentado significativamente hasta 2,000 millones de personas en el mundo en 2019 y estimando que para 2023 se sumarán entre 83 y 132 millones personas que no logran acceder a alimentos inocuos, nutritivos y suficientes (Ramírez-Juárez, 2022). El estudio diagnóstico del Derecho a la Alimentación Nutritiva y de Calidad llevada a cabo por el CONEVAL, en 2018, mostró que México atraviesa un grave problema de vulneración en el tema de seguridad alimentaria que afecta de forma general a la mayoría de las familias, lo cual se traduce en que seis de cada diez hogares no cuentan con los recursos suficientes para tener una alimentación adecuada de calidad (Fierro-Moreno et al., 2023). En Guanajuato, el 43% a 51% del total de la población experimenta dificultades para satisfacer sus necesidades alimentarias (ENSANUT, 2018; INEGI, 2018). El Gobierno de México a través de Sistema Único Automatizado de Vigilancia Epidemiológica (SUAVE, 2021) indica que más del 59% de la población tiene sobrepeso y obesidad, con una actividad física insuficiente, altos niveles de colesterol y presión sanguínea, prevalencia de diabetes mellitus tipo 2, y

desnutrición en los grados leve, moderada y severa con las tasas de incidencia de 15.2, 2.6 y 1.4 casos por cada 100 mil habitantes, respectivamente.

Este trabajo diseñó, elaboró y caracterizó bromatológicamente una tortilla de maíz colorado adicionada con lenteja, cúrcuma, cáscara de jitomate orgánico y chía. Las lentejas proporcionan proteínas altamente digeribles, no contienen colesterol ni grasas saturadas, y contienen carbohidratos complejos y de lenta absorción y bajo índice glicémico (Antonio, 2022; Lugo et al., 2023). El consumo de cúrcuma en la alimentación diaria es de gran importancia por su aporte de antioxidantes (curcumina) que puede ayudar a prevenir el envejecimiento prematuro de las células y algunos tipos de cáncer, mejorar la función hepática y disminuir la inflamación del estómago (Omonte Rodríguez y Bustamante García, 2022; Macías-Giler et al., 2023; Pinzón et al., 2024). Las semillas de chía es fuente de ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido alfa-linolénico precursor del omega-3 con propiedades antiinflamatorias, antitrombóticas y vasodilatadoras que regulan la presión arterial y el colesterol (Zettel y Hitzmann, 2018; Ullah et al., 2016). Así, este producto tiene un alto valor nutrimental, satisface el hambre, beneficia la salud disminuyendo la incidencia de enfermedades crónico-degenerativas y mejora la nutrición.

2. Materiales y métodos

El presente proyecto fue realizado en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México en Roque, extensión de Apaseo el Alto, Guanajuato. El material biológico (maíz colorado criollo, lentejas y semilla de chía) fue cultivado en las parcelas didácticas de la institución durante el ciclo primavera-otoño 2022 y consumió residuos de jitomates orgánicos (*Solanum lycopersicum* var. Uva). La cúrcuma en polvo fue de la marca Kirkland Signature. El diseño partió de tres formulaciones modificando la cantidad de ingredientes y la optimización de las formulaciones fue posible con la herramienta SOLVER® de Excel (Santiago-Ramos et al., 2017). La elaboración de las tortillas siguió la metodología de Santiago-Ramos et al. (2017): proceso de nixtamalización, mezclado de ingredientes, cocimiento de lentejas (agua en ebullición durante 1 h), molienda de lentejas (licuadora a velocidad media durante 30 segundos), adición de semillas de chía, la cúrcuma y harina de jitomate orgánico, y cocción del producto siguiendo la metodología modificada de Carvajal-Macías et al. (2019). La Figura 1 presenta

detalladamente este proceso. Posteriormente, un análisis sensorial fue elaborado (análisis sensorial a nivel consumidor, prueba de preferencia por ordenación con 100 panelistas no entrenados, aplicando una escala de Likert de 5 puntos). La muestra seleccionada fue la de mayor aceptación para realizar la caracterización

bromatológica por triplicado (Humedad, proteína, grasa-extracto etéreo, cenizas, fibra cruda y carbohidratos) conforme a la norma PROY-NOM-216-SSA1-2002. Una tabla nutricional fue propuesta con base en la norma actualizada NOM-051-SCFI/SSA1-2010 (Esparza-Arroyo, 2021).

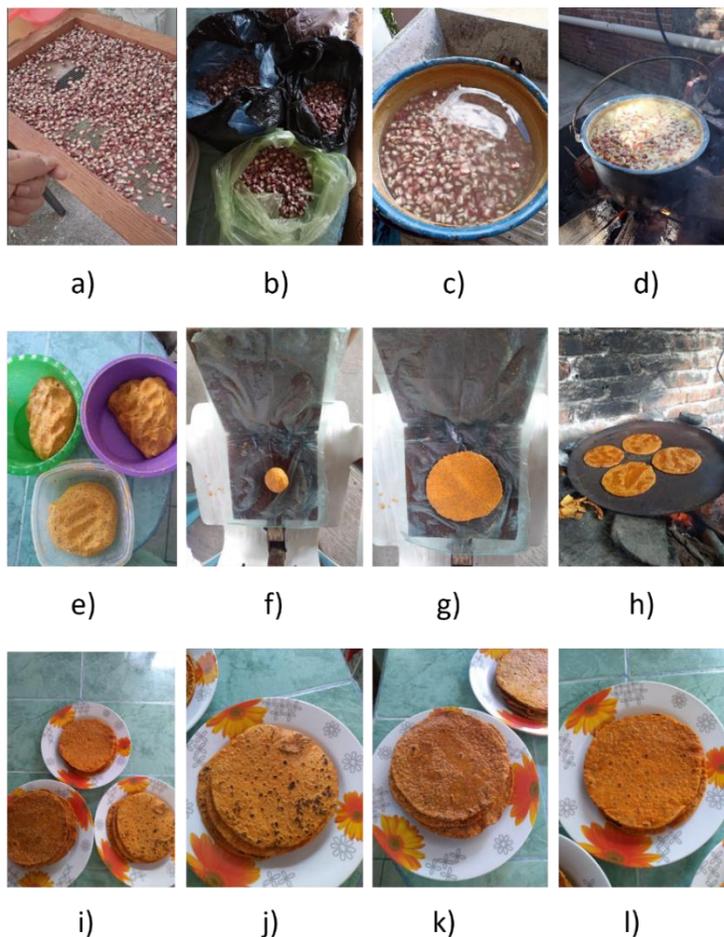


Fig. 1. Proceso de elaboración de tortillas para este proyecto: a)-b) recepción, selección y filtrado del maíz, c) lavado del maíz, d) nixtamalizado, e) masas de diferente formulación, f)-g) prensado tortillas, h) cocción de tortillas, i) tres formulaciones, j) formulación 1, k) formulación 2 y l) formulación 3 (Información clasificada).

3. Resultados y discusión

Los resultados de la evaluación sensorial mostraron que la Formulación 3, M3 (Información clasificada) tuvo un mayor grado de aceptación por parte de los consumidores y comparada con una tortilla comercial el nivel de preferencia fue 3 veces mayor. La Tabla 1 muestra los resultados del análisis bromatológico realizado a las tortillas (humedad, cenizas, grasas, fibra, proteína y carbohidratos) los cuales fueron realizados

por triplicado (M1, M2 y M3). Los últimos fueron calculados matemáticamente por diferencia. Los análisis fueron por triplicado e incluyeron los cálculos de la media, desviación estándar y error. Las tortillas multiproteicas de la Formulación 3 tienen mayor contenido de fibra (6.23%) en comparación con una tortilla comercial (3.91%); el contenido de proteína es significativamente mayor en las tortillas multiproteicas (media de 10.08%) respecto a la comercial (4.78%).

Estos dos nutrientes tienen gran importancia en la nutrición de los consumidores, pues la fibra puede ayudar a mejorar el tránsito intestinal (fibra insoluble) y sentir saciedad (fibra soluble), ambos provenientes del maíz colorado, la harina de jitomate orgánico, la semilla de chía y la lenteja. El contenido de grasa reportado como extracto etéreo es similar entre la tortilla

multiproteicas: (3.86%) y la tortilla comercial (3.91%), la diferencia radica en el tipo de grasas contenidas en el producto. La Tabla 2 es el resumen nutrimental de las tortillas comerciales.

Tabla 1. Resultados de análisis bromatológicos realizados a la tortilla multiprotéicas. Datos reportados respecto a 100 g de muestra. M1, M2 y M3 indican las repeticiones de los análisis realizados.

ANÁLISIS	M1	M2	M3	Media	Desviación Estándar	Error
Humedad	46.61	46.68	46.31	46.533	0.1603	0.0925
Cenizas	1.55	1.54	1.55	1.546	0.0579	0.0334
E. Etéreo	3.96	3.69	3.93	3.86	0.2111	0.1218
Fibra Cruda	5.8027	6.7263	6.1862	6.2384	0.6562	0.3788
Proteína	10.06	10.06	10.12	10.08	0.0282	0.0162
Carbohidratos	32.0173	31.3037	31.9038	31.7416	0.1645	0.095

Tabla 2. Información nutrimental de tortilla comercial (Marca Santo Corral de 100g)

Este producto contiene azúcares y sal de mesa añadidos		
Contenido calórico: 186.95 Kcal por 100g		
Componente	Porción: 1 pieza, 23g	Porcentaje
Grasas totales	0.9	3.91
Carbohidratos totales	7.6	33
Fibra	0.9	3.91
Proteína	1.1	4.78

Tabla 3. Tabla nutrimental de las tortillas multiprotéicas (Formulación 3)
Información Nutrimental

Tamaño de porción	100 g
Porciones por envase	1 porción de 100 g aporta:
Contenido Energético	201 kcal
Proteínas	10 g
Lípidos	4 g
Carbohidratos	32 g
Fibra	6 g

A partir de los resultados anteriores y con base en la NOM-051-SCFI/SSA1-2010, la tabla nutrimental del producto fue desarrollada, ver Tabla 3. El nombre de Torti Forte fue propuesto para este producto y una búsqueda en la página del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) conforme al ClasNiza (Tipo de clase: Productos, clase: 29-Carne, pescado, carne de ave y carne de caza; extractos de carne; frutas y

verduras, hortalizas y legumbres en conserva, congeladas, secas y cocidas; jaleas, confituras, compotas; huevos; leche, quesos, mantequilla, yogur y otros productos lácteos; aceites y grasas para uso alimenticio) no arrojó coincidencias. Así, el logotipo de la marca fue diseñado, como lo muestra la Figura 2.



Fig. 2. Logotipo de las Tortillas multiprotéicas con nombre del producto (Torti Forte).

4. Conclusiones

En la última década, en México se ha incrementado considerablemente la incidencia de enfermedades crónico degenerativas y desnutrición, ocasionadas por la inseguridad alimentaria provocada por diversos factores tanto económicos como culturales sumados a los problemas mundiales como la pandemia por COVID (SARS-CoV-2) y la guerra en Ucrania, dando como resultado falta de acceso a alimentos inocuos y nutritivos. Actualmente, las tendencias en la Industria Alimentaria se dirigen al diseño y elaboración de alimentos con alto valor nutrimental y características funcionales que aporten un beneficio a la salud de los consumidores aprovechando los cultivos endémicos dentro una bioeconomía circular sostenible. Las tortillas “Torti Forte” ofrecen al consumidor un producto de la canasta básica que, por su contenido nutrimental, puede favorecer el estado nutricional de los consumidores sin el uso de conservadores.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de proyectos de investigación del cuerpo académico ITROQ-CA 11 “Innovación en Bioprocesos Sustentables” del Tecnológico Nacional de México/IT Roque. Agradecemos a Dra. Rosa María Mariscal Moreno por su apoyo para la realización de este proyecto y la vinculación con CINVSTAV Juriquilla, Qro., donde se realizaron los análisis bromatológicos del producto “Torti Forte”. Así mismo, a

la empresa Salamanca Organics S.P.R. de R.L. por el jitomate (*Solanum lycopersicum* var. Uva) proporcionado para la realización de este proyecto.

Referencias

- Antonio, P.L.P. (2022). Evaluación sensorial y nutricional de un producto, tipo carne, a base de lenteja (*Lens culinaris*) con haba (*Vicia faba*). Universidad agraria del Ecuador, Ecuador.
- Carvajal-Macías, B., Pérez-Ramírez, S., Gaviria-Gaviria, Y., & Alzate-Agudelo, J. (2019). Sustitución de nitritos en un producto cárnico embutido por nabo (*Brassica rapa*) y sustitución parcial de harina de papa (*Solanum tuberosum*) por harina de cáscara de mango (*Mangifera indica*) para la evaluación del desarrollo de color y textura. *Informador técnico*, 83(1), 19-29.
- Chaudhary, D.P., Kumar, S., & Langyan, S. (Eds.). (2014). *Maize: nutrition dynamics and novel uses* (Vol. 3). New Delhi, Springer India.
- ENSANUT. (2018). Recuperado de: https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/doctos/informes/ensanut_2018_presentacion_resultados.pdf
- Escalante-Aburto, A., Mariscal-Moreno, R.M., Santiago-Ramos, D., & Ponce-García, N. (2020). An update of different nixtamalization technologies, and its effects on chemical composition and

- nutritional value of corn tortillas. *Food Reviews International*, 36(5), 456-498.
- Esparza-Arroyo, S.E. (2021). Caracterización de un alimento preentrenamiento elaborado con camote (*Ipomea batatas L.*). TECNAM Campus Roque, México.
- Fierro-Moreno, E., Lozano-Keymolen, D., & Gaxiola-Robles Linares, S.C. (2023). Inseguridad alimentaria en México: análisis de dos escalas en 2020. *Estudios sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(61), 1-27.
- INEGI. (2018). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/EAPAlimentacion.pdf>
- López Salazar, R. (2015). Pobreza alimentaria, seguridad alimentaria y consumo alimentario: una aproximación para el caso de México. *Revista Chilena de Economía y Sociedad*, 9(1), 24-54.
- Lugo, R.D., Contreras, I.P., & Del Águila, D.C. (2023). Formulación y elaboración de postres altos en fibra basados en lenteja (*lens culinaris*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) con efectos funcionales. *Latam: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, (4), 207-216.
- Macías-Giler, E., García-Murillo, J., Cisneros-Pérez, I., & García-Muentes, S. (2023). Evaluación de los métodos de extracción de curcumina de la cúrcuma (*Curcuma longa*). *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(12), 128-163.
- Omonte Rodríguez, L.A., & Bustamante García, Z. (2022). Actividad Antioxidante, Antibacteriana y Citostática de Extractos de Cúrcuma (*Curcuma longa*). *Gaceta Médica Boliviana*, 45(1), 12-16.
- Pinzón, S., Cabrera, L., & Pico-Fonseca, S.M. (2024). La cúrcuma longa como anti-cancerígeno: Una revisión de la literatura. *Universidad y Salud*, 26(1), 1-8.
- Ramírez-Juárez, J. (2022). Seguridad alimentaria y la agricultura familiar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 553-565.
- Santiago-Ramos, D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Véles-Medina, J.J., & Mariscal-Moreno, R.M. (2017). Changes in the thermal and structural properties of maize starch during nixtamalization and tortilla-making processes as affected by grain hardness. *Journal of Cereal Science*, 74, 72-78.
- Santiago-Ramos, D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Mariscal-Moreno, R.M., Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., & Véles-Medina, J.J. (2018). Physical and chemical changes undergone by pericarp and endosperm during corn nixtamalization-A review. *Journal of Cereal Science*, 81, 108-117.
- SUAVE. (2021). Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/745354/PanoEpi_ENT_Cierre2021.pdf
- Toledo, J.M.C., Carballo, A.C., Contreras, J.A.M., de los Santos, G.G., Huerta, H.V., & González, M.C. (2019). Valoración de granos de maíces criollos sobresalientes de la raza zapalote chico. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 6(1), 1-17.
- Ullah, R., Nadeem, M., Khalique, A., Imran, M., Mehmood, S., Javid, A., & Hussain, J. (2016). Nutritional and therapeutic perspectives of Chia (*Salvia hispanica L.*): a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53(4), 1750-1758.
- Zettel, V., & Hitzmann, B. (2018). Applications of chia (*Salvia hispanica L.*) in food products. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 43-50.

BEBIDA A BASE DE SUERO DE LECHE DULCE FORTIFICADA CON GERMINADO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*)

María del Carmen Ramírez-Mota y Susana Elizabeth Altamirano-Romo*

RESUMEN

La quinoa (*Chenopodium quinoa*), un pseudo cereal con orígenes en Suramérica, es considerado de gran valor nutritivo por su alto contenido de proteína en referencia a los cereales y su perfil de aminoácidos esenciales, además de su perfil de vitaminas y minerales, características que mejoran con la germinación debido al aumento de la biodisponibilidad y generación de moléculas con actividad biológica, entre ellas la antioxidante. El aporte nutricional de la quinoa germinada como complemento en bebidas a base de suero de leche fue evaluado en dos formulaciones (F1 y F2) usando diferentes proporciones de harina de germinado de quinoa y comparadas con una bebida comercial (control). Los resultados de análisis fisicoquímicos, proximales y de actividad antioxidante fueron analizados por ANDEVA seguidos por comparación de medias Tukey, ambos con $P \leq 0.05$. La F2 mostró las mejores características nutrimentales al tener mayor porcentaje de fibra y proteína; el contenido de fenoles totales entre las dos formulaciones fue el mismo pero menor al del control, sin embargo, la actividad antioxidante fue mayor. Los datos demuestran que la quinoa germinada es una materia prima que aumenta las propiedades funcionales y nutrimentales en este tipo de productos.

Palabras claves:

Lactosuero, bebida, valor nutritivo, actividad antioxidante, biodisponibilidad.

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa*) is a pseudo-cereal with origins in South America, is considered of great nutritional value due to its high protein content compared with cereals, and its essential amino acids profile improves with vitamins and minerals. These characteristics increase during germination due to the enlargement of bioavailability and generation of molecules with biological activity, including antioxidants. The nutritional contribution of sprouted quinoa, as a raw material for beverages based on whey, was evaluated in two formulations (F1 and F2) using different proportions of quinoa sprouted flour and compared with a commercial beverage (control). The results of physicochemical, proximal, and antioxidant activity analyses were developed by ANOVA and compared with Tukey means, both with $P \leq 0.05$. Formulation 2 showed the best nutritional characteristics due to its highest percentage of fiber and protein. The content of total phenols between the two formulations was the same but lower than the control; however, the antioxidant activity was higher. The data showed that sprouted quinoa is a raw material that increases functional and nutritional properties of these types of products.

Keywords:

whey, beverage, nutritive value, antioxidant activity, bioavailability.

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México / I. T. de Roque, Carretera Celaya-Juventino Rosas Km. 8, Celaya, Guanajuato, 38124, México

*Autor de correspondencia: susana.ar@roque.tecnm.mx

1. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa*), también conocida como quinoa, es un pseudocereal que se originó en América del Sur, pertenece a la familia *Chenopodiaceae*; y es un alimento demandado debido a su alto valor nutricional, en especial por su aporte de proteína y el perfil de aminoácidos en comparación con cereales como el maíz y trigo (Nowak et al., 2016). La quinua contiene en promedio del 12-17% de proteína y es reconocida como buena fuente de minerales que incluyen al potasio, calcio, magnesio, hierro, fósforo, zinc, manganeso y cobre (Huraca-Aparco et al., 2021); también cuenta con todos los aminoácidos esenciales destacando el contenido de lisina y metionina. Otra característica es la ausencia de gluten, motivo por el cual puede ser incluida en la dieta de personas que padecen de celiaquía (Repo-Carrasco-Valencia & Serna, 2011).

La germinación es un proceso biológico que mejora el valor nutritivo y el contenido fitoquímico en los cereales y pseudocereales, provoca un aumento de la digestibilidad de proteínas y almidón, y acrecienta el contenido fenólico total y la biodisponibilidad de algunos minerales (Nelson et al., 2013). En la revisión de Campos-Rodríguez et al. (2022) existen referencias con incremento de estas propiedades durante las 48-72 h de germinación en semillas de quinua. De acuerdo a los resultados de Darwish et al. (2020), el contenido de hierro, calcio, zinc, vitamina C y carotenoides incrementó en un 39.43, 49.04, 20.25, 32.17 y 26.02%, respectivamente en semillas de quinua germinadas; mientras que los factores anti nutricionales de saponina, ácido fítico y taninos en 59.60, 50.0 y 11.32%, respectivamente. Además de mejorar el valor nutritivo de las semillas, la germinación también trae los cambios deseables en la disponibilidad de nutrientes, textura y propiedades organolépticas (Padmashree, 2019). De acuerdo con Bhinder (2021), la quinua negra se caracteriza por los ácidos hidroxicinámicos de mayor unión, flavanoles, magnesio, potasio y actividad antioxidante, mientras que la quinua blanca presenta menor saponina, ácido fítico pero mayor proteína, hierro, calcio, también tiene una mayor actividad antioxidante con un incremento de esta de 27.23%, pero tiene menor cantidad de polifenoles que la quinua negra.

El lactosuero es el líquido resultante de la coagulación enzimática o microbiana de la leche durante la elaboración del queso; está formado por una mezcla importante de proteínas que poseen un amplio rango de propiedades; además contiene péptidos con actividad antioxidante, antimicrobiana, antitrombótica, hipolipemiente,

antihipertensiva e inmunológica, entre otros beneficios para la salud del ser humano (Chacón-Gurrola et al., 2017).

A pesar de su valor biológico, el lactosuero generalmente es considerado como un desecho y se elimina sin tratamientos previos generando contaminación ambiental; teniendo esto en consideración, es importante el desarrollo de alimentos con potencial beneficio a la salud que puedan incluir el lactosuero dentro de su formulación contribuyendo al aprovechamiento de subproductos de la Industria Alimentaria. Esta investigación tuvo por objetivo desarrollar un producto fermentado a base de suero de leche y harina de quinua fermentada para evaluar el impacto sobre la calidad nutrimental y posibles beneficios a la salud.

2. Materiales y métodos

La quinua, adquirida en un mercado local, fue germinada según lo reportado por Franco et al. (2017) con ligeras modificaciones. El grano fue lavado con agua potable y dejado en remojo durante 6 horas a temperatura ambiente, después de escurrir para retirar el exceso de agua, los granos fueron esparcidos sobre una cama de papel y colocados en una recipiente de plástico para incubarlos 20°C durante 48 horas en oscuridad, alcanzando un tamaño de radícula de 1.5-2.0 cm. Posteriormente, la quinua germinada fue secada a 100 °C durante 1.5 horas y fue pulverizada en un molino para café (Cuisinart DCG-12BC, México) y después fue tamizada con malla No. 60 que corresponde a un tamaño de partícula de 0.025 cm.

El lactosuero fue obtenido como subproducto en el Taller de Lácteos del TecNM-Roque de la elaboración de queso panela con pH y acidez de 6.6 ±0.08 y 0.43 ±0.04 respectivamente, los valores son el promedio de tres lotes. El lactosuero fue pasteurizado a 65±2 °C y filtrado en manta cielo (poro ≈1mm) para eliminar nata y sólidos suspendidos, lo anterior para reducir la carga microbiana y evitar el deterioro microbiológico durante el almacenamiento; además, como requisito de calidad se determinaron coliformes totales y cuantificación de mesófilos aerobios de acuerdo a las NOM-113-SSA1-1994 y NOM-092-SSA1-1994 respectivamente. Una vez frío el suero de leche fue suplementado con harina de quinua germinada de acuerdo al diseño experimental que consistió en dos formulaciones: Formulación 1 (F1) 15 g de harina de quinua germinada por cada 100 mL; y Formulación 2 (F2) 10 g de harina de quinua germinada por cada 10m mL. A ambas formulaciones les fueron agregados los aditivos (5 g miel de agave y 1.5 mL de extracto de vainilla). Como control (FC) fue usada una bebida a base de suero dulce con 10 g de harina de trigo integral por 100 mL de bebida y

endulzada con 5 g de miel y saborizada con 1 mL de extracto de vainilla.

Los análisis fisicoquímicos (grados Brix (°Bx), acidez titulable (Acz) y determinación de pH) y análisis proximales fueron realizados a la formulaciones y control. La humedad fue determinada de acuerdo a la técnica descrita en la NMX-F-083-1986; las cenizas por el método descrito en la NMX-F-607-NORMEX-2020; la proteína fue determinada con la técnica descrita en la NMX-F-68-S-1980, utilizando el equipo Kjeldahl (NOVATECH, KJ6-C); la determinación de grasa con la técnica de la NMX-F-615-NORMEX-2018, utilizando el equipo Soxhlet (NOVATECH, VH-6P); y fibra de acuerdo a la NOM-F-90-S-1978. Finalmente, la determinación de actividad antioxidante fue determinada por los métodos de DPPH, FRAP y Folin-Ciocalteu (Alvarez-Jubete et al., 2010; Benzie y Strain, 1999).

El análisis estadístico fue realizado con el software SAS 9.4 de acuerdo a un diseño completo al azar donde las fuentes de variación son las formulaciones F1, F2 y FC; después del ANOVA fue realizada una comparación de medias por la prueba de Tukey, ambas con un valor de $P < 0.05$.

3. Resultados

De acuerdo a la NOM-091-SSA1-1994 establece que los coliformes totales deben ser menores a 20 UFC/mL y los mesófilos aerobios deben estar por debajo de las 30,000 UFC/mL, durante el análisis microbiológico del suero de leche se encontró que la cantidad de mesófilos anaerobios fue de 60 UFC/mL y la de coliformes totales es igual a 20 UFC/mL. Las Tablas 1 y 2, se presenta la comparación de medias de los análisis fisicoquímicos y proximales de las formulaciones. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, todas las formulaciones mostraron valores de pH con diferencia estadísticamente significativa entre ellas y con el control, los valores de pH son similares a los reportados por Kaur & Tanwar (2016). Mientras que en °Bx y acidez las formulaciones F1 y F2 no presentan diferencia significativa entre ellas, pero sí respecto al control. Al agregar harinas o extractos de harinas de cereales germinados y sin germinar los valores de pH suben y los valores de ácido titulado decrecen (Ujiroghene et al., 2019), el uso de harina de quinoa como sustrato para la elaboración de yogurt con base vegetal aminoró la tasa de acidificación, quizá por no ser la quinoa un buen sustrato para las bacterias ácido lácticas usadas (Huang et al., 2022).

Tabla 1. Efecto de la adición de quinoa germinada sobre las propiedades fisicoquímicas de la bebida a base de suero de leche.

	pH	° Brix	Acidez
F1	6.12 ^c	3.77 ^b	0.013 ^b
F2	6.22 ^b	3.70 ^b	0.010 ^b
FC	6.32 ^a	11.02 ^a	0.024 ^a

Los valores representan la media de 3 réplicas y para la acidez los valores son porcentaje de ácido málico por 100 g. Los valores con letra diferente en la columna indican diferencia significativa en la prueba de Tukey con $P < 0.05$.

Tabla 2. Análisis de la composición proximal en las formulaciones de la bebida a base de suero de leche y quinoa fermentada.

	Humedad	Cenizas	Grasa	Fibra	Proteína	Carbohidratos
F1	75.84 ^b	0.70 ^a	2.55 ^b	2.81 ^b	8.71 ^{ba}	9.37 ^a
F2	77.92 ^b	0.64 ^a	2.29 ^b	3.46 ^a	9.30 ^a	6.38 ^b
FC	83.64 ^a	0.50 ^b	4.74 ^a	0.42 ^c	7.81 ^b	2.86 ^c

Los valores representan la media de 3 réplicas y están expresados como porcentaje respecto de 100 g en base húmeda de muestra. Los valores con letra diferente en la columna indican diferencia significativa en la prueba de Tukey con $P < 0.05$.

Las formulaciones, en general, registraron valores más altos de cenizas, fibra, proteína y carbohidratos en comparación con el control, mientras que los valores de humedad y grasa fueron más bajos en F1 y F2 que en el control. En los alimentos, la cantidad de cenizas nos da una idea de la proporción de minerales que pueden

aportar a la dieta, en este sentido, ambas formulaciones fueron superiores al control comercial usado como testigo, esta diferencia es debida al aporte de la quinoa germinada, en grano o germinada, la quinoa contiene minerales que pueden ser asimilados por el consumidor (Fernandes et al., 2018). El contenido de grasa en

ambas formulaciones fue menor que el control, esto puede explicarse por el periodo de 48 horas de germinación al que fue sometida la quinoa, en alimentos como la lenteja ha sido reportado que a medida que aumenta el tiempo de germinación la cantidad de grasa disminuye (Fouad y Rehab, 2015), a lo anterior también habría que sumar la cantidad de grasa que pudo haber sido retirada durante el proceso de filtración posterior a la pasteurización realizada al suero de leche durante la elaboración de la bebida. Huang et al. (2022) reportaron un porcentaje de 0.35 en una formulación a base de quinoa 1:7 (m/V) mientras que el valor en una bebida elaborada a base de leche de búfala usando quinoa como ingredientes alcanzó un valor de 3.95 y los valores reportados para el suero dulce, concentrados y aislados de proteína de suero de leche están dentro del intervalo de 1.07 a 6.25 (Paucar-Menacho et al., 2022; Huang et al., 2022), es decir, el aporte de grasa es relativamente igual o menor al de formulaciones estudiadas y algunas comerciales.

Durante la germinación, los numerosos cambios bioquímicos inducen en las semillas la degradación de macromoléculas como almidón y proteínas de reserva,

esta degradación da lugar a un incremento en la concentración de proteína compuestos fenólicos y fibra dietética (Pilco-Quesada et al., 2020), esto es la fuente de fibra que se registró en mayor concentración en la formulación respecto de la bebida testigo. Pilco-Quesada et al., 2020) reportaron un aumento del 100 % en el contenido de proteína en quinoa a las 48 horas de germinación, mientras que los valores de proteína en el suero dulce es de 12.98 g en base seca y en bebidas solo a base de suero dulce diluido con 9% de saborizante natural a base de agua fue 0.535 g/mL; en este trabajo ambas formulaciones con quinua son estadísticamente iguales. En relación a los carbohidratos, todas las muestras analizadas son diferentes, el valor más alto registrado fue para la formulación con mayor contenido de quinua (F1, Tabla 2). Diferentes estudios del uso de quinoa germinada en algunos alimentos han demostrado el aumento del contenido de proteína y fibra, pero también el de los carbohidratos, esto puede explicarse a los periodos cortos de germinación utilizados en los trabajos, de 0 a 72 horas (Paucar-Menacho et al., 2022; Pilco-Quesada et al., 2020; Abo Ali et al., 2022).

Tabla 3. Determinación de actividad antioxidante en las formulaciones de la bebida.

	DPPH ($\mu\text{M ET/mL}$)	FRAP ($\mu\text{M ET/mL}$)	FENOLES (EAG mg/mL)
F1	229.88 ^a	557.63 ^{ab}	1687.05 ^b
F2	75.08 ^b	641.67 ^a	1996.64 ^b
FC	136.61 ^b	423.91 ^b	3233.4 ^a

Los valores representan la media de 3 réplicas. Los valores con letra diferente indican la diferencia significativa en la prueba de Tukey con $P < 0.05$. columna

La actividad antioxidante de las formulaciones es presentada en la Tabla 3, donde se puede observar que la formulación F1 mostró la mayor actividad antioxidante (229.88 $\mu\text{M ET/mL}$) respecto a la F2 y al control (C), que no registraron diferencia significativa. En el caso de FRAP, no hubo diferencias significativas entre las formulaciones, pero sí respecto del testigo, en FRAP el valor más alto registrado fue para la F2 mientras que el C, al igual de en DPPH, registró el valor más bajo. Al analizar la cantidad de fenoles (Tabla 3), es claro que el mayor contenido lo tiene la bebida C con 3233 mg EAG/mL y no fue observada diferencia significativa entre las formulaciones, ambas con menor concentración de fenoles respecto a C. A pesar de mostrar el valor más alto en concentración de fenoles la bebida C arrojó los valores más bajos de actividad

antioxidante en ambas pruebas, es muy probable que la actividad de los fenoles, correspondientes al trigo, fue afectada por el proceso de elaboración de la bebida (López-Martínez et al., 2017). Por otra parte, la actividad antioxidante registrada para las formulaciones en gran medida puede atribuirse al suero de leche, pues se ha demostrado que los líquidos biológicos contienen moléculas y compuestos capaces de neutralizar los radicales libres (Shahidi y Zhong, 2015).

4. Conclusiones

En esta propuesta para el desarrollo de bebidas a base de un subproducto de la industria láctea, suero de leche, suplementado con quinoa, se demostró que las formulaciones a base de suero con quinoa tienen mejores características nutricionales, en función del

contenido más alto de cenizas (aporte de minerales), fibra y proteína respecto al control. Una desventaja es la concentración alta de carbohidratos que estuvieron presentes en mayor concentración en las bebidas que contenían quinoa, sin embargo, parte de estos carbohidratos funcionan como prebióticos. Otra característica importante es la actividad antioxidante de la bebida, que incrementó al aumentar el contenido de quinoa germinada, característica buscada en alimentos funcionales. Los resultados aportan conocimiento para el desarrollo de bebidas a base de suero de leche que mejoran al complementar con otros ingredientes como la quinoa.

Referencias

- Abo Ali, G., El-Dardiry, A. & El-Rhmany, A. (2022). Study of the chemical, rheological, functional, microstructure, microbial, and sensory properties of Kareish cheese fortified with germinated quinoa seeds and processed using ultrasound technology. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(11), 515-529.
- Alvarez-Jubete, L., Wijngaard, H., Arendt, E. & Gallagher, E. (2010). Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chemistry*, 119, 770 - 778.
- Benzie, I. & Strain, J. (1999). Ferric reducing (antioxidant) power as a measure of antioxidant capacity: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70 - 76.
- Bhinder, S.K. (2021). Impact of germination on phenolic composition, antioxidant properties, antinutritional factors, mineral content and Maillard reaction products of malted quinoa flour. *Food Chemistry*, 346, 128915.
- Bianchi, F., Rossi, E., Gomes, R. & Sivieri, K. (2015). Potentially synbiotic fermented beverage with aqueous extracts of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and soy. *Food Science and Technology International*, 21(6), 401-415.
- Campos-Rodriguez, J., Acosta-Coral, K., & Paucar-Menacho, L.M. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 209-220.
- Chacón-Gurrola, L.R., Chávez-Martínez, A., Rentería-Monterrubio, A.L. & Rodríguez-Figueroa, J.C. (2017). Proteínas del lactosuero: usos, relación con la salud y bioactividades. *Interciencia*, 712-718.
- Darwish, A.M., Al-Jumayi, H.A., & Elhendy, H.A. (2021). Effect of germination on the nutritional profile of quinoa (*Cheopodium quinoa* Willd.) seeds and its anti-anemic potential in Sprague-Dawley male albino rats. *Cereal Chemistry*, 98(2), 315-327.
- Diario Oficial de la Federación (1979). NOM-F-90-S-1978. Determinación de Fibra Cruda en Alimentos.
- Diario Oficial de la federación (1980). NOM-F-68-S-1980. Alimentos Determinación de Proteínas.
- Diario Oficial de la Federación (1986). NMX-F-083-1986. Determinación de humedad en productos alimenticios.
- Diario Oficial de la Federación (1994). NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.
- Diario Oficial de la Federación (2019). NMX-F-615-NORMEX-2018. Determinación de extracto etero (método soxhlet) en alimentos.
- Diario Oficial de la Federación (2022). NMX-F-607-NORMEX-2020. Determinación de cenizas en alimentos.
- Fernandes, C., Sonawane, K.S., & Arya, S.S. (2018). Cereal based functional beverages: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 8(3), 914-919.
- Fouad, A. A. and Rehab, F. M. A., (2015) (233–246), Effect of germination time on proximate analysis, bioactive compounds and antioxidant activity of lentil (*Lens culinaris* Medik.) sprouts. *Acta Scientiarum Polonorum - Technologia Alimentaria*, 14(3), 233-246
- Franco, W., Evert, K., & Van Nieuwenhove, C. (2021). Quinoa flour, the germinated grain flour, and sourdough as alternative sources for gluten-free bread formulation: Impact on chemical, textural and sensorial characteristics. *Fermentation*, 7(3), 115.
- Huang, K., Liua, Y., Zhang, Y., Cao, H., Luo, D.-k., Yi, C. & Guan, X. (2022). Formulation of plant-based yoghurt from soybean and quinoa and evaluation of physicochemical, rheological, sensory and functional properties. *Food Bioscience*, 49, 101831.
- Huraca-Aparco, R., Tapia-Tadeo, F., Kari-Ferro, A. & Alvarez-Arias, C. (2021). Contenido mineral y

- proteína en germinados de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *ALFA*, 517-520.
- Kaur, I. & Tanwar, B. (2016). Quinoa beverage: Formulation, processing and portential health benefits. *Romanian Journal of Diabetes Nutrition and Metabolic Diseases*, 23(2), 215 - 225.
- López-Martínez, L., Leyva-López, N., Gutiérrez-Grijalva, E. & Heredia, J. (2017). Effect of cooking and germination on bioactive compounds in pulses and their health benefits. *Journal of Functional Foods*, 38, 624-634.
- Nelson, K., Stojanovska, L., Vasiljevic, T. & Mathai, M. (2013). Germinated grains: a superior whole grain functional food? *Canadian Journal Physiology and Pharmacology*, 91, 429-441.
- Nowak, V., Du, J., & Charrondière, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food chemistry*, 193, 47-54.
- Padmashree, A.N. (2019). Effect of Germination on Nutritional, Antinutritional and Rheological. *Defence Life Science Journal*, 55-60.
- Paucar-Menacho, L.M., Schmiele, M., Lavado-Cruz, A.A., Verona-Ruiz, A.L., Mollá, C., Peñas, E., et al. (2022). Andean Sprouted Pseudocereals to Produce Healthier Extrudates: Impact in Nutritional and Physicochemical Properties. *Foods*, 11, 3259.
- Pilco-Quesada, S., Tian, Y., Yang, B., Repo-Carrasco-Valencia, R. & Soumela, J.-P. (2020). Effects of germination and kilning on the phenolic compounds and nutritional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 94, 102996.
- Repo-Carrasco-Valencia, R.A.-M., & Serna, L.A. (2011). Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 31(1), 225-230.
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2015). Measurement of antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 18, 757-781.
- Ujiroghene, O. J., Liu, L., Zhang, S., Lu, L., Zhang, C., Pang, X., & Lv, J. (2019). Potent α -amylase inhibitory activity of sprouted quinoa-based yoghurt beverages fermented with selected anti-diabetic strains of lactic acid bacteria. *RSC Advances*, 9, 9486-9493.

ARTÍCULO ARBITRADO: REVISIÓN

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO FUENTES DE COMPUESTOS ANTIOXIDANTES

Edith Estefanía Duarte Llanes¹ y Ana Angélica Feregrino Pérez^{2,}*

Resumen

Las agroindustrias producen miles de toneladas de residuos cada año, la gran mayoría de estos residuos presenta compuestos con actividades biológicas de interés. Este trabajo de investigación se centró en la búsqueda de la actividad antioxidante de cuatro residuos agroindustriales: suero de leche, bagazo de cerveza, nejayote y posos de café, en base a una revisión bibliográfica en la base de datos Science Direct. Las técnicas y métodos de extracción económicamente viables siguen en investigación, así como otras posibles propiedades como: actividad antimicrobiana, antiinflamatoria, antihipertensiva, etc., presentes dependiendo del residuo agroindustrial a evaluar. Se puede concluir que los residuos orgánicos como los que se mencionan son una fuente viable y sustentable de compuestos con características antioxidantes, que pueden ser empleados y reincorporados a los procesos productivos en diversas áreas como la alimentaria, agrícola, farmacéutica, entre otras.

Palabras Clave:

antioxidantes, residuos orgánicos, actividad biológica

Abstract

Agricultural industries produce thousands of tons of waste each year, the vast majority of this waste presents compounds with biological activities of interest. This research work focused on the search for the antioxidant activity of four agro-industrial wastes: whey, beer bagasse, nejayote, and coffee grounds. Although, economically viable extraction techniques and methods are still under investigation, as well as the use of other properties such as antimicrobial, anti-inflammatory, antihypertensive activity, etc., present depending on the agro-industrial waste to be evaluated. It can be concluded that organic waste such as those mentioned is a viable and sustainable source of compounds with antioxidant characteristics, which can be used and/or reincorporated into production processes in various areas such as food, agriculture, and pharmaceuticals, among others.

Keywords:

antioxidants, organic waste, biological activity

¹Instituto Tecnológico de Culiacán. Juan de Dios Bátiz No. 310 Pte., Col. Guadalupe, 80220, Sinaloa, México

²División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera Chichimequillas s/n km 1, El Marqués, Querétaro, 76265, México.

* Autor de correspondencia: feregrino.angge@hotmail.com

1. Introducción

El desarrollo industrial conlleva al incremento en generación de residuos los cuales se han convertido en una problemática tanto ambiental como económica para las empresas ya que éstas se deben responsabilizar de los altos costos que genera su disposición final (CCA, 2017). La industria busca nuevos procesos de producción que sean más eficientes y que generen bajo impacto en el medio ambiente. Dentro de estos nuevos procesos se ha encontrado la necesidad de disminuir la explotación de los recursos naturales aprovechando los residuos generados en la industria. Del mismo modo, el aprovechamiento de estos residuos o subproductos no solo contribuye a disminuir la explotación de recursos, sino también la contaminación y degradación del ecosistema, evitando una disposición final inadecuada como es el caso de las quemas, el uso en rellenos sanitarios o el vertimiento a fuentes hídricas (Corredor y Pérez, 2018).

Se ha encontrado que hay residuos agroindustriales que poseen compuestos fenólicos y un de las principales propiedades que presentan los estos compuestos es la actividad antioxidante. Esta actividad antioxidante está determinada por las siguientes características:

- Su reactividad como agente donador de electrones de hidrógeno. Esta propiedad está ligada al potencial de reducción que presentan.
- El destino del radical antioxidante. Éste vendrá dado por su capacidad para estabilizar y deslocalizar el electrón apareado.
- Su reactividad con otros antioxidantes.
- El potencial de transición del metal quelante.

Por otra parte, los procesos oxidativos han sido relacionados con diversas patologías asociadas a procesos degenerativos del sistema nervioso central (Sánchez-Valle y Méndez-Sánchez, 2018). A nivel alimentario la oxidación provoca deterioro de las propiedades organolépticas de un gran número de productos procesados, en especial a las grasas y los aceites. Con este conocimiento, diversos autores han dedicado esfuerzos por demostrar el potencial de algunos materiales subutilizados o de escaso interés comercial como lo son los residuos derivados

de procesos agroindustriales, como fuente de compuestos antioxidantes (Figura 1) (Sultana et al., 2008). Con base a lo anterior, este artículo trata de resumir la experiencia de varios autores y los aspectos más relevantes de la actividad antioxidante presente en residuos agroindustriales los cuales se seleccionaron en base a los siguientes criterios de inclusión : residuos agroindustriales derivados de procesos de mayor impacto económico en México en los últimos 10 años a la fecha, complejidad en el manejo de los residuos y análisis bibliográfico de aporte antioxidante en la base de datos de Elsevier®.

2. Suero de leche

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) se produjeron aproximadamente 150 millones de toneladas de residuos lácteos en 2019 (FAOStat, 2021). Los cuales por sus características son fuente de contaminación para suelos y mantos acuíferos (CCA, 2017).

El suero de leche es el residuo líquido generado en el proceso de elaboración de queso, el cual contiene aproximadamente 50% de los nutrientes presentes en la leche (Ponist et al., 2021). Es un subproducto poco aprovechado en México, incluso se le considera un problema ambiental potencial ya que constituye una importante fuente de contaminación ambiental debido al alto contenido de materia orgánica, lo cual expresado como DBO (demanda biológica de oxígeno) está entre 30.000 y 50.000 mg/L y como DQO (demanda química de oxígeno) entre 60.000 y 80.000 mg/L (Ramírez, 2017). Además, cerca del 90% de esta carga es aportada por el contenido de lactosa, la cual posee un tipo de enlace entre sus azúcares componentes que hace que muchos microorganismos no sean capaces de degradarla. El vertimiento del lactosuero en fuentes hídricas hace que el agua se quede sin oxígeno, debido a la acción microbiana que transforma la materia orgánica en compuestos que disminuyen el pH del agua trayendo como consecuencia la producción de malos olores y la muerte de los organismos acuáticos que allí se encuentren.

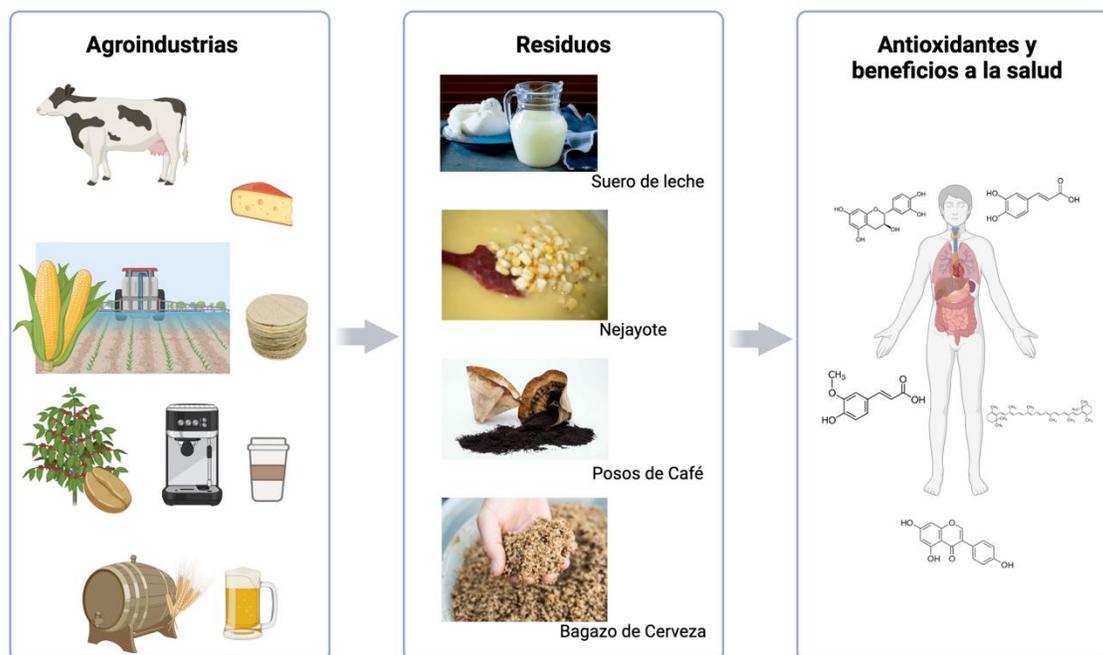


Fig. 1. Residuos obtenidos de industrias agroalimentarias con potencial antioxidante.

Este alto contenido de materia orgánica sumado al gran volumen de generación de lactosuero, que anualmente se incrementa en cerca del 3%, y también la incapacidad de las pequeñas y medianas empresas lácteas de aprovechar el lactosuero de una manera rentable, ocasionan que cerca del 50% de la producción mundial sea desechada como efluente a los recursos hídricos o a los sistemas de alcantarillado sin ningún tratamiento, lo que ubica al desecho de este material como una amenaza considerable para el medio ambiente (Ramírez, 2017).

Composición

En general, en todos los tipos de suero, la lactosa constituye el 75% de los sólidos, sin embargo, el resto de los sólidos representan una excelente fuente de proteínas, lípidos, vitaminas y minerales, cuya importancia ha sido reconocida en los últimos años (Ponist et al., 2021).

Entre las principales fracciones proteicas de la leche liberadas en el suero, se encuentran en mayor cantidad las proteínas globulares solubles β -lactoglobulina (β -LG) y β -lactoalbúmina (α -LA) en una relación 3:1 y como constituyentes menores

seroalbúmina, inmunoglobulinas, lactoferrina, proteasas-peptonas y transferrina (Bordin et al., 2001) en total ellas representan el 98% de la proteína soluble. Esto es equivalente a 6 g por cada kilogramo de leche completa, empleada en la fabricación de los quesos. En la actualidad la aplicación de procesos industriales actuales permite la recuperación de las proteínas y péptidos del suero, sin desnaturalizarlas y conservando su actividad biológica (Lemes et al, 2016).

Actividad antioxidante

Se ha demostrado que las proteínas, hidrolizados de proteínas, péptidos individuales y aminoácidos de suero de leche tienen importantes actividades antioxidantes. Son eficaces contra la peroxidación enzimática y no enzimática de lípidos y ácidos grasos esenciales como eliminadores de radicales libres y quelantes de iones metálicos. Las caseínas durante la hidrólisis por enzimas proteolíticas pueden liberar péptidos antioxidantes (Korhonen y Pihlanto, 2006). Adicionalmente, se han identificado péptidos derivados de la fermentación de la leche con capacidad secuestradora de radicales libres (Pihlanto,

2011). Hernández-Ledesma et al. (2005) identificaron un decapeptido (Trp-TyrSer-Leu-Ala-Met-Ala-Ser-Asp-Ile) que tiene mayor actividad secuestradora de radicales que el butil-hidroxi-anizol, que es un poderoso antioxidante. Estudios previos reelaron que la proteína láctica, κ -caseína, puede liberar péptidos antioxidantes a partir de la fermentación de leche por bacterias ácido-lácticas como *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* (Kudoh et al., 2001).

La aplicación de procesos industriales actuales permite la recuperación de las proteínas y péptidos del suero, sin desnaturalizarlas y conservando su actividad biológica. Algunos de los procesos unitarios empleados para la concentración, transformación, fraccionamiento y deshidratación del suero incluyen: 1) técnicas de electrodiálisis y nanofiltración para su desmineralización y aplicación como ingrediente en formulaciones especiales infantiles y para pacientes clínicos; 2) otros procesos de membrana, incluyendo microfiltración y ultrafiltración, para el desarrollo de ingredientes funcionales de suero, altos en proteínas y bajos en grasa, y 3) diversos procesos de secado (Smithers, 2008; Ahlawat et al., 2022). La composición del producto final dependerá de la tecnología empleada en la concentración de las proteínas del suero.

3. Bagazo de cerveza

El bagazo de cerveza o residuo de malta de cerveza (RMC) es un residuo sólido insoluble obtenido del proceso de fabricación de la cerveza. Representa el 85% de los subproductos generados, siendo el mayor subproducto de la industria cervecera. A pesar de ser un producto fácilmente aprovechable, el sector no le ha prestado atención de forma que se usa tradicionalmente de alimento para animales (Cerisuelo y Bacha, 2021).

En las primeras etapas del proceso de producción de la cerveza, la cebada recogida de la cosecha se limpia y clasifica en tamaños. Se deja almacenada por 4-6 semanas y después se somete a un proceso de malteado, que es un proceso de germinación el cual sirve para aumentar el contenido enzimático del grano. En la fábrica de cerveza, la malta se muele y se mezcla con agua en un macerador, aumentando gradualmente su temperatura de 37 a 78°C, de forma que así se promueve la hidrólisis enzimática de los constituyentes de la malta, mayoritariamente del almidón, pero también de otros componentes como las proteínas, β -glucanos y xilosas de forma que se

solubilizan en el agua sus productos de ruptura. Durante el proceso de hidrólisis, el almidón se convierte en azúcares fermentables, (principalmente maltosa y maltotriosa) y azúcares no fermentables (dextrinas), y las proteínas son degradadas a polipéptidos y aminoácidos. Esta conversión enzimática llamada maceración produce un líquido de sabor dulce llamado mosto. La parte insoluble, formada por la malta, se asienta formando una cama en el macerador y se utiliza para filtrar el mosto. El mosto filtrado se usa como medio de fermentación para producir cerveza y a la fracción sólida residual resultante del grano de cebada malteado se le denomina bagazo de cerveza o RMC (Nigam, 2017). El RMC conseguido presenta un importante potencial de valorización debido a su composición rica en proteínas, carbohidratos y compuestos fenólicos, entre otros.

El RMC representa el 31% del peso de malta inicial y se obtienen 20 kg de RMC por cada 100 litros de cerveza producida. En 2018, se produjeron 11,980 millones de litros de cerveza, generando 2.3 millones de RMC. En las últimas dos décadas, el RMC ha ido ganando la atención para el consumo humano debido a sus componentes bioactivos y sus efectos beneficiosos para la salud.

Composición

El RMC está compuesto mayoritariamente por la cáscara del grano, y pequeñas fracciones de pericarpio y del recubrimiento de la semilla (Cerisuelo y Bacha, 2021), compuesto por lignina, celulosa, hemicelulosa, lípidos y proteínas. El RMC es un material lignocelulósico ya que la celulosa (un homopolímero formado por unidades de glucosa), hemicelulosa y lignina (una macromolécula de polifenoles) forman casi el 50% en peso del RMC.

Actividad antioxidante

El RMC contiene diferentes tipos de compuestos fenólicos. Entre estos compuestos fenólicos tienen un gran interés las especies antioxidantes. Dentro de este grupo los compuestos más abundantes son los ácidos hidroxicinámicos y los flavonoides. Entre los ácidos destacan el ferúlico y el p-coumárico (García Paz, M. 2017), aunque también aparecen los ácidos: gálico, cafeico y sinápico. La acción de estos ácidos es actuar como antioxidantes atrapando los radicales libres. Por su parte, los flavonoides mayoritarios en este tipo de compuestos son la catequina y la quercetina, los

cuales se encargan de eliminar esos radicales libres (Nieto Sanz, 2019).

Durante el proceso de elaboración de cerveza, parte de estos compuestos pasan al mosto junto con los azúcares de la malta. Sin embargo, una fracción se retiene en el grano, de manera que el residuo obtenido disminuye su peso respecto a la malta original y presenta una concentración mayor que ésta en compuestos fenólicos. Por lo tanto, actualmente se obtienen antioxidantes naturales y alternativa a antioxidantes sintéticos debido a que en la cáscara de los granos de cebada se encuentran distintos compuestos antioxidantes que se pueden extraer y utilizar como tal (Mussatto, 2014). Los compuestos fenólicos se encuentran situados en la cáscara de los granos de RMC, lo que constituye la matriz sólida. Utilizando un disolvente adecuado se consigue separar dichos compuestos de la matriz para su posterior aprovechamiento. Por ello, el tipo de extracción que se realizará será una extracción sólido-líquido. Existen diferentes métodos para llevar a cabo este tipo de extracción. Por un lado, están las técnicas convencionales S/L, entre las que se encuentran la extracción con un disolvente o la extracción Soxhlet. Por otro lado, han aparecido técnicas de extracción más avanzadas que podrían servir para cumplir este objetivo, como son la extracción microondas asistida, la extracción por ultrasonido, y la extracción con fluidos supercríticos. También es de interés nombrar los principales parámetros que influyen en este proceso: tipo de compuesto a extraer, tipo de disolvente empleado, tamaño de partículas sólidas, relación S/L, temperatura, presión, y la presencia de otras sustancias presentes en la materia prima que puedan interferir (Cornejo Badillo y Huaranga Benavides, 2022; Matiacevich et al., 2023).

4. Nejayote

Uno de los alimentos básicos en México es el maíz, principalmente consumido en forma de tortillas, datos del Consejo Empresarial de la Industria del Maíz revelan que en el país se producen anualmente entre 7.5 y 8.0 millones de toneladas de éstas en molinos de nixtamal; para lo que es necesario procesar 3.5 millones de toneladas de maíz. La nixtamalización es parte de este proceso y se refiere a la cocción alcalina de los granos de maíz, mediante la cual se mejoran las características nutricionales, fisicoquímicas y sensoriales de las tortillas.

Para la nixtamalización, usualmente, por cada kilogramo de granos de maíz se emplean dos a tres litros de solución alcalina de hidróxido de calcio (cal) a una concentración aproximada de 1% y se calienta hasta alcanzar una temperatura entre 90-100 °C durante un lapso de 30 a 60 minutos. Después, se corta el suministro de calor y se deja reposar 12-14 horas (Paredes López et al., 2009).

En la modalidad industrial, la masa se seca y muele para producir harina, (Valderrama-Bravo et al., 2012). Aproximadamente un 30% del agua empleada en la cocción es absorbida por el maíz, el líquido restante, llamado nejayote, es el subproducto de la nixtamalización. El nejayote se caracteriza por contener altos valores de pH, temperatura y materia orgánica proveniente del propio maíz (Téllez-Pérez et al., 2018). Se considera como altamente contaminante debido a: su alta demanda biológica de oxígeno (2,692-7,875 mg O₂/L), alta demanda química de oxígeno (10,200-22,000 mg O₂/L) y pH básico (10.5-11.2). El material soluble está formado por hidrolizados de los carbohidratos del grano de maíz, sales de calcio y sales de ácidos fenólicos, mientras que la materia insoluble corresponde a los residuos del tejido del pericarpio del maíz (Acosta-Estrada et al., 2014).

Calculando que una planta con una capacidad de 600 toneladas de maíz por día genera entre 1,500 y 2,000 m³ de nejayote. Consecuentemente considerando que el grano de maíz absorbe del 14 al 48% del agua utilizada durante el proceso de la nixtamalización, el volumen estimado de nejayote que se produce en México es de 1.2 millones de m³ por día (Valderrama-Bravo et al., 2012). Si bien el nejayote es calificado como un efluente altamente contaminante, puede ser considerado también como una fuente importante de compuestos de alto valor, como el ácido ferúlico y otros compuestos fenólicos, compuestos con valor comercial, como las hemicelulosas y productos con valor estratégico, como el agua para reuso, un bien cada vez más escaso (Acosta-Estrada et al., 2014; Ayala-Soto et al., 2014).

Composición

La composición del nejayote tiene rangos de variación amplios ya que se ve afectada por diferentes variables como: tipo de maíz, dureza del endospermo, calidad del grano, tipo y concentración de cal, tiempo y temperatura de cocimiento y remojo, manejo del maíz

durante su lavado y transporte, equipo y prácticas de proceso (Ramírez-Romero et al., 2013).

El material contenido en el Nejayote está compuesto principalmente por residuos de pericarpio de maíz, sólidos en solución entre los que se incluyen arabinosilanos, almidones, dextrinas, calcio y compuestos fenólicos antioxidantes, como el ácido p-cumárico y el ácido ferúlico, por citar algunos (García-Zamora et al., 2015).

Actividad antioxidante

El ácido ferúlico está presente en el Nejayote debido a que, tras el proceso de cocción alcalina, se hidroliza de la pared celular del pericarpio del grano de maíz, quedando libre en el licor de desecho del proceso industrial. El ácido ferúlico es un compuesto muy valioso con alto potencial industrial por su carácter antioxidante (Pacheco, 2019).

El ácido ferúlico y sus derivados son miembros reconocidos del grupo de antioxidantes fenólicos naturales. Estudios clínicos y epidemiológicos han mostrado evidencias de que los antioxidantes fenólicos de cereales, frutas y vegetales son los principales factores que contribuyen en la disminución de la incidencia de enfermedades crónicas y degenerativas encontradas en poblaciones cuyas dietas son altas en el consumo de estos alimentos.

Debido a su núcleo fenólico y a la conjugación de su cadena lateral, forma fácilmente un radical fenoxi estabilizado por resonancia que representa su potencial antioxidante. La absorción de radiación UV por el ácido ferúlico cataliza la formación de radicales fenoxi estables y con ello potencia su capacidad de terminar reacciones de radicales libres. El ácido ferúlico desarrolla una función antioxidante importante en la preservación de la integridad fisiológica de las células expuestas al aire y la radiación UV. Como aplicaciones del potencial antioxidante del ácido ferúlico a nivel industrial puede hablarse de aditivos en la industria de alimentos, tanto para la preservación de los mismos como para elaborar alimentos funcionales preventivos de enfermedades degenerativas. En los alimentos, el ácido ferúlico inhibe la peroxidación lipídica y el deterioro posterior oxidativo.

5. Posos de café

El grano de café es el producto agrícola utilizado para producir una de las bebidas más consumidas a nivel mundial. La cual es muy apreciada por su aroma, sabor y propiedades estimulantes debido a su

contenido en cafeína. La industria cafetalera está en constante expansión, en 2018 se reportó una producción de café de 9,542 t y la producción sigue en incremento a la par de la producción de residuos de café (Yun et al., 2020).

Aunque parte de estos residuos han encontrado una utilidad comercial como fertilizantes agrícolas, la mayoría termina tirándose en un vertedero. Las cafeteras de filtro y expreso, presentes en los hogares y en las cafeterías y restaurantes, fomentan que en el poso se acumulen antioxidantes que se podrían extraer para fabricar suplementos dietéticos. Además, eso no impediría que el resto del café molido siguiera empleándose para fertilizar los cultivos. (Martínez-Cruz, 2023). Estos residuos no tienen valor comercial y generalmente se eliminan; sin embargo, son fuente de compuestos con actividad biológica como lo son los compuestos fenólicos y la fibra dietaria, la cual representa el 47% de su composición. Adicionalmente, la fibra dietética obtenida de los posos de café fue aceptada por la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria como ingrediente para consumo humano en 2021, dado que su aplicación contribuye a reducir el riesgo de enfermedades crónicas, además de contribuir a la seguridad nutricional con arreglo en la filosofía de cero desperdicios. Por otra parte, la eliminación de los posos de café, se debe realizar mediante un tratamiento adecuado ya que su alto contenido y la presencia de compuestos tales como cafeína, taninos y polifenoles pueden tener efectos negativos sobre el medio ambiente. Por estas razones, recientemente se ha incrementado el interés en la reutilización de estos residuos (Pandey et al., 2000; Garcés Valledapaz, 2022).

Como se ha mencionado, los residuos de café se consideran ricos en nutrientes bioactivos. Por lo que este material representa una fuente alternativa para obtener antioxidantes naturales, considerándose completamente seguros en comparación con los sintéticos (Garcés Valledapaz, 2022).

Composición

Los posos de café tienen sorprendentes propiedades saludables, pues son ricos en fibra y contienen un alto porcentaje de compuestos fenólicos, se estima que los posos de café que se desechan cada día tienen una capacidad antioxidante 500 veces superior a la de la vitamina C, además de ser fuente de melanoidinas. Los posos de café contienen compuestos que dan al café su característico color pardo y que también son

conocidos por su alta capacidad antioxidante, además de otras propiedades biológicas interesantes para los humanos (Arya et al., 2022).

Actividad antioxidante

En un estudio realizado por Panusa et al. (2013), los posos de café gastados (SCG) se extrajeron con un procedimiento respetuoso con el medio ambiente y se analizaron para evaluar la recuperación de antioxidantes naturales relevantes para su uso como suplementos nutricionales, aditivos alimentarios o cosméticos. Los SCG se caracterizaron en términos de su contenido fenólico total mediante el procedimiento de Folin-Ciocalteu y la actividad antioxidante mediante el ensayo de eliminación de DPPH. El contenido de flavonoides también se determinó mediante un ensayo colorimétrico. El contenido fenólico total se correlacionó fuertemente con la actividad depuradora de DPPH, lo que sugiere que los compuestos fenólicos son los principales responsables de la actividad antioxidante de SCG. Se utilizó un sistema UHPLC-PDA-TOF-MS para separar, identificar y cuantificar compuestos fenólicos y no fenólicos en los extractos de SCG. Importantes cantidades de ácidos clorogénicos y compuestos relacionados, así como cafeína evidenciaron el alto potencial del SCG, un material de desecho que está ampliamente disponible en el mundo, como fuente de antioxidantes fenólicos naturales.

En conclusión, todos los resultados muestran que los posos de café son una fuente accesible y sostenible de compuestos bioactivos con potenciales beneficios para la salud, por lo que podrían ser utilizados como ingredientes en alimentos funcionales (Panusa et al., 2013)

6. Perspectivas

La mayoría de las industrias generan residuos con impactos negativos o positivos en el medio ambiente, dependiendo del aprovechamiento de estos. Son pocas las investigaciones desarrolladas para aportar alternativas de aprovechamiento que procurarían una solución a la problemática generada: dar un valor agregado a estos residuos con beneficios en un máximo rendimiento, alcanzar una reducción en la contaminación y generar ganancias económicas. Los residuos agroindustriales presentan un alto potencial de aprovechamiento gracias a su variada composición química, y esto es reflejado en la diversidad de alternativas existentes para su reutilización.

En la actualidad, las investigaciones son continuas para encontrar compuestos bioactivos en diversos residuos de las industrias con actividad antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria, antihipertensiva, entre otros. Esto con el fin de un aprovechamiento y conversión en un beneficio para la sociedad. También, por otro lado, se investigan técnicas y métodos viables económicamente para la extracción de estos compuestos que sean amigables con el medio ambiente, como lo son las extracciones verdes (reducción de solventes con impacto ambiental), uso de técnicas de extracción con acarreadores no contaminantes (Fluidos Supercríticos), empleo de equipo que optimice el proceso (Microondas), entre otros. Sin embargo, no siempre se tienen acceso a dicho equipamiento, además de que los rendimientos de extracción no son tan eficientes encareciendo al compuesto en comparación a las técnicas tradicionales, porque aún es necesario explorar más en esta área.

7. Conclusión

Los residuos orgánicos de diversos procesos agroalimentarios como los mencionados en el presente escrito, son una fuente viable y sustentable de compuestos con características antioxidantes, que pueden ser empleados y reincorporados a los procesos productivos en diversas áreas como la alimentaria, agrícola, farmacéutica, etc.

Nomenclatura

DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidracilo
RMC	Residuo de Malta de Cerveza
SCG	Posos de Café Gastado

Referencias

- Acosta-Estrada, B.A., Lazo-Vélez, M.A., Nava-Valdez, Y., Gutiérrez-Urbe, J.A., & Serna-Saldivar, S. O. (2014). Improvement of dietary fiber, ferulic acid and calcium contents in pan bread enriched with nejayote food additive from white maize (*Zea mays*). *Journal of Cereal Science*, 60(1), 264-269.
- Ahlatw, A., Basak, S., & Ananthanarayan, L. (2022). Optimization of spray-dried probiotic buttermilk powder using response surface methodology and evaluation of its shelf stability. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), e16928.

- Arya, S.S., Venkatram, R., More, P.R., & Vijayan, P. (2022). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 429-444.
- Ayala-Soto, F.E., Serna-Saldívar, S.O., García-Lara, S., & Pérez-Carrillo, E. (2014). Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources. *Food Hydrocolloids*, 35, 471-475.
- Bordin, G., Raposo, F.C., De la Calle, B., & Rodriguez, A.R. (2001). Identification and quantification of major bovine milk proteins by liquid chromatography. *Journal of chromatography A*, 928(1), 63-76.
- CCA. Comisión para la Cooperación Ambiental. Caracterización y gestión de la pérdida y el desperdicio de alimentos en América del Norte (2017). Informe sintético, 52 pp.
- Cerisuelo, A., & Bacha, F. (2021). Materias primas: Bagazo de cerveza. *Nutrinews*, (Junio de 2021), 6-13.
- Cornejo Badillo, R.N., & Huaranga Benavides, B.P. (2022). Aplicación del CO₂ supercrítico en la extracción de compuestos bioactivos de interés comercial de residuos agroindustriales: Una Revisión Sistemática. Universidad César Vallejo, Perú.
- Corredor, Y.A.V., & Pérez, L.I.P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72. DOI: 10.37190/epe210405.
- FAOStat, 2021. <http://www.fao.org/faostat/en/#search/global%20milk%20production>
- Garcés Valledepaz, A. (2022). Revalorización del poso del café obteniendo ácido clorogénico y cafeína. Universidad de Lleida, España.
- García Paz, M. (2017). Los Residuos de cerveza como fuente de antioxidantes naturales. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- García-Zamora, J.L., Sánchez-González, M., Lozano, J.A., Jáuregui, J., Zayas T., Santacruz, V., Hernández, F. & Torres, E. (2015). Enzymatic treatment of wastewater from the corn tortilla industry using chitosan as an adsorbent reduces the chemical oxygen demand and ferulic acid content. *Process Biochem.* 50, 125-133. DOI: 10.1016/j.procbio.2014.10.012.
- Hernández-Ledesma, B., Miralles, B., Amigo, L., Ramos, M., & Recio, I. (2005). Identification of antioxidant and ACE-inhibitory peptides in fermented milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6), 1041-1048.
- Korhonen, H. & Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: production and functionality. *International Dairy Journal* 16, 945-960.
- Kudoh, Y., Matsuda, S., Igoshi, K., & Oki, T. (2001). Antioxidative peptide from milk fermented with *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* IFO13953. *Nippon Shokuhin Kagaku Kaishi*, 48(1), 44-55. DOI: 10.3136/nskkk.48.44.
- Lemes, A.C., Sala, L., Ores, J.D.C., Braga, A.R.C., Egea, M.B., & Fernandes, K.F. (2016). A review of the latest advances in encrypted bioactive peptides from protein-rich waste. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 950.
- Martínez Cruz, I. (2023). Cómo reutilizar los residuos de la industria del café a través de la economía circular. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Matiacevich, S., Soto Madrid, D., & Gutiérrez Cutiño, M. (2023). Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de residuos agroindustriales. *RIVAR (Santiago)*, 10(28), 77-100.
- Mussatto, S.I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275.
- Nigam, P.S. (2017). An overview: Recycling of solid barley waste generated as a by-product in distillery and brewery. *Waste management*, 62, 255-261.
- Pacheco, M.I. (2015). Obtención de ácido ferúlico a partir de un concentrado de la hidrólisis alcalina del maíz. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. México.
- Panusa, A., Zuorro, A., Lavecchia, R., Marrosu, G., & Petrucci, R. (2013). Recovery of natural antioxidants from spent coffee grounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(17), 4162-4168.
- Pandey, A., Soccol, C.R., Nigam, P., Brand, D., Mohan, R., & Roussos, S. (2000). Biotechnological potential of coffee pulp and

- coffee husk for bioprocesses, *Biochemical Engineering Journal*, 6(2), 153-162.
DOI: 10.1016/S1369-703X(00)00084-X.
- Paredes López, O., Guevara Lara, F., & Bello Pérez, L.A. (2009). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias*, 92(092).
- Pihlanto, A. (2011). Whey proteins and peptides: Emerging properties to promote health. *Nutrafoods*, 10, 29-42.
- Ponist J., Samesova D., Schwarz M. (2021) Methods of processing whey waste from dairies: a review. *Environ. Prot. Eng.* 47, 67-84.
DOI: 10.37190/epe210405.
- Ramírez-Romero, G., Reyes-Velázquez, M. & Cruz-Guerrero, A. (2013). Estudio del nejayote como medio de crecimiento de probióticos y producción de bacteriocinas. *Rev. Mex. Ing. Quím.* 12(3), 463-471.
- Ramírez, I. (2017). Efecto del ultrasonido aplicado al suero de leche previo al calentamiento en la elaboración de requesón. *Interciencia*, 42(12), 828-833.
- Sánchez-Valle, V., & Méndez-Sánchez, N. (2018). Estrés oxidativo, antioxidantes y enfermedad. *Médica Sur*, 20(3), 161-168.
- Smithers, G.W. (2008). Whey and whey proteins— From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
- Sultana, B., Anwar, F., Asi, M.R., & Chatha, S.A.S. (2008). Antioxidant potential of extracts from different agro wastes: Stabilization of corn oil. *Grasas y Aceites*, 59(3), 205-217.
- Téllez-Pérez, V., López-Olguín, J.F., Aragón, A., & Zayas-Pérez, M.T. (2018). Lodos residuales de nejayote como sustratos para la germinación de semillas de maíz azul criollo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 395-404.
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J.C., Rojas-Molina, A., et al. (2012). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 478-486.
- Yun, B.Y., Cho, H.M., Kim, Y.U., Lee, S.C., Berardi, U., & Kim, S. (2020). Circular reutilization of coffee waste for sound absorbing panels: A perspective on material recycling. *Environmental Research*, 184, 109281.

ARTÍCULO ARBITRADO: REVISIÓN

TÉCNICAS DE FORMACIÓN DE ALMIDÓN RESISTENTE PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: UNA REVISIÓN

María Guadalupe Hernández-Ángel y Ahuizolt Joaquín-Ramos*

Resumen

Las modificaciones al almidón de diferentes alimentos producen almidón resistente (AR), el cual adquiere características fisicoquímicas y reológicas propias de un aditivo para la industria alimentaria. Esta revisión concentra información relevante de algunas técnicas más empleadas en la formación de almidón resistente a partir de diversas fuentes. Entre estas técnicas de formación, la modificación química del almidón es una de las usadas, aún hoy en día, en general se pretende cambiar los grupos -OH del almidón por otros grupos funcionales y evaluar el efecto sobre las propiedades del almidón. El almidón modificado es empleado en la elaboración de fideos, alimentos enlatados y congelados, y en la elaboración de natillas. El uso de enzimas es otra técnica empleada para modificar el almidón, donde las enzimas atacan la región amorfa de los gránulos de almidón y aumentan la región cristalina que induce cambios en las propiedades fisicoquímicas del almidón. El contenido de AR dependerá de la modificación aplicada en los almidones, así como sus diversas propiedades tecnológicas funcionales.

Palabras clave:

cereales, tubérculos, modificación química, modificación enzimática, flavonoides y fenoles

Abstract

Modifications to the starch of different foodstuffs generally yield resistant starch, which acquires particular physicochemical and rheological characteristics similar to a food industry additive. This review concentrates relevant information on some of the most commonly used techniques in the formation of resistant starch from various sources. Among these formation techniques, the chemical modification of starch is one of them, nowadays, in general, it is intended to change the -OH groups of starch with other functional groups and evaluate the effect on the properties of the starch, the modified starch is used in the preparation of noodles, canned and frozen foods, and the preparation of custard. The use of enzymes is another technique to modify starch, where the enzymes usually attack the amorphous region of the starch granules, increase the crystalline region, and induce changes in the physicochemical properties of starch. The resistant starch content will depend on the modification applied to the starches, as well as their various functional technological properties.

Keywords:

cereals, tubers, chemical modification, enzymatic modification, flavonoids and phenols

Departamento de ingenierías, Tecnológico Nacional de México/I. T. de Roque. km.8 carretera Celaya-Juventino Rosas, A.P. 508, C.P. 38110, Roque, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor por correspondencia: ahuizolt.jr@roque.tecnm.mx

1. Introducción

El almidón es ampliamente utilizado en la industria alimentaria como agente espesante, estabilizante de espuma, gelificante, aglutinante e incluso como aditivo. El maíz es la principal fuente de almidón seguido por la papa, el trigo, arroz y yuca, el almidón de estas fuentes ha sido empleado en su conformación nativa y modificada y ha hecho de estos cultivos el foco de muchas investigaciones relacionadas con la modificación del almidón (Agama-Acevedo et al., 2019). No obstante, la funcionalidad en almidones nativos no siempre es la adecuada, por lo que se ha recurrido a modificaciones físicas, químicas, enzimáticas y genéticas para mejorar su funcionalidad y estabilidad como aditivo en los alimentos (Kaur y Gill, 2019). Estas técnicas incluyen el reemplazamiento de grupos -OH con grupos funcionales, como el succinil o fosfato, y la degradación o modificación del contenido de amilosa y amilopectina bajo el uso de enzimas (Abbas et al., 2010).

Las modificaciones impactan en las propiedades de las soluciones de almidón y las características fisicoquímicas, como la retención de agua, aceite, sinéresis, viscosidad y características termodinámicas involucradas en las propiedades de amasado (Sandhu & Siroha, 2017). En este contexto, el presente trabajo recaba información relevante sobre las técnicas empleadas en la modificación del almidón, su caracterización fisicoquímica e instrumental y reología de disoluciones de almidón modificado para proponer su uso como aditivo en diferentes productos de la industria alimentaria y, además, proveer diferentes aspectos de las técnicas y sus combinaciones para diseñar técnicas novedosas sobre la modificación de almidones u otras fuentes no abordadas en este trabajo.

2. Almidón

El almidón está constituido por dos polímeros de glucanos, amilosa y amilopectina, en una proporción 1:3, generalmente. La estructura de la amilosa es lineal con enlaces (α -1,4) y la amilopectina es ramificada con enlaces (α -1,6). La forma lineal de la amilosa está organizada en forma de doble hélice, donde en su parte interna se acomodan los extremos hidrofóbicos de los lípidos formando complejos moleculares; esto genera un acceso a la enzima α -amilasa. La amilopectina, por su estructura

ramificada, facilita el acceso de múltiples sitios para la actividad enzimática (Birt et al., 2013). En el gránulo de almidón, se ha reportado la presencia de lípidos, proteínas y fósforo en bajas cantidades, las cuales son moléculas implicadas en la funcionalidad del almidón (Agama-Acevedo et al., 2019).

El almidón se clasifica en tres fracciones dependiendo de su índice y grado de digestión *in vitro* (Englyst y Cummings, 1985): a) almidón de digestión rápida (ADR), digerido durante los primeros 20 min incubación, b) almidón de digestión lenta (ADL), digerido en un intervalo de 20 a 120 min, y c) almidón resistente (AR), no es afectado por las enzimas del tracto digestivo. El ADR contribuye al aumento del síndrome metabólico (resistencia a la insulina, obesidad y diabetes). El ADL tiene un menor impacto en el índice glucémico (IG). Mientras que el almidón resistente, dentro de un control estricto de dieta, puede prevenir el síndrome metabólico y cáncer de colon (Jenkins et al., 2002).

El almidón puede obtenerse de leguminosas, tubérculos, raíces y cereales e incluso de frutas verdes, y es relativamente fácil y barato obtenerlo (Ashogbon, 2018). En los cereales, el endospermo es el tejido donde se almacena la mayor cantidad de almidón (85%); en el caso del trigo, el contenido de almidón es poco en la fracción de salvado compuesta por la aleurona, pericarpio y testa, (Lafiandra et al., 2014).

El maíz con almidón de alto contenido de amilosa (MAAA) es una de las fuentes de almidón más usadas en investigaciones. Lin et al. (2022) analizaron 2 líneas endogámicas de MAAA y encontraron una correlación muy alta entre el peso del almidón y el contenido aparente de amilosa (medido por absorción de yodo) y el contenido de amilosa (medido por cromatografía de permeación en gel). Esta última técnica permitió medir la distribución de la longitud de las ramificaciones (DLR), donde este tipo de almidón posee un DLR promedio en el intervalo de 33.0 a 37.8, que indica un contenido que correlaciona positivamente el incremento en la energía necesaria para gelatinizar este tipo de almidón.

El almidón de los tubérculos es otro de los almidones más estudiados, por ejemplo, el almidón de papa está compuesto de amilopectina (<80%) y es de los más usados en la industria de los alimentos por las características únicas que tiene en su forma nativa pura, las cuales son atribuidas a la

morfología de los gránulos de almidón (Bertoft y Blenow, 2009).

3. Tipos de almidón resistente

La razón principal del uso de AR en la industria de alimentos es mejorar la textura de las propiedades finales de los productos, observada en la viscosidad, la adhesividad, la cohesividad, etc. Además, estas deben permanecer a diferentes condiciones de almacenamiento. Esto es complicado de obtener con almidones nativos o fibras dietéticas tradicionales (Ma et al., 2020). Respecto a la nutrición y los efectos fisiológicos a la salud, el AR ha funcionado como prebiótico, pero es transformado en glucosa debido a su origen de un polímero hidrolizado por enzimas del aparato digestivo. Por lo cual, algunos países regulan la presencia del AR como aditivo de alimentos, por ejemplo, Estados Unidos. Las desventajas reportadas en los almidones nativos son

baja resistencia al cizallamiento, menor estabilidad térmica y alta retrogradación (Fuentes-Zaragoza et al., 2010). Esto justifica el uso de diversos métodos para la modificación de almidón nativo.

La Tabla 1 contiene los tipos de AR y fuente de obtención, así como su impacto durante el procesamiento. En general, los almidones con alto contenido de amilosa son los que favorecen la producción de AR. El Almidón resistente tipo 1 (AR1) y Almidón resistente tipo 2 (AR2) se pierden durante el proceso de elaboración de alimentos, por ello se recomienda aplicar alguna modificación para mantenerlos. Enfocados a esta tarea, algunos cultivos han sido modificados genéticamente para aumentar la proporción de amilosa (Zhang et al., 2020), los cuales deberían someterse a algún método, físico, químico o enzimático, para garantizar el contenido de AR con impacto positivo en la salud.

Tabla 1. Tipos de almidón resistente: características, fuentes y usos tecnológicos.

Tipo de Almidón	Características	Fuente	Impacto del procesamiento	Referencias
AR1	Almidones físicamente inaccesibles para las enzimas digestivas por el tipo de matriz en que se encuentran confinados.	Granos enteros o parcialmente molidos de cereales, como trigo, maíz y sorgo.	Normalmente se destruye el AR durante el procesamiento.	(Homayouni et al., 2014).
AR2	Gránulos de almidones nativos no gelatinizados con una cristalinidad tipo B.	Papas crudas, plátanos verdes y almidones de maíz ricos en amilosa.	Normalmente se destruye durante el procesamiento.	(Homayouni et al., 2014)
AR3	Almidón retrogradado formado por enfriamiento del almidón gelatinizado.	Papa, tapioca, trigo y maíz.	Cambia la concentración de amilosa, poder de hinchamiento, solubilidad, y propiedades de amasado	(Zieba y col., 2019)
AR4	Almidones modificados químicamente para evitar la unión de las enzimas digestivas con el almidón.	Almidón de maíz con alto contenido de amilosa.	No afecta la morfología del gránulo y permanece la distribución de tamaño.	(Nagahata et al., 2013)
AR5	Complejo de amilosa-lípidos.	Almidón de maíz con alto contenido de amilosa quinoa.	Altas temperaturas pueden favorecer el aumento de AR.	(Guo y col., 2023)

El almidón resistente tipo 3 (AR3) se conoce como almidón retrogradado el cual se forma durante el enfriamiento del almidón gelatinizado (Ma et al., 2020). El almacenaje prolongado de los geles a bajas temperaturas o ambiente permite el agregamiento de las dobles hélices de amilosa para formar una estructura cristalina de tipo "B", lo cual permite una alta estabilidad térmica por encima de 150°C (Eerligen

et al., 1993). Esto conlleva una estructura amorfa y cristalina del AR3. La mayoría de los estudios demuestran que las fracciones cristalinas permanecen resistentes a la digestión enzimática pero las condiciones, humedad y temperatura, deben ser sumamente cuidadosas durante la generación de AR3 y lograr altas eficiencias (Tharanathan, 2002).

De acuerdo con la literatura, se tiene una mayor preferencia por almidones modificados físicamente en comparación de los métodos químicos, como los usados para la formación del Almidón Resistente Tipo 4 (AR4) pues presentan algunos inconvenientes en la industria alimentaria principalmente por su inocuidad (Q. Chen et al., 2015). Uno de los métodos más recientes para propiciar la formación de Almidón Resistente tipo 5 (AR5) consiste en formar complejos amilosa-lípidos con diferentes lípidos o ácidos grasos bajo condiciones controladas, aunque también se pueden formar durante el proceso de elaboración de alimentos (Lau et al., 2016).

4. Métodos de generación de almidón resistente

A pesar de las aplicaciones del almidón, su forma nativa presenta algunas limitaciones relacionadas con sus propiedades físicas. Esto ha conducido a la búsqueda de técnicas efectivas que permitan su aplicación en la industria textil, papelería y en la alimentaria. En esta última, la aplicación como aditivo mejora la calidad de los productos finales y de la materia prima para la elaboración de alimentos funcionales con buena aceptación sensorial (Srichuwong et al., 2017).

La generación del AR es llevada cabo de manera general por 3 métodos: físico, químico y enzimático. Los métodos físicos son acompañados de cambios de humedad, presión, calor, esfuerzo de corte y radiación (Zia-ud-Din et al., 2017). Los métodos químicos usan ácidos orgánicos e inorgánicos, bases fuertes y agentes químicos como el óxido de propileno, que presenta una desventaja para su empleo en la industria alimentaria (Chen et al., 2018). Para la modificación enzimática son usadas de enzimas como la α -amilasa, β -amilasa, enzimas ramificadoras (glucano transferasa) y desramificadoras (isoamilasa); el uso de reactivos seguros para el consumidor, la especificidad y selectividad de las enzimas ha hecho que este método llame la atención de investigadores y compañías dedicadas al diseño de aditivos para la industria (Punia Bangar et al., 2022).

4.1 Métodos químicos

El uso de ácidos en el almidón, como el clorhídrico, propician la despolimerización en las cadenas, ayudan a la solubilidad y retardan la retrogradación durante el almacenamiento en frío (Kim y Ahn, 1996). El succinato incorpora grupos succinilo hidrófilos que mejoran la consistencia y estabilidad durante el

almacenamiento a temperaturas bajas. Mehboob et al. (2015) reportaron una modificación química en el almidón de sorgo blanco usando ácido clorhídrico a diferentes concentraciones (0.1M, 0.5 M, y 1.0 M) para añadir ácido succínico, pues los iones hidronio rompen los enlaces glucosídicos en la región amorfa del almidón, lo que conduce a un menor peso molecular de las cadenas de amilosa y amilopectina. Esta modificación aumenta la región cristalina relativa de tal manera que la temperatura de gelatinización en los almidones diluidos con ácido será más alta que en almidones nativos (Donovan, 1979). Los almidones con estas características pueden ser usados para elaborar alimentos con características de geles blandos como natillas y postres lácteos.

La esterificación con ácido octenil succínico (AOS) es otra forma de incorporar grupos hidrofóbicos y genera características anfipáticas a la molécula de almidón y propiedades pseudoplásticas a alimentos similares a la mayonesa (Mason, 2009), en productos de panadería provocó un aumento en el volumen específico durante la fase de levado de la masa (Dapčević Hadnađev et al., 2014). Lopez-Silva et al. (2022) estudiaron los efectos de 55, 75 y 95 % de pregelatinización mediante extrusión del almidón de maíz con $\approx 25\%$ de amilosa y su impacto en la eficiencia de esterificación con AOS. Los resultados de ese estudio indicaron que: a) la morfología de los gránulos de almidón se perdió al 95% de pregelatinización, b) la viscosidad en el almidón nativo gelatinizado mostró tres picos, a 30, 70 y 95 °C, el tamaño de los picos se redujo en presencia de le AOS indicando una disminución en la viscosidad atribuida al carácter anfipático impartido por la esterificación con AOS, c) el índice de emulsificación no varió significativamente entre los almidones nativos y los pregelatinizados, 0.67 y 0.79, respectivamente, pero incrementó hasta 0.98 en los tratamientos con AOS, y c) la combinación de los tratamientos ayudó a estabilizar las emulsiones.

El ácido cítrico, reconocido como seguro para el uso en alimentos por la FDA, también ha sido empleado en la modificación química del almidón de sorgo. Esto es debido a que los grupos carboxilos de este ácido tienen la capacidad de formar fuertes enlaces de hidrógeno con el grupo hidroxilo del almidón, de esta manera pueden inhibir la reorganización de las cadenas de almidón evitando así la retrogradación (Ghanbarzadeh et al., 2011). El análisis de perfil de textura en los citratos de almidón reveló que pueden

ser incorporados en productos instantáneos, congelados y refrigerados por su baja tendencia a la retrogradación.

4.2 Métodos físicos

También han sido estudiadas técnicas físicas, como el ultrasonido, para la modificación de almidón. Por ejemplo, Rahaman et al. (2021) estudiaron los efectos de ultrasonido de alto poder y frecuencia (40 kHz) con aplicaciones de 10 y 20 min en almidones de maíz y yuca encontrando, por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier, cambios en la estructura de los almidones tratados modificados por ultrasonido. Estos cambios tienen que ver con la disposición de los grupos -OH en la región amorfa que permiten la interacción de la molécula con el agua y afectan la entalpía de gelatinización. Esto fue corroborado por Escaneo de Calorimetría Diferencial.

Otro tratamiento físico, como las altas presiones, fue estudiado por Liu et al. (2016) en almidón de sorgo y sus resultados indicaron que en las muestras tratadas a 600 MPa se puede alterar la estructura cristalina de tipo 'A' hacia un patrón similar al tipo 'B'. Así, existe una disminución en su capacidad de absorción de aceite y aumentando la capacidad de absorción de agua, ambos resultados de la alteración de los enlaces de hidrógeno que indican el rompimiento en la región amorfa y cristalina mejorando interacción hidroxilo-molécula de agua que favorece la absorción de agua en comparación de los almidones no modificados. Esta técnica es un método alternativo para reducir la digestibilidad de almidón al mantener intacta la estructura de los gránulos de almidón.

4.3 Métodos enzimáticos

El uso de enzimas para la modificación del almidón es considerado una estrategia limpia pues no genera residuos peligrosos (Punia Bangar et al., 2022). Ferreira et al. (2014) usaron almidón modificado de arroz en fórmulas lácteas y encontraron que la firmeza dependía en mayor medida de la cantidad de azúcar presente en las fórmulas analizadas, esto lo atribuyeron a que el azúcar evitaba la interacción entre las estructuras cristalinas del almidón y la caseína o sus hidrolizados. Salcedo-Mendoza et al. (2018) analizaron las características del almidón de yuca modificado enzimáticamente con α -amilasa comercial, sin encontrar diferencias al analizar el patrón de rayos X, pero observaron

diferencias en la morfología de los gránulos de almidón a medida que aumentaron la cantidad de enzima y en consecuencia el grado de despolimerización expresado como dextrosa libre; y al analizar la solubilidad en agua fría existió una mejora en todos los almidones tratados enzimáticamente respecto del almidón nativo. En ese estudio, los valores de la temperatura de amasado y de viscosidad de rompimiento fueron más altos en el almidón tratado con enzimas, de 71.4 a 75.5 °C, y de 3450.1 a 5048.7, respectivamente, mientras que la viscosidad máxima registrada para los almidones tratados con α -amilasa estuvo dentro del intervalo 3557 a 5141 cP comparados con los 2725 cP de los almidones nativos, y la viscosidad de retroceso disminuyó al intervalo de 24.5 a 575.9 cP en los almidones modificados en comparación con los 1000.3 cP del almidón nativo. Estas características fueron relacionadas con un incremento en la sinéresis de los almidones modificados pero que disminuía con los ciclos de congelamiento y descongelamiento en comparación con el AR, el cual al tercer ciclo registró sinéresis más alta que los almidones modificados. Esto último sugirió a este almidón como aditivo antienviejimiento en pan, productos húmedos, yogurt, pures, salsas, cremas y pastelería.

Después de optimizar las condiciones de reacción para generar AR3 por tratamiento enzimático, Khan et al. (2020) evaluaron fisicoquímica y sensorialmente galletas preparadas con estas harinas basados en la capacidad de absorción de agua, de aceite, la capacidad de unión de aguas y el poder de hinchamiento. Estos parámetros disminuyeron y la capacidad de absorción de leche aumentó. El análisis físico de las galletas indicó mayor compactación en aquellas preparadas con AR3 y sensorialmente más aceptadas. Los resultados provinieron de un ataque enzimático en la región amorfa de los gránulos de almidón que produjo una estructura cristalina más compacta.

4.4 Métodos fitoquímicos

La presencia de fitoquímicos con los taninos, fenoles y flavonoides puede estar relacionados con la hidrólisis de almidón. Barrett et al. (2018) reportaron que los taninos tienen la capacidad de actuar como inhibidores mixtos no competitivos acoplados a sitios no específicos de las enzimas digestivas. En este sentido, los polifenoles, como antocianinas, flavonas, flavonoles, también pueden aplazar la digestión al

inhibir la actividad enzimática. El almidón de arroz modificado con α -amilasa y amiloglucosidasa en combinación con residuos de la industria alimentaria, como la cascarilla de jaborcoba. Este es un fruto común en Sudamérica con gran concentración de fitoquímicos con actividad antioxidante (fenoles y flavonoides). Almedia et al. (2021) observaron incrementos en: firmeza, gomosidad, adhesividad, capacidad de absorción de agua, aceite y leche; así como disminución en la sinéresis. Estos estudios fueron realizados respecto a los días de almacenamiento en frío y todas las formulaciones con piel de jaborcoba se ajustaron a un modelo de fluido adelgazante. Esto propuso el uso del almidón modificado en alimentos como espesante o emulsificante.

En comparación con otros cereales, casi todas las clases de polifenoles están en el sorgo, destacando la concentración de ácidos fenólicos simples, flavonoides y taninos (Shen et al., 2018). Rocchetti et al. (2020) compararon harina de sorgo blanco y pigmentado como potencial modulador en la digestibilidad del almidón. Las harinas de color marrón mostraron una mayor cantidad de fitoquímicos accesibles, principalmente de tipo antocianinas, después de dos horas de digestión simulada. La presencia de estos fitoquímicos fue relacionada positivamente con la concentración de AR en las harinas, en la harina marrón se detectó mayor contenido (21.4%), donde las proteínas del sorgo (kaifirinas) también influyeron al formar una barrera para las enzimas digestivas gracias a su matriz reticulada que inhibió la hidrólisis del almidón.

4.5 Métodos combinados

Escobar-Puentes et al. (2019) desarrollaron un snack de tercera generación empleando almidón fosforilado de sorgo elaborado por extrusión reactiva, donde las altas presiones de corte y temperaturas altas provocaron una despolimerización de la molécula de almidón que dejó expuestos los grupos hidroxilos de almidón para formar la reticulación con sales de fosfato agregadas. Las botanas generadas con el AR4 fueron sometidas a análisis sensorial constituido por un panel semi-entrenado y no fueron encontradas diferencias significativas en los parámetros de color, sabor, textura, frescura y aceptabilidad general. Por su parte, Shaikh et al. (2017) adicionaron almidón hidroxipropilado, almidón succinilado, almidón oxidado y almidón acetilado de mijo a natillas y evaluaron su

efecto sobre la estabilidad del almacenamiento en frío. El análisis sensorial indicó que la incorporación de almidón hidroxipropilado mejoró la aceptación general en las natillas. Esta preferencia está relacionada con el aumento de dureza, gomosidad y masticabilidad que mejoró la textura. Además, la adición de almidón hidroxipropilado a las natillas redujo la sinéresis y mantuvo la estabilidad al almacenamiento en frío.

5. Conclusión

El almidón es uno de los polímeros más abundante en la naturaleza que puede ser usado en su forma y en gran medida por su fracción de almidón resistente, propiedades que se pierden durante las operaciones usadas para la elaboración de alimentos; sin embargo, las modificaciones realizadas por el uso de químicos, enzimas o por métodos químicos afectan la molécula de almidón por intercambio de grupos funcionales, por modificación en la proporción de amilosa y amilopectina que produce cambios estructurales en el polímero, cambios alteran propiedades como la viscosidad, la solubilidad, la sinéresis, el comportamiento reológico de soluciones de almidón, la entalpia de gelatinización, las cuales favorecen la obtención de mejores características para su uso en diferentes alimentos de la industria alimentaria y que deja la puerta abierta para seguir indagando en la aplicación de estas técnicas, solas o combinadas, en otras fuentes de almidón.

Nomenclatura

ADL	almidón de digestión lenta
ADR	almidón de digestión rápida
AOS	ácido octenil succínico
AR	almidón resistente
AR1-5	almidones resistentes de tipo 1, 2, 3, 4 y 5
DLR	distribución de la longitud de las ramificaciones
IG	índice glucémico
MAAA	maíz con almidón de alto contenido de amilosa

Referencias

- Abbas, K.A., Khalil, S.K., & Meor Hussin, A.S. (2010). Modified starches and their usages in selected food products: A review study. *Journal of Agricultural Science*, 2(2). DOI: 10.5539/jas.v2n2p90.
- Agama-Acevedo, E., Flores-Silva, P.C., & Bello-Pérez, L.A. (2019). Cereal Starch Production for Food

- Applications. In *Starches for Food Application*, pp. 71–102, Silva-Clerici, M.T.P. & Schmiele, M. (Eds.). Elsevier.
DOI: 10.1016/B978-0-12-809440-2.00003-4.
- Almeida, R.L.J., dos Santos Pereira, T., Almeida, R.D., Santiago, Â.M., de Lima Marsiglia, W.I.M., Nabeshima, E.H., de Sousa Conrado, L., & de Gusmão, R.P. (2021). Rheological and technological characterization of red rice modified starch and jaboticaba peel powder mixtures. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11.
DOI: 10.1038/s41598-021-88627-4.
- Ashogbon, A.O. (2018). Current Research Addressing Physical Modification of Starch from Various Botanical Sources. *Global Nutrition and Dietetics*, 1(1), 1–7. www.scientonline.org.
- Barrett, A.H., Farhadi, N.F., & Smith, T.J. (2018). Slowing starch digestion and inhibiting digestive enzyme activity using plant flavanols/tannins—A review of efficacy and mechanisms. *LWT- Food Science and Technology*, 87, 394–399.
DOI: 10.1016/j.lwt.2017.09.002.
- Bertoft, E., & Blennow, A. (2009). Structure of Potato Starch. In *Advances in Potato Chemistry and Technology*, pp.57-73, Singh, J. & Kaur, L. (Eds.); Elsevier.
DOI: 10.1016/C2013-0-13578-7.
- Birt, D.F., Boylston, T., Hendrich, S., Jane, J.-L., Hollis, J., Li, L., McClelland, J., Moore, S., Phillips, G.J., Rowling, M., Schalinske, K., Scott, M.P., & Whitley, E.M. (2013). Resistant Starch: Promise for Improving Human Health. *Advances in Nutrition*, 4(6), 587–601.
DOI: 10.3945/an.113.004325.
- Chen, Q., Yu, H., Wang, L., ul Abdin, Z., Chen, Y., Wang, J., Zhou, W., Yang, X., Khan, R.U., Zhang, H., & Chen, X. (2015). Recent progress in chemical modification of starch and its applications. *RSC Advances*, 5(83), 67459–67474.
DOI: 10.1039/C5RA10849G.
- Chen, Y.F., Kaur, L., & Singh, J. (2018). Chemical Modification of Starch. In *Starch in Food: Structure*, pp. 283–321, Sjöo, M. & Nilsson, L. (Eds). Elsevier.
DOI: 10.1016/B978-0-08-100868-3.00007-X.
- Dapčević Hadnađev, T.R., Dokić, L.P., Hadnađev, M.S., Pojić, M.M., & Torbica, A.M. (2014). Rheological and breadmaking properties of wheat flours supplemented with octenyl succinic anhydride-modified waxy maize starches. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 235–247.
DOI: 10.1007/s11947-013-1083-y.
- Donovan, J.W. (1979). Phase transitions of the starch-water system. *Biopolymers*, 18(2), 263–275.
DOI: 10.1002/bip.1979.360180204.
- Eerligen, R.C., Crombez, M. & Delcour, J. (1993). Enzyme-resistant starch. I: Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. *Cereal Chemistry*, 70, 339–344.
- Englyst, H.N., & Cummings, J.H. (1985). Digestion of the polysaccharides of some cereal foods in the human small intestine. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 42(5), 778–787.
DOI: 10.1093/ajcn/42.5.778.
- Escobar-Puentes, A., Rincón, S., García-Gurrola, A., Zepeda, A., Calvo-López, A.D., & Martínez-Bustos, F. (2019). Development of a third-generation snack with type 4 resistant sorghum starch: Physicochemical and sensorial properties. *Food Bioscience*, 32, 100474.
DOI: 10.1016/j.fbio.2019.100474.
- Ferreira, S.M., Caliar, M., Soares Júnior, M.S., & Del Pino Beleia, A. (2014). Infant dairy-cereal mixture for the preparation of a gluten free cream using enzymatically modified rice flour. *LWT- Food Science and Technology*, 59(2P1), 1033–1040.
DOI: 10.1016/j.lwt.2014.06.047.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M.J., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J.A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43(4), 931–942.
DOI: 10.1016/j.foodres.2010.02.004.
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2011). Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 229–235.
DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.10.016
- Guo, J., Ellis, A., Zhang, Y., Kong, L., & Tan, L. (2023). Starch-ascorbyl palmitate inclusion complex, a type 5 resistant starch, reduced in vitro digestibility and improved in vivo glycaemic

- response in mice. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121289.
DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.121289.
- Homayouni, A., Amini, A., Keshtiban, A.K., Mortazavian, A.M., Esazadeh, K., & Pourmorian, S. (2014). Resistant starch in food industry: A changing outlook for consumer and producer. *Starch*, 66(1–2), 102–114.
DOI: 10.1002/star.201300110.
- Jenkins, D.J., Kendall, C.W., Augustin, L.S., Franceschi, S., Hamidi, M., Marchie, A., Jenkins, A.L., & Axelsen, M. (2002). Glycemic index: overview of implications in health and disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(1), 266S–273S.
DOI: 10.1093/ajcn/76.1.266S.
- Kaur, H., & Gill, B.S. (2019). Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 367–375.
DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.12.149.
- Khan, A., Siddiqui, S., Ur Rahman, U., Ali, H., Saba, M., Andleeb Azhar, F., Maqsood Ur Rehman, M., Ali Shah, A., Badshah, M., Hasan, F., & Khan, S. (2020). Physicochemical properties of enzymatically prepared resistant starch from maize flour and its use in cookies formulation. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 549–569.
DOI: 10.1080/10942912.2020.1742736.
- Kim, R.E., & Ahn, S.Y. (1996). Gelling properties of acid-modified red bean starch gels. *Applied Biological Chemistry*, 39, 49–53.
- Lafiandra, D., Riccardi, G., & Shewry, P.R. (2014). Improving cereal grain carbohydrates for diet and health. *Journal of Cereal Science*, 59 (3), 312–326.
DOI: 10.1016/j.jcs.2014.01.001.
- Lau, E., Zhou, W., & Henry, C.J. (2016). Effect of fat type in baked bread on amylose–lipid complex formation and glycaemic response. *British Journal of Nutrition*, 115(12), 2122–2129.
DOI: 10.1017/S0007114516001458.
- Lin, L., Zhao, S., Li, E., Guo, D., & Wei, C. (2022). Structural properties of starch from single kernel of high-amylose maize. *Food Hydrocolloids*, 124, 107349.
DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.107349.
- Liu, H., Fan, H., Cao, R., Blanchard, C., & Wang, M. (2016). Physicochemical properties and in vitro digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 753–760.
DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.07.088.
- Lopez-Silva, M., Agama-Acevedo, E., Yee-Madeira, H., Bello-Perez, L.A., & Alvarez-Ramirez, J. (2022). Effect of gelatinization degree on emulsification capacity of corn starch esterified with octenyl succinic acid. *Food Chemistry*, 375, 131657.
DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131657.
- Ma, Z., Hu, X., & Boye, J.I. (2020). Research advances on the formation mechanism of resistant starch type III: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 276–297.
DOI: 10.1080/10408398.2018.1523785.
- Mason, W.R. (2009). Starch use in foods. In *Starch Chemistry and Technology*, pp745-795, BeMiller, J. & Whistler, R.B. (Eds.). Academic Press.
DOI: 10.1016/B978-0-12-746275-2.00020-3.
- Mehboob, S., Ali, T.M., Alam, F., & Hasnain, A. (2015). Dual modification of native white sorghum (*Sorghum bicolor*) starch via acid hydrolysis and succinylation. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 459–467.
DOI: 10.1016/j.lwt.2015.05.012.
- Nagahata, Y., Kobayashi, I., Goto, M., Nakaura, Y., & Inouchi, N. (2013). The formation of resistant starch during acid hydrolysis of high-amylose corn starch. *Journal of Applied Glycoscience*, 60(2), 123–130.
DOI: 10.5458/jag.jag.JAG-2012_008.
- Punia Bangar, S., Ashogbon, A.O., Singh, A., Chaudhary, V., & Whiteside, W.S. (2022). Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. *Carbohydrate Polymers*, 287, 119265.
DOI: 10.1016/J.CARBPOL.2022.119265.
- Rahaman, A., Kumari, A., Zeng, X.A., Adil Farooq, M., Siddique, R., Khalifa, I., Siddeeg, A., Ali, M., & Faisal Manzoor, M. (2021). Ultrasound based modification and structural-functional analysis of corn and cassava starch. *Ultrasonics Sonochemistry*, 80, 105795.
DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105795.

- Rocchetti, G., Giuberti, G., Busconi, M., Marocco, A., Trevisan, M., & Lucini, L. (2020). Pigmented sorghum polyphenols as potential inhibitors of starch digestibility: An in vitro study combining starch digestion and untargeted metabolomics. *Food Chemistry*, 312, 126077. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.126077
- Salcedo-Mendoza, J., Paternina-Urzola, S., Lujan-Rhenals, D., & Figueroa-Flórez, J. (2018). Enzymatic modification of cassava starch (Corpoica M-Tai) around the pasting temperature TT - Modificación enzimática de almidón de yuca (Corpoica M-Tai) alrededor de la temperatura de pasta. *Dyna*, 85(204), 223–230. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532018000100223&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v85n204/0012-7353-dyna-85-204-00223.pdf.
- Sandhu, K.S., & Siroha, A.K. (2017). Relationships between physicochemical, thermal, rheological and in vitro digestibility properties of starches from pearl millet cultivars. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 213–224. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.05.015.
- Shaikh, M., Ali, T.M., & Hasnain, A. (2017). Utilization of chemically modified pearl millet starches in preparation of custards with improved cold storage stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 360–366. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.183.
- Shen, S., Huang, R., Li, C., Wu, W., Chen, H., Shi, J., Chen, S., & Ye, X. (2018). Phenolic Compositions and Antioxidant Activities Differ Significantly among Sorghum Grains with Different Applications. *Molecules*, 23(5), 1203. DOI: 10.3390/molecules23051203.
- Srichuwong, S., Curti, D., Austin, S., King, R., Lamothe, L., & Gloria-Hernandez, H. (2017). Physicochemical properties and starch digestibility of whole grain sorghums, millet, quinoa and amaranth flours, as affected by starch and non-starch constituents. *Food Chemistry*, 233, 1–10. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.04.019.
- Tharanathan, R.N. (2002). Food-Derived Carbohydrates—Structural Complexity and Functional Diversity. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(1), 65–84. DOI: 10.1080/07388550290789469.
- Zhang, X.-d., Gao, X.-c., Li, Z.-w., Xu, L.-c., Li, Y.-b., Zhang, R.-h., et al. (2020). The effect of amylose on kernel phenotypic characteristics, starch-related gene expression and amylose inheritance in naturally mutated high-amylose maize. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(6), 1554-1564. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62779-6.
- Zięba, T., Kapelko-Żeberska, M., Gyszkin, A., Wilczak, A., Raszewski, B and Szychaj, R. (2019). Effect of the botanical origin on properties of RS3/4 type resistant starch. *Polymers*, 11(81). DOI: 10.3390/polym11010081.
- Zia-ud-Din, Xiong, H., & Fei, P. (2017). Physical and chemical modification of starches: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2691–2705. DOI: 10.1080/10408398.2015.1087379.