

2021

Enero-Diciembre

Journal of Research in Engineering Sciences

Facultad de Ingeniería

E-ISSN: 2590-6429



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

**LA U VERDE
DE COLOMBIA**

Volumen

06

Journal of Research in Engineering Sciences

Facultad de Ingeniería



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

Volumen

06

Enero-Diciembre 2021

Journal of Research in Engineering Sciences

Vol. 6 – Núm. 1

Enero – Diciembre de 2021

Facultad de Ingeniería

© Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA

E-ISSN: 2590-6429

Rector

Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniégas

Vicerrector de Asuntos Estudiantiles y Bienestar Universitario

Dr. Jorge Arturo Torres Escobar

Vicerrectora Administrativa

Dra. María Alejandra Gaitán Castiblanco

Vicerrector de Investigación

Dr. Álvaro Mauricio Zúñiga Morales

Secretario General

Dr. Albino Segura Penagos (e)

Asamblea General

Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
(Presidente)

Consejo Superior

Dr. Álvaro Zúñiga García
(Presidente)

Dra. Teresa Arévalo Ramírez
Consejera

Dra. Teresa Escobar de Torres
Consejera

Dra. Ximena Patricia Martínez
Consejera

Dr. Álvaro Ramírez Rubiano
Consejero

Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
Consejero

Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniegas
Consejero y Rector

Fernando Barros Algarra
Representante Principal por los Docentes

Olber Arturo Ayala Duarte
Representante Principal por los Egresados

Juan Sebastián Becerra Gamboa
Representante Principal por los
Estudiantes

DIRECTOR

Ing. Javier D. Hoyos Leyva, Ph.D.
Decano Facultad de Ingeniería
Agroindustrial

EDITOR

Ing. Wilson Daniel Caicedo Chacón
Investigador

COORDINACIÓN EDITORIAL

Facultad de Ingeniería
Fundación Universitaria Agraria de
Colombia



Los textos de los artículos de esta publicación pueden ser reproducidos, citando la fuente. Los juicios emitidos por los autores son de su responsabilidad. Por tanto, no comprometen a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, a la Facultad de Ingeniería ni al Comité Editorial.

Journal of Research in Engineering Sciences by Universidad Agraria de Colombia – Uniagraria is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported License.

La publicación 'Journal of Research in Engineering Sciences' es producto de la Universidad Agraria de Colombia -Uniagraria bajo el ISSN versión digital: 2590-6429, en idioma español. Es un producto editorial protegido por el Copyright © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons (CC).

COMITÉ EDITORIAL

Ing. Wilson Daniel Caicedo Chacón
Ingeniero Agroindustrial.
Maestría en Ingeniería de Alimentos.

Dr. Javier D. Hoyos Leyva
Ingeniero Agroindustrial.
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.
Doctor en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos.

Mg. Gloria S. Barrera Arias
Administradora de Empresas.
Maestría en Ingeniería Industrial.

Mg. Carlos R. Suárez Suárez
Ingeniero Electrónico.
Maestría en Ingeniería Electrónica.

Mg. Luisa Fernanda Rivera Criollo
Ingeniera de Alimentos.
Maestría en Metrología, Calidad e Innovación.

Ing. Jeniffer Lyda Sánchez
Ingeniera Civil.

Mg. Yuly Andrea Rodríguez Quiñonez
Ingeniera Biotecnológica.
Maestría en Ingeniería Ambiental.

Mg. Jaime Roldán Parra
Ingeniero de Alimentos.
Maestría en Gestión de la Calidad y Productividad.

COMITÉ CIENTÍFICO

Ing. Johan Esteban Villamil Galindo
Ingeniero de Alimentos.
Universidad Nacional del Litoral de Argentina.

Mg. Deivis Suárez Rivero
Ingeniero Agrónomo.
Maestría en Biología Vegetal.

Dra. Johana Colina Moncayo
Ingeniera Química.
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.
Doctorado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR

Dra. Ángela María Farías Campomanes
Mg. Mauricio Aníbal Sierra Sarmiento
Mg. Rubén Alberto Lozano Gil
Mg. Andrés Mauricio Díaz
Mg. Diana Catalina Guzmán
Mg. Martha Melizza Ordóñez
Mg. Nelson Enrique Rodríguez Corredor

Corrección de estilo
María Camila Remolina Quiroga

**Concepto gráfico,
composición y diagramación**
Entrelibros SAS.
www.entrelibros.co
Ian Guarnizo - Diseñador

Bogotá D.C. - Colombia
2021

ISSN versión digital
2590-6429

Contenido

Nota editorial	5
Decano Javier D. Hoyos-Leyva Ph.D.	
Evaluación del extracto de semillas de moringa como coagulante natural para la reducción de la turbidez del agua en el proceso de tratamiento del acueducto Mariano Ospina en el municipio de Guasca, Cundinamarca	8
Arevalo J., Bernal M., Castañeda K. y Cardenas C.	
Diseño teórico y estructuración de un esparcible tipo margarina a partir de aceite de sachá inchi (<i>Plukenetia volubilis</i> L.) mediante fraccionamiento físico: una alternativa nutricionalmente superior	21
Gómez Cardenas, E. F. y Hoyos Leyva, J. D.	
Microencapsulation strategies in ruminant nutrition: Advances in formulation, delivery systems, and functional applications	35
Villamil-Galindo, E., Jiménez-Marquéz, S., Barrero-Echeverría, M. y Hoyos-Leyva, J. D.	
Thermal treatment effects on the microstructure and flexural performance of handmade $-Al_2O_3$ crucibles	54
Rueda Cadavid, D. A., Caicedo Chacon, W. D. y Morales Carreño, A. N.	
Instrucciones para los autores	73

Editorial

Ejercer la ingeniería en contextos como el colombiano implica reconocer que el conocimiento adquiere verdadero sentido cuando se traduce en soluciones accesibles, pertinentes y con impacto directo en las comunidades y en los sistemas productivos. Este volumen del *Journal of Research in Engineering Sciences* (JRES) se alinea con esa visión, integrando contribuciones que, más allá de su solidez técnica, evidencian una clara orientación hacia la resolución de problemáticas reales en ámbitos rurales, agroindustriales y de desarrollo tecnológico aplicado.

Los trabajos aquí reunidos convergen en el aprovechamiento eficiente de recursos y en la generación de valor a partir de materias primas y sistemas locales. La investigación sobre el uso de *Moringa oleifera* como coagulante natural, por ejemplo, no solo plantea una alternativa técnica para la potabilización de agua, sino que también responde a la necesidad urgente de fortalecer los acueductos rurales mediante soluciones sostenibles, de bajo costo y fácilmente implementables en contextos con limitaciones tecnológicas.

En esta misma lógica, el diseño de un esparcible tipo margarina a partir de aceite de sachá inchi evidencia el potencial de la ingeniería de alimentos para diversificar el

Practicing engineering in contexts such as the Colombian one requires recognizing that knowledge acquires true meaning when it is translated into accessible, relevant solutions with a direct impact on communities and productive systems. This volume of the *Journal of Research in Engineering Sciences* (JRES) aligns with that vision, integrating contributions that, beyond their technical rigor, demonstrate a clear orientation toward addressing real problems in rural, agroindustrial, and applied technological development settings.

The works gathered here converge on the efficient use of resources and the generation of value from local raw materials and systems. The research on the use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant, for example, not only proposes a technical alternative for water purification, but also responds to the urgent need to strengthen rural water supply systems through sustainable, low-cost solutions that are easily implementable in contexts with technological limitations. Along the same lines, the design of a margarine-type spread from sachá inchi oil demonstrates the potential of food engineering to diversify the use of native resources, transforming them into products with high nutritional and commercial value, aligned with current healthy consumption trends.

uso de recursos nativos, transformándolos en productos con alto valor nutricional y comercial, alineados con las tendencias actuales de consumo saludable.

De igual forma, la revisión sobre microencapsulación en nutrición de rumiantes pone de manifiesto el papel estratégico de la ingeniería en la optimización de sistemas pecuarios, mediante tecnologías que mejoran la biodisponibilidad de nutrientes, reducen pérdidas y contribuyen a la sostenibilidad de la producción animal. Este tipo de desarrollos refleja una transición hacia modelos más eficientes, donde la precisión en la entrega de compuestos funcionales se convierte en un factor clave para la competitividad del sector.

En un plano complementario, el estudio sobre el comportamiento microestructural y mecánico de crisoles de alúmina elaborados artesanalmente resalta la importancia de fortalecer las capacidades locales de manufactura. Más allá de la caracterización de materiales, este trabajo aporta elementos para mejorar la confiabilidad de procesos térmicos y reducir la dependencia de insumos importados, promoviendo así el desarrollo tecnológico desde lo local.

En conjunto, estos aportes reflejan una ingeniería que articula conocimiento científico, contexto territorial y necesidades productivas, consolidándose como una herramienta para impulsar la innovación y la sostenibilidad. En un país como Colombia, donde convergen riqueza natural y desafíos estructurales, este tipo de investigaciones demuestra que la ingeniería puede ser un motor de transformación real, capaz de

Likewise, the review on microencapsulation in ruminant nutrition highlights the strategic role of engineering in the optimization of livestock systems through technologies that improve nutrient bioavailability, reduce losses, and contribute to the sustainability of animal production. This type of development reflects a transition toward more efficient models, where precision in the delivery of functional compounds becomes a key factor for the sector's competitiveness.

On a complementary level, the study on the microstructural and mechanical behavior of artisanally crafted alumina crucibles highlights the importance of strengthening local manufacturing capabilities. Beyond materials characterization, this work provides elements to improve the reliability of thermal processes and reduce dependence on imported inputs, thereby promoting technological development from a local standpoint.

Taken together, these contributions reflect an engineering practice that articulates scientific knowledge, territorial context, and productive needs, establishing itself as a tool for driving innovation and sustainability. In a country like Colombia, where natural wealth and structural challenges converge, this type of research demonstrates that engineering can be a real engine of transformation, capable of integrating science and application for the benefit of regional development. That is, in essence, the engineering that transcends: one that understands its environment and acts upon it with technical judgment, social commitment, and a vision for the future.

integrar ciencia y aplicación en beneficio del desarrollo regional. Esa es, en esencia, la ingeniería que trasciende: la que comprende su entorno y actúa sobre él con criterio técnico, compromiso social y visión de futuro.

Javier D. Hoyos-Leyva, Ph.D.

Decano (E) de la Facultad de Ingeniería
Agroindustrial

Director (E) de programa Maestría en
Ingeniería

Javier D. Hoyos-Leyva, Ph.D.

Acting Dean of the Faculty of Agroindustrial
Engineering

Acting Director of the Master's Program in
Engineering

Evaluación del extracto de semillas de moringa como coagulante natural para la reducción de la turbidez del agua en el proceso de tratamiento del acueducto Mariano Ospina en el municipio de Guasca, Cundinamarca

Evaluation of moringa seed extract as a natural coagulant for turbidity reduction in the water treatment process of the Mariano Ospina water supply system in the municipality of Guasca, Cundinamarca

Arevalo J., Bernal M., Castañeda K. y Cardenas C.

Departamento de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia (UNIAGRARIA), Bogotá D.C., Colombia

Fecha de recepción: marzo de 2021 / Fecha de aceptación: junio de 2021

Resumen

La investigación en Guasca (Cundinamarca) evaluó el uso de extracto de semillas de *Moringa oleifera* como coagulante natural para mejorar la potabilización en el acueducto comunitario Mariano Ospina. Mediante pruebas de jarras se determinó una dosis preliminar óptima de 0,05 g/L y, tras ajustar condiciones de agitación y reposo, se alcanzó con 0,08 g/L una turbidez residual de 1,8 NTU en 168 horas, cumpliendo la Resolución 2115 de 2007. El análisis en SIG evidenció la relación directa entre lluvias intensas y el aumento de turbidez en la fuente hídrica. Además, se identificaron beneficios sociales, económicos y ambientales del uso de moringa en comunidades rurales sin acceso a tecnologías convencionales. Finalmente, se propuso el diseño hidráulico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en *Environmental Protection Agency Network* (EPANET) como insumo técnico, confirmando que la moringa es una alternativa ecológica, accesible y normativamente viable para la gestión del agua en zonas rurales con alta variabilidad climática.

Palabras clave: biocoagulantes, pruebas de jarras, potabilización rural, modelación hidráulica, sostenibilidad.

* Correspondencia: cardenas.cristhian@uniagraria.edu.co

Abstract

The study conducted in Guasca (Cundinamarca) evaluated the use of *Moringa oleifera* seed extract as a natural coagulant to improve water treatment at the Mariano Ospina community water system. Jug tests determined a preliminary optimal dose of 0.05 g/L, and after adjusting agitation and settling conditions, a residual turbidity of 1.8 NTU was achieved at 0.08 g/L within 168 hours, in compliance with Resolution 2115 of 2007. GIS analysis revealed a direct relationship between heavy rainfall and increased turbidity in the water source. Additionally, social, economic, and environmental benefits of using moringa were identified in rural communities without access to conventional technologies. Finally, the hydraulic design of the Drinking Water Treatment Plant (DWTP) was proposed using the Environmental Protection Agency Network (EPANET) as a technical input, confirming that moringa is an ecological, accessible, and regulatory-compliant alternative for water management in rural areas with high climatic variability.

Keywords: biocoagulants, jar tests, rural water treatment, hydraulic modeling, sustainability.

Introducción

En las zonas rurales de Colombia, el acceso al agua potable sigue siendo limitado, especialmente durante períodos de precipitación intensa que incrementan la turbidez de las fuentes superficiales. Esta situación afecta la eficacia de los procesos de potabilización, eleva los costos asociados al uso de coagulantes químicos y compromete la sostenibilidad de los acueductos comunitarios. El acueducto rural Mariano Ospina, ubicado en la vereda Pastor Ospina (Guasca, Cundinamarca), enfrenta regularmente estas dificultades debido a las condiciones climáticas variables y a las características fisicoquímicas del afluente. Ante este panorama, se exploró el uso del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como alternativa sostenible para el tratamiento de agua. Esta planta, de rápido crecimiento y fácil adaptación, posee propiedades coagulantes naturales que favorecen la reducción de la turbidez (Sánchez-Peña y Martínez-Ávila, 2013; Liñán, 2010; Parrotta, 1993).

La investigación se desarrolló en dos fases experimentales mediante pruebas de jarras: en la primera se determinó una dosis preliminar óptima de 0,05 g/L, y en la segunda, tras ajustar las condiciones de agitación y reposo, se alcanzó una turbidez residual de 1,8 NTU (unidades nefelométricas de turbidez) con 0,08 g/L después de 168 horas, cumpliendo con la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la Protección Social, 2007).

El estudio se enmarca en la Resolución 0622 de 2020, que regula la calidad del agua para consumo humano en Colombia (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020). Los hallazgos destacan a la moringa como una opción ecológica, accesible y normativamente viable para comunidades rurales, y sugieren el diseño hidráulico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en *Environmental Protection Agency Network* (EPANET) como insumo técnico para futuras optimizaciones operativas.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficacia del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como coagulante natural para la reducción de la turbidez en el agua cruda del acueducto comunitario Mariano Ospina.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental y documental para evaluar el uso de *Moringa oleifera* como coagulante natural en el tratamiento de agua del acueducto rural Mariano Ospina, en el municipio de Guasca (Cundinamarca). Inicialmente, se realizó un muestreo in situ en la captación de la PTAP, recolectando aproximadamente 18 L de agua cruda para su análisis en laboratorio.

Las semillas de moringa fueron recolectadas, secadas, limpiadas, deshidratadas en horno a 120 °C y trituradas hasta obtener un polvo fino utilizado como biocoagulante.

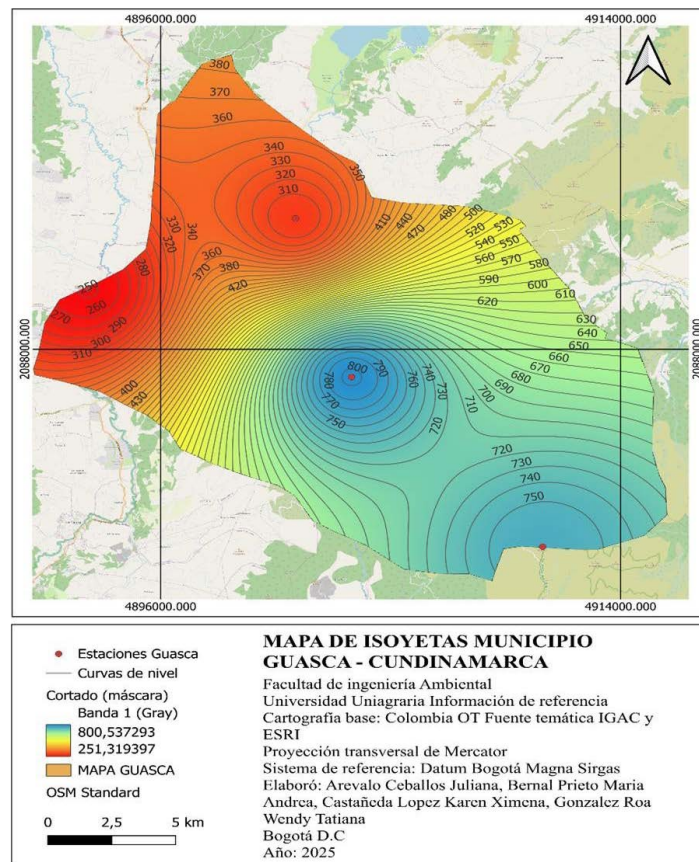
Posteriormente, se realizaron dos pruebas de jarras con diferentes concentraciones del coagulante (0,04–0,10 g/L), aplicando procesos de agitación rápida y lenta para favorecer la coagulación, floculación y sedimentación, midiendo la turbidez y el pH antes y después del tratamiento.

Adicionalmente, se integró información secundaria proveniente de entidades oficiales (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Gobernación de Cundinamarca e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)).

Para el análisis territorial se utilizaron imágenes satelitales y datos geospaciales obtenidos mediante Google Earth y capas cartográficas en QGIS, lo que permitió identificar la zona de captación, analizar la topografía y generar mapas de precipitación mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW) e isoyetas (Figura 1).

Finalmente, los resultados fueron comparados con la normativa colombiana de calidad del agua potable (Resolución 2115 de 2007 y Resolución 622 de 2020).

Figura 1. Mapa de isoyetas, municipio de Guasca, Cundinamarca.



Fuente. Elaboración propia.

Resultados y discusión

Resultados fase 1

El presente estudio se centró en evaluar la eficacia del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como coagulante natural para la reducción de la turbidez en el agua cruda captada por el acueducto rural Mariano Ospina, ubicado en el municipio de Guasca. La metodología experimental se basó en la aplicación de pruebas de tratabilidad a escala de laboratorio (test de jarras), las cuales permitieron determinar la dosis óptima de coagulante necesaria para lograr una clarificación eficiente del recurso hídrico.

Las caracterizaciones fisicoquímicas iniciales del agua de fuente revelaron una turbidez de 13 NTU. Durante la prueba de jarras, se evaluaron diferentes dosificaciones del extracto de *Moringa oleifera*. Se observó que la aplicación de una dosis de 0,05 g de extracto resultó ser la más eficiente para la remoción de turbidez, alcanzando un valor residual de 4,26 NTU. Al incrementar la dosificación a 0,1 g, la turbidez residual aumentó a 5,34 NTU. Este comportamiento evidencia una respuesta no lineal a la dosis aplicada y sugiere que el aumento de la dosificación no potencia su eficiencia.

A continuación, se presenta la Tabla 1 y la Figura 2, donde se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1. Promedio de variación por dosificación.

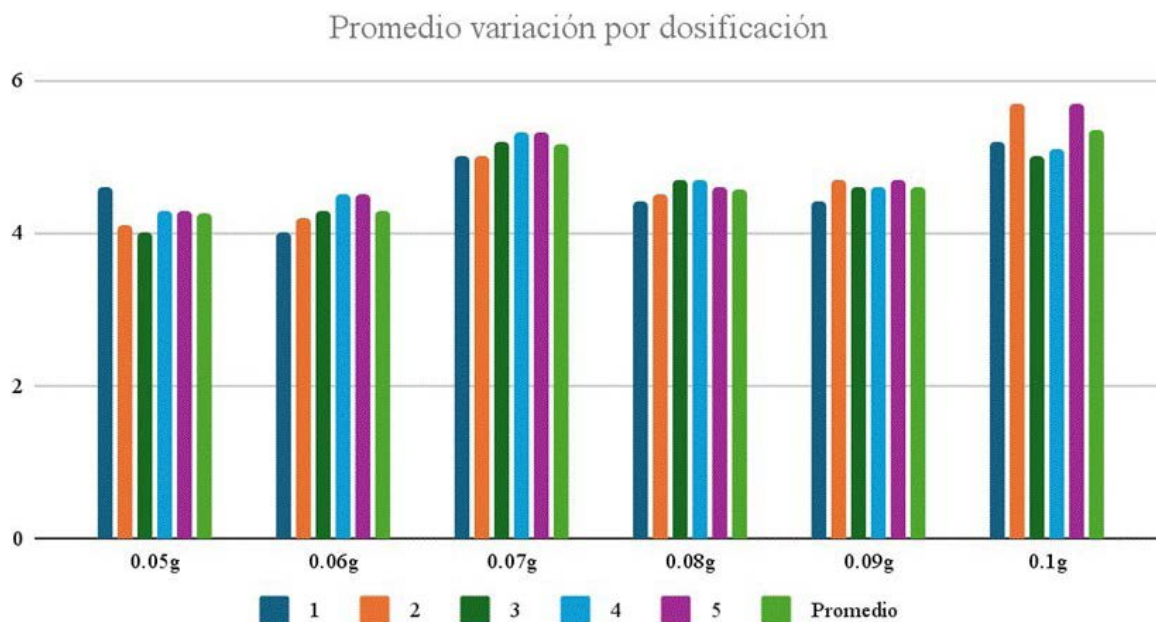
Número de la prueba	Cantidad de moringa (g/L)					
	0,05g	0,06g	0,07g	0,08g	0,09g	0,1g
1	4,6	4	5	4,4	4,4	5,2
2	4,1	4,2	5	4,5	4,7	5,7
3	4	4,3	5,2	4,7	4,6	5
4	4,3	4,5	5,3	4,7	4,6	5,1
5	4,3	4,5	5,3	4,6	4,7	5,7
Promedio	4,26	4,3	5,16	4,58	4,6	5,34

Fuente. Elaboración propia.

Paralelamente a la evaluación de la eficiencia del coagulante, se realizó un análisis espacial utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para investigar la relación entre la dinámica de la precipitación y las fluctuaciones en la turbidez del agua

cruda en la zona de estudio. La elaboración de mapas de isoyetas permitió visualizar una correlación directa entre los eventos de precipitación de alta intensidad y el incremento significativo en los niveles de turbidez del agua.

Figura 2. Promedio de variación por dosificación.



Fuente. Elaboración propia.

Este hallazgo subraya la vulnerabilidad de la fuente hídrica ante la variabilidad climática y resalta la necesidad de implementar estrategias de potabilización más robustas y resilientes. En este contexto, el uso del extracto de *Moringa oleifera* se presenta como una alternativa tecnológica sostenible, particularmente adecuada para optimizar el proceso de tratamiento en escenarios de alta variabilidad hidrológica, como los influenciados por eventos de precipitación extremos.

Los resultados obtenidos en esta investigación se alinean con los requisitos de calidad de agua apta para el consumo humano establecidos en la Resolución 0622 de 2020 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, la cual define los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua para consumo humano.

Para una interpretación detallada de los hallazgos, se incluye en el anexo la tabla que resume los datos brutos y calculados de las pruebas de jarras, así como el mapa de isoyetas que espacializa la relación entre precipitación y turbidez en la cuenca de captación del acueducto Mariano Ospina.

Resultados fase 2

Luego de la primera fase del estudio, en la que se estableció la dosis óptima del extracto de *Moringa oleifera* para la remoción de turbidez, se desarrolló una segunda etapa experimental orientada a evaluar la estabilidad del tratamiento en el tiempo. Esta fase tuvo como propósito analizar las variaciones del pH y la turbidez del agua tratada con diferentes concentraciones del coagulante natural durante un periodo de 168 horas, con el fin de determinar la

eficiencia sostenida del biocoagulante y su influencia sobre las condiciones fisicoquímicas del recurso hídrico.

Los valores iniciales de pH fueron de 6,0 en todas las muestras, observándose un ligero incremento tras la aplicación del coagulante, alcanzando valores entre 6,8 y 7,0. Después de 168 horas, el pH se mantuvo estable, con variaciones mínimas que oscilaron entre 6,5 y 7,0, lo que indica que la adición del extracto no generó alteraciones significativas en la alcalinidad del agua tratada. En cuanto a la turbidez, se observó una reducción progresiva en función de la dosis aplicada.

La turbidez inicial de 50,1 NTU disminuyó notablemente tras el tratamiento y continuó reduciéndose durante las 168 horas de reposo, alcanzando valores entre 8,2 y 1,8 NTU, según la concentración de moringa utilizada. Las dosis de 0,07 g, 0,08 g y 0,09 g presentaron los mejores resultados, con remociones superiores al 90 % respecto a la turbidez inicial.

La Tabla 2 resume los valores registrados de pH y turbidez antes del tratamiento, inmediatamente después y tras 168 horas de sedimentación:

Tabla 2. Promedio de variación por dosificación de fase.

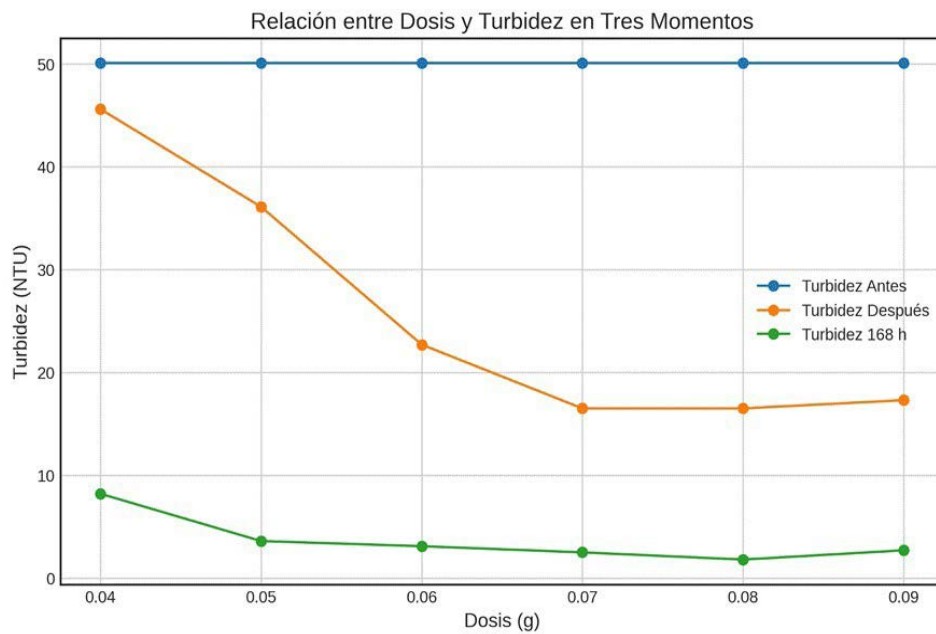
Dosis (g)	pH Antes	pH Después	pH 168 h	Turbidez antes (NTU)	Turbidez después (NTU)	Turbidez 168 h (NTU)
0,04	6	6,8	6,5	50,1	45,6	8,2
0,05	6	6,9	6,5	50,1	36,1	3,6
0,06	6	6,8	6,5	50,1	22,7	3,1
0,07	6	6,9	6,5	50,1	16,5	2,5
0,08	6	7	7	50,1	16,5	1,8
0,09	6	7	6,5	50,1	17,3	2,7

Fuente. Elaboración propia.

Los resultados confirman que el extracto de *Moringa oleifera* actúa eficazmente como coagulante natural, reduciendo la turbidez sin afectar significativamente el pH del agua (Figura 3).

Este comportamiento sugiere que el biocoagulante puede emplearse de forma segura en sistemas de tratamiento rural sin generar impactos negativos sobre la calidad química del recurso.

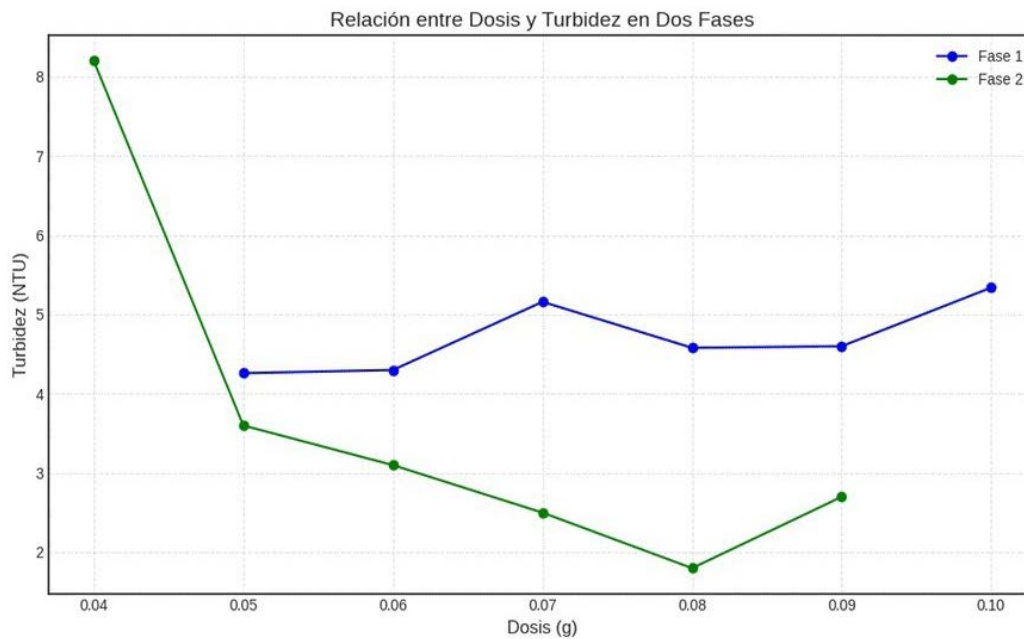
Figura 3. Promedio de variación por dosificación.



Fuente. Elaboración propia.

Comparación

Figura 4. Comparación fase 1 y fase 2.



Fuente. Elaboración propia.

La comparación entre la fase 1 y la fase 2 del tratamiento revela diferencias significativas en la eficiencia de remoción de turbidez según la dosis y el tiempo de exposición (Figura 4).

En la fase 1, con dosis entre 0,05 g y 0,10 g, los valores de turbidez oscilaron entre 4,26 y 5,34 NTU, sin una tendencia clara de mejora, lo que sugiere una efectividad limitada del tratamiento en ese momento.

En cambio, la fase 2, con dosis entre 0,04 g y 0,09 g y un periodo de exposición prolongado de 168 horas, mostró una reducción marcada de la turbidez, alcanzando valores tan bajos como 1,8 NTU, especialmente con la dosis de 0,08 g.

Estos resultados evidencian que el tiempo de contacto es un factor determinante para optimizar el proceso de clarificación y que dosis moderadas pueden ser más efectivas si se les permite actuar durante un periodo adecuado.

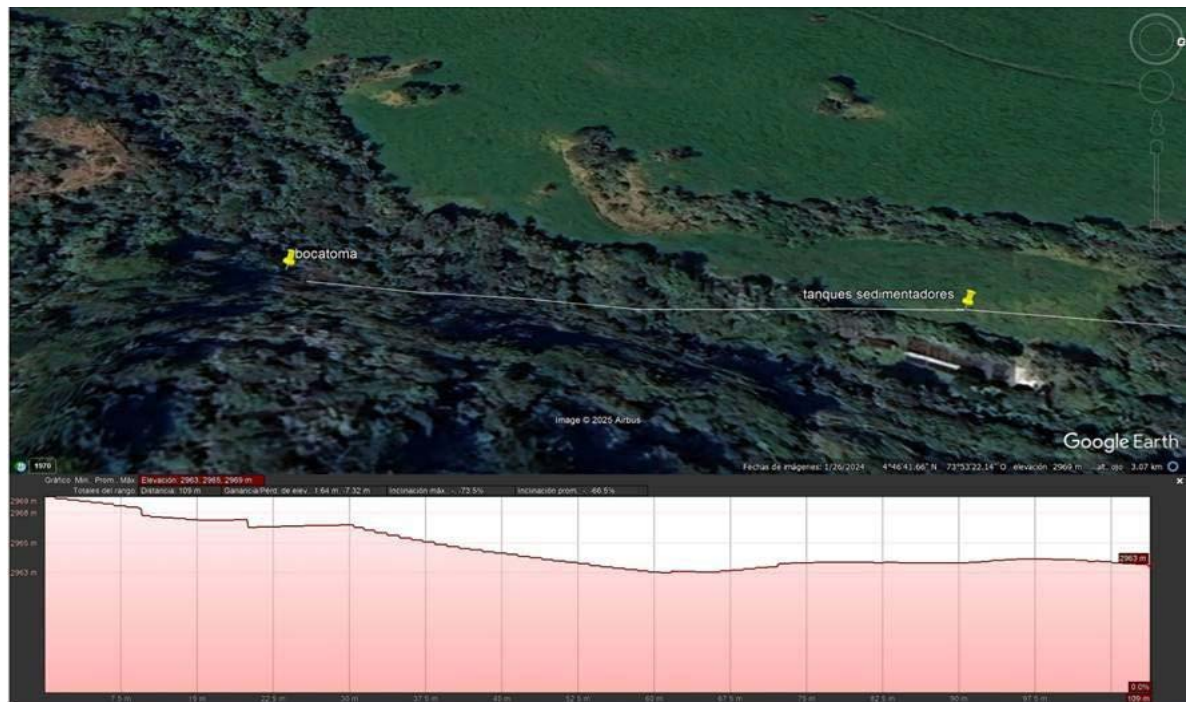
Como parte del componente técnico de esta investigación, se desarrolló un modelo hidráulico en EPANET para simular el comportamiento del sistema de tratamiento y distribución de agua del acueducto comunitario Mariano Ospina. Este modelo permitió evaluar la eficiencia de sistema bajo condiciones reales de operación, considerando la topografía del terreno, el perfil de elevación y las características estructurales del sistema (Figuras 5, 6, 7 y 8).

Figura 5. Diseño de la PTAP mediante Google Earth.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. Perfil de elevación ruta 1, Bocatoma - tanque sedimentador.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 7. Perfil de elevación ruta 2, tanque sedimentador - tanque clorador.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 8. Perfil de elevación ruta 3, tanque clorador - vereda.

Fuente. Elaboración propia.

Para el análisis normativo, con base en los resultados obtenidos en las pruebas de jarras, se realizó una comparación directa con los parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007, la cual define los límites máximos permisibles para el agua destinada al consumo humano. En particular, se evaluaron los valores de turbidez y pH residual tras el tratamiento con diferentes concentraciones de *Moringa oleifera*. En la fase 1, la dosis de 0,05 g/L logró una turbidez residual promedio de 4,26 NTU, valor que, si bien representa una reducción significativa respecto a la turbidez inicial (13 NTU), no cumple con el límite normativo de ≤ 2 NTU.

En la fase 2, con condiciones optimizadas de agitación y reposo, la dosis de 0,08 g/L alcanzó una turbidez final de 1,8 NTU

después de 168 horas, cumpliendo con el estándar establecido por la normativa. Este resultado demuestra que, bajo condiciones controladas, el extracto de moringa puede ser una alternativa técnicamente viable y legalmente aceptable para el tratamiento de agua en contextos rurales.

En cuanto al pH, se observó que todas las muestras tratadas mantuvieron valores dentro del rango permitido por la normativa (6,5 - 9,0), con variaciones mínimas entre 6,5 y 7,0. Esto indica que el uso del coagulante natural no altera significativamente la alcalinidad del agua.

Estos hallazgos permiten concluir que el tratamiento con *Moringa oleifera*, bajo condiciones adecuadas de dosificación y operación, puede cumplir con los requisitos

de calidad del agua establecidos por la legislación colombiana, lo que respalda su implementación como una tecnología apropiada en sistemas comunitarios de abastecimiento.

El análisis económico y social realizado en esta investigación permitió identificar múltiples beneficios derivados del uso de *Moringa oleifera* como coagulante natural en el tratamiento de agua potable en contextos rurales. A partir de la revisión bibliográfica, la caracterización territorial del municipio de Guasca y la comparación con tecnologías convencionales, se obtuvieron los siguientes hallazgos:

- **Reducción de costos operativos:**

El uso de la moringa permite disminuir significativamente el gasto en insumos químicos, que representan una parte considerable del presupuesto de operación en plantas de tratamiento rurales. Al ser una especie de fácil cultivo y procesamiento local, se elimina la dependencia de proveedores externos y se promueve el aprovechamiento de recursos naturales disponibles en el territorio.

- **Accesibilidad tecnológica:**

La preparación del coagulante a partir de semillas secas y trituradas puede realizarse con herramientas básicas, sin necesidad de infraestructura especializada. Esto facilita su adopción por comunidades rurales con limitaciones técnicas y económicas, y permite replicar el proceso en otros sistemas comunitarios.

- **Autonomía comunitaria:**

La implementación de tecnologías apropiadas como el uso de la moringa fortalece la autosuficiencia de las comunidades en la gestión del recurso hídrico. Al reducir la necesidad de insumos industriales, se promueve una mayor participación local en los procesos de tratamiento, mantenimiento y monitoreo del sistema.

- **Impacto ambiental positivo:**

A diferencia de los coagulantes químicos, el extracto de moringa no genera residuos tóxicos ni altera significativamente la composición química del agua tratada. Esto contribuye a la protección de los ecosistemas locales y a la sostenibilidad del sistema de abastecimiento.

Conclusiones

En ambas fases experimentales se comprobó la eficacia del extracto de semillas de *Moringa oleifera* en la reducción de la turbidez del agua cruda del acueducto Mariano Ospina. La fase 1 mostró disminuciones moderadas con dosis entre 0,05 g y 0,10 g, mientras que en la fase 2, bajo condiciones optimizadas, se alcanzó una turbidez residual de 1,8 NTU, cumpliendo con la Resolución 2115 de 2007. Estos resultados validan la viabilidad técnica y normativa del coagulante natural en sistemas comunitarios rurales, con remociones superiores al 90 % y estabilidad en el pH durante procesos prolongados de sedimentación.

La investigación también evidenció la correlación entre lluvias intensas y el incremento de la turbidez mediante cartografía en SIG, aportando herramientas para anticipar escenarios críticos. Además, se consolidó un protocolo experimental replicable y se diseñó un modelo hidráulico en EPANET, confirmando la compatibilidad del sistema con tecnologías apropiadas como la moringa. En conjunto, los hallazgos destacan la importancia de esta alternativa accesible, biodegradable y de bajo costo, la cual fortalece la autosuficiencia comunitaria y ofrece beneficios sociales, ambientales y técnicos para la gestión sostenible del agua en áreas rurales.

Referencias

- Liñán, C. M. (2010). *La Moringa, el árbol milagroso*. Centro de Agricultura Tropical.
- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (4 de julio de 2007). Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (20 de abril de 2020). Resolución 0622 de 2020. Por la cual se adopta el protocolo de inspección, vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano suministrada por personas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto en zona rural, y se dictan otras disposiciones. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/resolucion-622-de-2020.pdf>
- Parrotta, J. A. (1993). *Moringa oleifera Lam.: Reseda, horseradish tree, benzolive tree*. USDA Forest Service.
- Sánchez-Peña, R. S. y Martínez-Ávila, J. (2013). Evaluación del uso de la semilla de *Moringa oleifera* en el tratamiento de aguas turbias. *Revista Colombiana de Química*, 42(1), 41-49.

Diseño teórico y estructuración de un esparcible tipo margarina a partir de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) mediante fraccionamiento físico: una alternativa nutricionalmente superior

Theoretical design and structuring of a margarine-type spread from sachá inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.) by physical fractionation: A nutritionally superior alternative

Gómez Cardenas, E. F. y Hoyos Leyva, J. D.*

Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2021 / Fecha de aceptación: julio de 2021

Resumen

El aceite de sachá inchi, ampliamente distribuido en regiones amazónicas de Sudamérica, ha experimentado un crecimiento sostenido debido a su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, particularmente omega-3 y omega-6, asociados con beneficios para la salud humana. No obstante, su consumo permanece limitado por su presentación tradicional en forma líquida. En este estudio se diseñó teóricamente un proceso para la obtención de un producto esparcible a partir de aceite de sachá inchi, con el objetivo de diversificar sus formas de consumo y aumentar su valor agregado.

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas del aceite proveniente de la variedad Catio-2, así como las alternativas tecnológicas disponibles para su estructuración sin comprometer su perfil lipídico. El fraccionamiento fue identificado como el método más viable para la adecuación de grasas, al permitir la conservación de ácidos grasos esenciales y compuestos bioactivos mediante procesos físicos que no inducen modificaciones químicas significativas. A partir de una revisión sistemática de literatura, se estableció una formulación base y las operaciones unitarias necesarias para la producción de una margarina untable.

El diseño incluyó un balance de masa que evidenció que, por cada 1000 g de aceite de sachá inchi procesado, se obtienen aproximadamente 126 g de producto final, bajo condiciones

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

específicas de formulación. Asimismo, se desarrolló un diagrama de operaciones que integra los equipos y condiciones requeridas para su producción. Los resultados sugieren la viabilidad tecnológica de transformar este aceite en un sistema semisólido con propiedades nutricionales destacadas, capaz de competir frente a productos comerciales convencionales.

Palabras clave: alimentos funcionales, fraccionamiento de grasas, diseño de procesos, estructuración lipídica.

Abstract

Sacha inchi oil, widely distributed across Amazonian regions of South America, has experienced sustained growth due to its high content of polyunsaturated fatty acids, particularly omega-3 and omega-6, which are associated with beneficial effects on human health. However, its consumption remains limited by its conventional liquid presentation. In this study, a process for producing a spreadable product from sachá inchi oil was theoretically designed, aiming to diversify its forms of consumption and increase its added value.

The physicochemical properties of the oil obtained from the Catio-2 variety were analyzed, along with available technological alternatives for lipid structuring without compromising its fatty acid profile. Fractionation was identified as the most suitable method for fat modification, as it preserves essential fatty acids and bioactive compounds through physical processes that do not induce significant chemical changes. Based on a systematic literature review, a base formulation and the required unit operations for producing a spreadable margarine were established.

The design included a mass balance showing that, for every 1000 g of sachá inchi oil processed, approximately 126 g of final product can be obtained under specific formulation conditions. Additionally, a process flow diagram was developed, integrating the equipment and operational conditions required for production. The findings suggest the technological feasibility of transforming this oil into a semisolid system with enhanced nutritional properties, capable of competing with conventional commercial products.

Keywords: Functional foods, fat fractionation, process design, lipid structuring.

Introducción

El aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.), originario de la región amazónica de Sudamérica, ha despertado un creciente interés en la ciencia y tecnología de alimentos debido a su excepcional perfil nutricional, caracterizado por un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente omega-3 y omega-6 (Wang *et al.*, 2018). Este aceite presenta proporciones elevadas de ácido α -linolénico (omega-3), linoleico (omega-6) y, en menor medida, oleico (omega-9) (Muangrat *et al.*, 2018), lo que le confiere propiedades funcionales asociadas con la prevención de enfermedades cardiovasculares, la modulación de procesos inflamatorios y el adecuado desarrollo neurológico (Valenzuela *et al.*, 2011; Saavedra *et al.*, 2012). Asimismo, la semilla de sachá inchi contiene entre el 28 y el 33 % de proteína, con una composición relevante de aminoácidos esenciales, así como compuestos bioactivos como tocoferoles y tocotrienoles, que potencian su valor nutracéutico (Singanusong y Jiamyangyuen, 2020).

Apesar de estas ventajas, el aprovechamiento agroindustrial del aceite de sachá inchi continúa siendo limitado, concentrándose principalmente en su comercialización en estado líquido. Esta restricción reduce su versatilidad tecnológica y limita su incorporación en matrices alimentarias de mayor valor agregado. En este contexto, la estructuración lipídica emerge como una estrategia clave para transformar aceites líquidos en sistemas semisólidos, tales como productos esparcibles, sin comprometer la integridad de sus componentes funcionales (Mattice *et al.*, 2020).

La producción de margarinas y esparcibles ha dependido tradicionalmente de procesos como la hidrogenación, asociados con la formación de ácidos grasos trans y con efectos adversos para la salud (Shukla, 2019). Alternativamente, técnicas como el fraccionamiento físico permiten modificar las propiedades reológicas y estructurales de los aceites manteniendo su perfil lipídico original, evitando pérdidas significativas de compuestos esenciales (Guo *et al.*, 2020). Este enfoque resulta particularmente relevante para el desarrollo de alimentos funcionales más saludables y alineados con las tendencias actuales del consumidor.

En Colombia, el mercado de productos esparcibles muestra una creciente demanda de alternativas más saludables; sin embargo, la oferta basada en materias primas no convencionales, como el aceite de sachá inchi, es aún incipiente (Benitez *et al.*, 2018). En este sentido, el presente estudio plantea el diseño teórico de un proceso para la obtención de un producto esparcible a partir de aceite de sachá inchi, integrando criterios fisicoquímicos, tecnológicos y normativos, con el fin de ampliar sus aplicaciones y fortalecer su posicionamiento en la cadena agroindustrial.

Materiales y métodos

El diseño del proceso productivo para la obtención de un esparcible de mesa a partir de aceite de sachá inchi se desarrolló mediante una investigación de carácter teórico-descriptivo, basada en una revisión sistemática de literatura científica y técnica.

Esta aproximación permitió estructurar las etapas del proceso, la formulación del producto y la selección de variables operacionales, en coherencia con los objetivos planteados.

Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Inicialmente, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de la nuez y del aceite de sachá inchi, con énfasis en su composición lipídica y en el contenido de ácidos grasos esenciales. Se compararon tres variedades de semilla, priorizando aquella con mayor rendimiento en aceite y mayor concentración de compuestos bioactivos. Asimismo, se evaluó el impacto del proceso de extracción mediante prensado en frío sobre la estabilidad y conservación de los ácidos grasos, con el fin de garantizar la calidad nutricional de la materia prima seleccionada.

Adecuación de grasas

La estructuración del aceite se abordó mediante un análisis comparativo de los principales métodos de modificación de grasas utilizados en la industria (hidrogenación, interesterificación y fraccionamiento). Se seleccionó el fraccionamiento físico como alternativa tecnológica, debido a su capacidad para preservar la integridad de los ácidos grasos insaturados y evitar la formación de compuestos indeseables, como los ácidos grasos trans.

Este proceso permitió obtener fracciones diferenciadas (oleína y estearina) con propiedades funcionales adecuadas para la formulación del producto.

Formulación y balance de masa

La formulación del esparcible se estableció a partir de la revisión de modelos reportados en la literatura, considerando la interacción entre la fase grasa y la fase acuosa, así como el uso de emulsificantes, conservantes y antioxidantes. Se realizó un balance de masa tomando como base 1000 g de aceite de sachá inchi como flujo de entrada.

Tras el proceso de fraccionamiento, se obtuvieron 61,9 g de estearina y 41,26 g de oleína, constituyendo la fase grasa (103,17 g). Posteriormente, se incorporaron aditivos en proporciones controladas, incluyendo vitamina D (0,018 g) y antioxidantes (0,001 g).

La fase acuosa se formuló mediante la adición de agua, sal (20 %), lecitina (2 %) y benzoato de sodio (0,1 %), obteniendo un flujo de 22,80 g. La integración de ambas fases dio lugar a un flujo total de 126 g de producto final. Para efectos del diseño teórico, se asumió un sistema sin pérdidas.

Variables de proceso y selección de equipos

Se identificaron variables críticas del proceso, incluyendo temperatura, pH, contenido de grasa sólida y condiciones de emulsificación, las cuales influyen directamente en la estabilidad, la textura y la calidad sensorial del producto. Asimismo, se definieron las operaciones unitarias necesarias, tales como mezcla, homogeneización, enfriamiento y cristalización controlada, junto con los equipos requeridos para su implementación a escala industrial.

Consideraciones normativas

El diseño del producto se ajustó a los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 241 (ICONTEC, 2002), la cual regula la composición, las propiedades fisicoquímicas y el uso de aditivos en margarinas y esparcibles de mesa. Se verificó que la formulación propuesta cumpliera con los requisitos de contenido graso, humedad, aditivos permitidos y calidad bromatológica, garantizando su viabilidad para una eventual aplicación comercial.

Resultados y discusiones

La investigación permitió determinar las características fisicoquímicas y nutricionales del aceite de sachá inchi, así como las variables clave del proceso y las operaciones unitarias necesarias para la obtención de un producto esparcible de mesa.

Características fisicoquímicas de aceite de sachá inchi

La caracterización fisicoquímica del aceite de sachá inchi constituye un elemento fundamental para evaluar su viabilidad como materia prima en la formulación de esparcibles de mesa con valor agregado nutricional. Los resultados evidencian que este aceite presenta un perfil lipídico altamente insaturado, con aproximadamente un 93 % de ácidos grasos insaturados (Nguyen et al., 2020), lo que lo posiciona como una de las fuentes vegetales más ricas en este tipo de compuestos (Wang et al., 2018).

En particular, se destaca la presencia de ácidos grasos esenciales, incluyendo ácido linoleico (-6) y ácido -linolénico (-3), los cuales, en conjunto con el ácido oleico (-9), representan cerca del 84 % de la composición total del aceite (Tabla 1).

Tabla 1. Composición del aceite de sachá inchi.

Información nutricional por 100 g de aceite	
Vitamina A	350 - 690 µg
Vitamina E	17 - 226 mg
Palmítico C 16:0	3,0 - 6,0 %
Esteárico C 18:0	2,0 - 3,5 %
Oleico C 18:1	8,0 - 12,0 %
Linoleico (omega 6) C 18:2	32,0 - 38,0 %
Linolénico (omega 3) C 18:3	42,0 - 52,0 %
Total ácidos grasos saturados	6,0 - 8,0 %
Total ácidos grasos insaturados	92,0 - 94,0 %

Fuente. Elaboración propia.

Este perfil lipídico no solo es relevante desde el punto de vista nutricional, sino que también influye directamente en las propiedades funcionales del aceite, tales como su comportamiento reológico, su susceptibilidad a la oxidación y su capacidad de estructuración en sistemas emulsificados (Hashempour-Baltork *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020). Adicionalmente, el aceite de sachá inchi contiene compuestos bioactivos de interés, incluyendo proteínas residuales, aminoácidos y una fracción significativa de vitamina E en forma de tocoferoles y tocotrienoles, los cuales contribuyen a su estabilidad oxidativa y a su potencial funcional en sistemas alimentarios (Singanusong y Jiamyangyuen, 2020).

Comparativamente, frente a otras semillas oleaginosas de uso convencional en la industria margarina, el sachá inchi presenta un contenido significativamente mayor de ácidos grasos insaturados y esenciales (Bobo *et al.*, 2021), lo que lo convierte en una alternativa prometedora para el desarrollo de productos más saludables. Esta ventaja nutricional, sin embargo, implica desafíos tecnológicos asociados con la estabilidad oxidativa y estructural del producto final, los cuales deben ser abordados mediante un diseño adecuado del proceso.

Producción de margarina con aceite de sachá inchi

Proceso de modificación de grasas (fase grasa)

Para la incorporación del aceite de sachá inchi como materia prima en margarinas esparsibles, resulta indispensable la

adecuación de sus propiedades mediante procesos de modificación de grasas, con el fin de alcanzar las características reológicas y estructurales requeridas para este tipo de sistemas. De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 241 (2002), estos productos deben presentar un contenido graso igual o superior al 80 %, lo que hace crítico el control del contenido de grasa sólida dentro de la formulación.

En la industria de producción de margarina, la modificación lipídica se ha realizado tradicionalmente mediante hidrogenación, interesterificación o combinaciones de ambos procesos (Shukla, 2019). No obstante, la hidrogenación induce cambios estructurales en los ácidos grasos, particularmente mediante la isomerización de configuraciones *cis* a *trans*, afectando compuestos esenciales como el ácido linolénico y generando implicaciones negativas para la salud, como alteraciones en los niveles de colesterol (Zhao *et al.*, 2018). Por su parte, la interesterificación, aunque permite redistribuir los ácidos grasos en los triacilglicéridos, puede inducir reacciones secundarias como descomposición o polimerización, comprometiendo la estabilidad del sistema (Sivakanthan y Madhujith, 2020).

En contraste, el fraccionamiento físico se establece como una alternativa tecnológica más adecuada, al permitir la separación de fracciones lipídicas sin alterar químicamente su estructura (Timms, 2018). En particular, el fraccionamiento en seco se basa en un tratamiento termo-mecánico mediante filtración a presión en prensas de membrana, operando en condiciones adiabáticas y sin el uso de catalizadores (Ashfaq *et al.*, 2020).

Durante este proceso, la oleína se separa progresivamente de la estearina, preservando la integridad de los ácidos grasos y minimizando los fenómenos de oxidación (Tong *et al.*, 2021).

A partir de la composición del aceite de sachá inchi, la fracción líquida (oleína) representa aproximadamente el 93,69 %, rica en ácidos grasos insaturados (ω -3, ω -6 y ω -9), mientras que la fracción sólida (estearina) corresponde al 6,19 %, compuesta principalmente por ácidos grasos saturados.

Estas proporciones constituyen la base para el diseño de la fase grasa.

Con base en la evidencia reportada, se definió una relación de 40 % de fase sólida (estearina) y 60 % de fase líquida (oleína), lo que permite alcanzar un equilibrio adecuado entre estabilidad estructural, viscosidad y capacidad de dispersión (Tabla 2).

En el presente estudio, considerando las condiciones climáticas de Bogotá (~19 °C), se espera una mayor estabilidad del sistema.

Tabla 2. Cantidades de ingredientes para la fase grasa.

Contenido en fase grasa	
Ingrediente	Cantidad
Estearina de sachá inchi	40 g grasa/100 g margarina
Oleína de sachá inchi	60 g aceite/100 g margarina
Vitamina D (ergocalciferol)	17 mg por cada 100 g de margarina
Antioxidante (ácido ascórbico)	10 mg/kg margarina

Fuente. Elaboración propia.

La adición de vitamina D se estableció con base en rangos reportados para margarinas comerciales (10–17 mg/100 g), seleccionando el valor superior con el fin de potenciar el perfil nutricional del producto.

Asimismo, la incorporación de ácido ascórbico como antioxidante responde a la necesidad de proteger los ácidos grasos insaturados frente a procesos de oxidación, los cuales pueden afectar negativamente los atributos sensoriales y la calidad nutricional del producto (Osuna *et al.*, 2018).

Fase acuosa

En paralelo, la fase acuosa se prepara en un sistema independiente de la fase grasa, conformado por diferentes corrientes de alimentación: un tanque de agua y salmuera, un tanque de emulsificantes y conservantes y una fracción de aditivos hidrosolubles. El agua utilizada debe cumplir con estándares de potabilidad, estar libre de microorganismos y presentar baja dureza, a fin de evitar interferencias en la estabilidad de la emulsión.

Este sistema suele incorporar mecanismos de calentamiento que facilitan la disolución de componentes minoritarios y previenen fenómenos de precristalización durante la premezcla con la fase grasa. Cambios amplios de temperatura pueden inducir heterogeneidad y una deficiente interacción entre fases, afectando negativamente la estructura final del producto (Gutiérrez y Vásquez, 2016).

El primer tanque de alimentación de la fase acuosa está constituido por una mezcla de 75 % de agua y 25 % de sal, a partir de la cual se obtiene una salmuera que se dosifica en un 20 % respecto al peso total del sistema. Esta solución debe presentar características fisicoquímicas adecuadas: ausencia de contaminantes de origen biológico, orgánico o inorgánico, así como propiedades sensoriales aceptables (incolora, inodora y de sabor agradable). La sal cumple una doble función tecnológica: actúa como agente conservante al inhibir el crecimiento microbiano y contribuye al perfil sensorial del producto final (Panero y Pérez, 2014).

El sistema incorpora un tanque destinado a la adición de emulsionantes, donde la lecitina es ampliamente utilizada en formulaciones de esparcibles de mesa. La selección y dosificación de este compuesto dependen de su balance hidrofílico-lipofílico (HLB), parámetro que define su afinidad relativa por las fases acuosa y lipídica. En sistemas tipo agua en aceite (W/O), como la margarina, se requieren emulsionantes con un bajo valor de HLB, dado que presentan mayor solubilidad en la fase grasa y favorecen la estabilidad de la emulsión (Zhu *et al.*, 2019).

La calidad de la lecitina constituye un factor crítico en el desempeño del producto final. Se ha reportado que lecitinas de baja calidad pueden inducir defectos sensoriales, tales como sabores residuales a pescado o grasa, incluso a concentraciones inferiores al 0,5 %. En este contexto, se seleccionó lecitina blanqueada debido a su mayor estabilidad sensorial y a su mejor comportamiento funcional en rangos de adición entre 0,10 % y 0,50 %. Adicionalmente, la normativa alimentaria establece un límite máximo de incorporación de lecitina de 0,50 % en productos de este tipo (Jiménez, 2017).

Desde el punto de vista tecnológico, diversos estudios han evidenciado el efecto de la lecitina sobre la cinética de cristalización de sistemas lipídicos. En particular, Furlán *et al.* (2017) demostraron que la adición de 0,2 % (p/p) de lecitina en mezclas de manteca de cacao y azúcar reduce significativamente el tiempo de inducción o nucleación, acelerando la formación de cristales en un rango de temperatura entre 25 y 30 °C. Este comportamiento es altamente deseable en la producción de margarinas, ya que contribuye al desarrollo de una estructura cristalina más homogénea y de mejores propiedades reológicas.

Con base en estos antecedentes, se estableció una dosificación de lecitina del 0,2 % (p/p), incorporada en un tanque agitador operado a 30 °C, en conjunto con el conservante. En cuanto a este último, se emplea benzoato de sodio en bajas concentraciones, con el fin de minimizar posibles interferencias sensoriales, en concordancia con el Reglamento Sanitario de los Alimentos, que permite una concentración máxima de 1 g/kg de producto terminado (Schmidt-Hebbel, 1990).

Formación de la emulsión

Una vez finalizadas las etapas de preparación de la fase grasa y la fase acuosa, se procede a la formación de la emulsión, etapa crítica para garantizar la homogeneidad y estabilidad del sistema. En esta operación, la fase lipídica (grasas y aceites) se incorpora al tanque que contiene la fase acuosa, asegurando una adecuada dispersión de los componentes mediante condiciones controladas de temperatura y agitación.

Con el fin de favorecer la miscibilidad y la interacción con los emulsionantes y compuestos liposolubles, la mezcla se somete a calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 49 °C. Este sistema opera con un agitador de paletas a una velocidad de 20 rpm, condiciones que influyen directamente en la precristalización de la emulsión.

Estas variables permiten generar una estructura inicial adecuada, la cual será determinante en la etapa posterior de enfriamiento y cristalización.

La literatura reporta que la combinación de temperatura y caudal tiene un efecto significativo sobre la calidad cristalina del producto. En particular, condiciones de operación cercanas a 49 °C y caudales entre 1630 y 1650 kg/h favorecen la formación de cristales tipo β' , los cuales están asociados con mejores propiedades reológicas, plasticidad y estabilidad en margarinas, especialmente bajo esquemas de procesamiento semicontinuo (Salas et al., 2012).

Proceso de cristalización

La cristalización de la emulsión se lleva a cabo mediante un sistema continuo y cerrado, conocido como intercambiador de calor de superficie rascada. Este equipo está constituido por un cilindro de acero inoxidable con un eje central rotatorio que deja un espacio anular de aproximadamente 5-10 mm, ocupado por palas raspadoras acopladas al eje.

El enfriamiento de la emulsión se realiza a través de una camisa externa por la cual circula un refrigerante, típicamente amoníaco líquido, lo que permite alcanzar temperaturas cercanas a -5 °C. La emulsión, impulsada por una bomba de alta presión, entra en contacto con las paredes frías del cilindro, lo que induce una rápida transferencia de calor.

Las palas, operando a velocidades cercanas a 500 rpm, remueven continuamente el material cristalizado de la superficie, facilitando un enfriamiento uniforme y, simultáneamente, promoviendo el amasado del producto.

Las condiciones de alta presión y cizalla generan una nucleación acelerada durante tiempos de residencia cortos (5-10 s), lo que favorece la formación de una microestructura cristalina homogénea.

No obstante, el tiempo total requerido para alcanzar un grado adecuado de cristalización es del orden de seis minutos, lo cual es consistente con lo reportado en sistemas industriales de producción de margarinas (González Cantoñi, 2009).

Caracterización de los equipos

Proceso 1: Transformación de grasas

La modificación de grasas se realiza mediante un filtro prensa que permite el fraccionamiento del aceite de sachá inchi en sus fracciones líquida (oleína) y sólida (estearina). Este equipo opera a presiones cercanas a 16 bares y está compuesto por placas de cámara y membrana accionadas hidráulicamente. El aceite se introduce en las cámaras, donde la membrana inflable ejerce presión, facilitando la separación de la fase líquida y reteniendo la fase sólida en las placas.

Este proceso permite incrementar el contenido de grasa sólida, cumpliendo con los requerimientos establecidos por la normativa para margarinas (Hendrix *et al.*, 2016).

Proceso 2: Preparación de fases

La preparación de las fases grasa y acuosa se realiza en sistemas independientes de mezclado. La fase grasa se homogeniza en un tanque con agitación constante de 20 rpm. Por su parte, la fase acuosa se compone de dos tanques: el primero (agua y salmuera) opera a 10 rpm para asegurar la completa disolución; el segundo (emulsionantes y conservantes) se mantiene a 60 °C para evitar la formación de agregados.

Posteriormente, ambas fases se combinan en un tanque de mezcla a 49 °C y 20 rpm, generando una emulsión inicial adecuada para la cristalización.

Proceso 3: Cristalización

La emulsión es transferida al intercambiador de superficie rascada, donde ocurre un enfriamiento rápido mediante un choque térmico inducido por amoníaco a bajas temperaturas (-5 °C). Este proceso maximiza la eficiencia de la transferencia de calor y permite obtener una estructura cristalina uniforme, fundamental para la calidad del producto final.

Proceso 4: Empaque

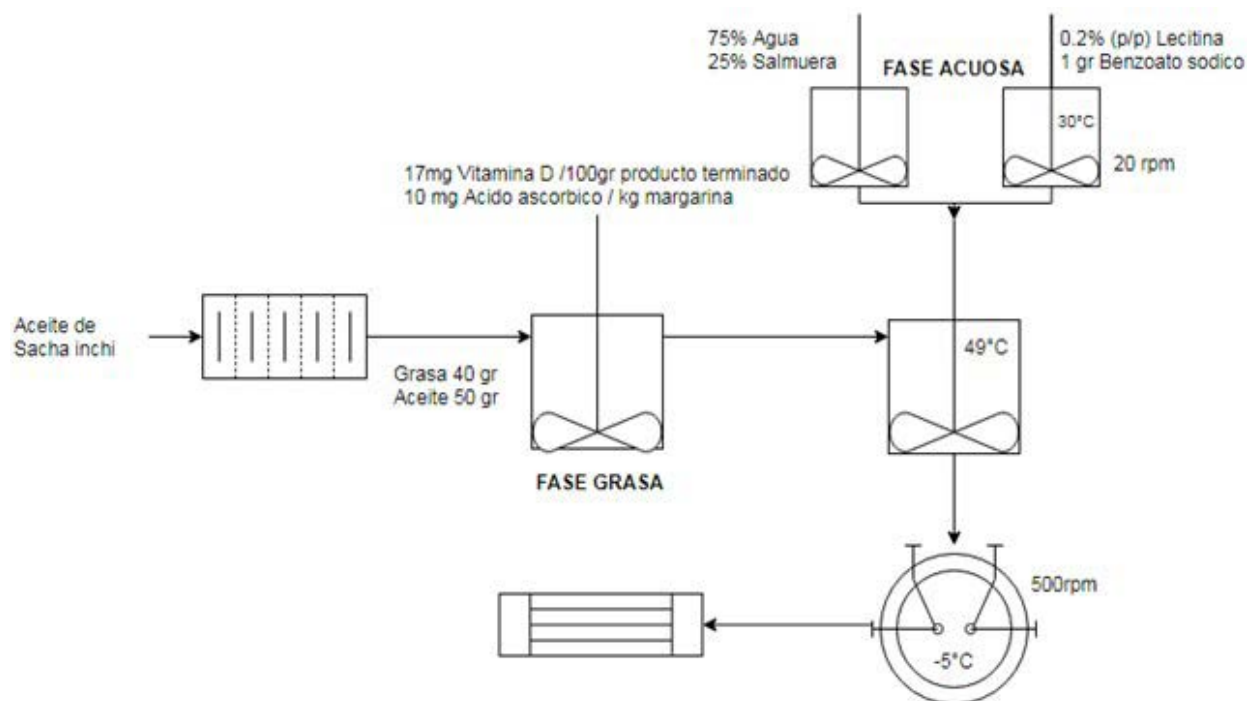
Finalmente, el producto pasa por un tubo de reposo con sistema de enfriamiento a -6 °C, donde se incrementa su consistencia. Este acondicionamiento facilita el envasado y asegura la estabilidad estructural del producto durante su almacenamiento (Jiménez, 2017).

Diseño del proceso

El conjunto de operaciones descritas se integra en un diagrama operacional (Figura 1), el cual sintetiza la secuencia de etapas, las condiciones de operación y la interacción entre fases.

Este diseño, fundamentado en una revisión bibliográfica, permite establecer un sistema de producción optimizado que garantiza propiedades reológicas, bromatológicas y nutricionales adecuadas en una margarina esparcible a partir de aceite de sachá inchi, la cual se destaca por su alto contenido de ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos.

Figura 1. Diagrama del proceso por operación para la elaboración de margarina esparcible de mesa a partir del aceite de sachá inchi.



Fuente. Elaboración propia.

Conclusiones

El presente estudio demuestra la viabilidad técnica y nutricional del aceite de sachá inchi como materia prima para la elaboración de esparcibles tipo margarina, destacándose por su elevado contenido de ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos.

La selección del fraccionamiento en seco como método de modificación lipídica permitió preservar la integridad estructural de los ácidos grasos, evitando la formación de isómeros trans asociados a procesos convencionales como la hidrogenación. Esta estrategia, junto con la proporción

óptima de oleína y estearina (60:40), permitió obtener una fase grasa con propiedades adecuadas de estabilidad, plasticidad y comportamiento reológico.

La formulación propuesta, basada en evidencia bibliográfica y en el cumplimiento de la normativa NTC 241, logró integrar eficientemente componentes liposolubles e hidrosolubles, favoreciendo la estabilidad de la emulsión y la calidad sensorial del producto.

Asimismo, las condiciones de proceso definidas para la emulsificación y cristalización promovieron la formación de cristales tipo β' , fundamentales para la textura y untabilidad del producto final.

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, el sistema diseñado mostró coherencia operativa y eficiencia, evidenciada en el balance de materia, con un rendimiento de aproximadamente 126 g de esparcible por cada 1000 g de aceite procesado.

En conjunto, estos resultados posicionan al aceite de sachá inchi como una alternativa promisorio para el desarrollo de productos grasos funcionales, alineados con las tendencias actuales de la industria alimentaria hacia formulaciones más saludables, sostenibles y libres de grasas trans.

Referencias

- Ashfaq, A., Clochard, M. C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ula ski, P. y Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877.
- Benítez, R., Coronell, C. y Martin, J. (2018). Chemical characterization sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) seed: oleaginosa promising from the Colombian Amazon. *International Journal of Current Science Research and Review*, 1(1), 1-12.
- Bobo, G., Nicolau Lapeña, I. y Aguiló Aguayo, I. (2021). Conventional oils and oilseeds: composition and nutritional importance. *Oil and oilseed processing: opportunities and challenges*, 23-40.
- Furlán, L. T. R., Baracco, Y., Lecot, J., Zaritzky, N. y Campderrós, M. E. (2017). Influence of hydrogenated oil as cocoa butter replacers in the development of sugar-free compound chocolates: Use of inulin as stabilizing agent. *Food Chemistry*, 217, 637-647.
- González Cantoñi, D. (2009). *Margarina*. Valle del Cauca - Colombia: Universidad del Valle Tecnología en Alimentos Manejo de Sólidos y Fluidos.
- Guo, Y., Cai, Z., Xie, Y., Ma, A., Zhang, H., Rao, P. y Wang, Q. (2020). Synthesis, physicochemical properties, and health aspects of structured lipids: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 759-800.
- Gutiérrez, C. E., y Vásquez, E. A. (2016). *Diseño de sistema automático para la dosificación de margarina en la empresa Lehmä*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Hashempour-Baltork, F., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S. y Savage, G. P. (2018). Chemical, rheological and nutritional characteristics of sesame and olive oils blended with linseed oil. *Advanced pharmaceutical bulletin*, 8(1), 107.
- Hendrix, M., Gibon, V. y Calliauw, G. (2016). Modificación de las grasas para agregar valor a los aceites de palma y de palmiste. *Revista palmas*, 173-183.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2002). *Higiene y seguridad. Colores y señales de seguridad* (NTC 241).

- Jiménez, D. (2017). *Estudio del proceso industrial para la fabricación de margarina*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Mattice, K. D., Wright, A. J. y Marangoni, A. G. (2020). Crystallization and rheological properties of milk fat. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 2: Lipids*, 219-244.
- Muangrat, R., Veeraphong, P. y Chantee, N. (2018). Screw press extraction of Sacha inchi seeds: Oil yield and its chemical composition and antioxidant properties. *Journal of food processing and preservation*, 42(6), e13635.
- Nguyen, H. C., Vuong, D. P., Nguyen, N. T. T., Nguyen, N. P., Su, C. H., Wang, F. M. y Juan, H. Y. (2020). Aqueous enzymatic extraction of polyunsaturated fatty acid-rich sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed oil: An eco-friendly approach. *LWT – Food Science and Technology*, 133, 109992.
- Osuna, M. B., Romero, C. A., Romero, A. M., Judis, M. A. y Bertola, N. C. (2018). Proximal composition, sensorial properties and effect of ascorbic acid and -tocopherol on oxidative stability of bread made with whole flours and vegetable oils. *LWT – Food Science and Technology*, 98, 54-61.
- Panero, M. y Perez, S. (2014). *Elaboración de margarina a base de aceite de girasol*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Saavedra, J. J. H., Silva, B. E. F., Pairazamán, P. I. E. y Minaya, K. Y. C. (2012). Efectos de la ingesta de *Plukenetia volubilis* Linneo o "Sachá inchi" en el perfil lipídico de adultos jóvenes. *Acta Médica Peruana*, 29(3), 155-160.
- Salas, Y., Tapia, I. y Garzón, M. (2012). Cristalización y plastificación de margarina industrial para panificación. *Química Central*, Vol. 2, 39-47.
- Shukla, V. K. (2019). Margarine and baking fats. En *Healthful lipids* (pp. 665-684). AOCS Publishing.
- Singanusong, R., y Jiamyangyuen, S. (2020). Effects of maturity on chemical composition and antioxidant activity of sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) cultivated in Northern Thailand. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 17(9), 998-1009.
- Sivakanthan, S. y Madhujith, T. (2020). Current trends in applications of enzymatic interesterification of fats and oils: A review. *LWT – Food Science and Technology*, 132, 109880.
- Schmidt-Hebbel, H. (1990). *Aditivos alimentarios y la reglamentación de los alimentos*. Santiago - Chile: Fundación Chile.
- Timms, R. E. (2018). Fractionation. En *Lipid technologies and applications* (pp. 199-222). Routledge.
- Tong, S. C., Tang, T. K. y Lee, Y. Y. (2021). A review on the fundamentals of palm oil fractionation: processing conditions and seeding agents. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(12), 2100132.

- Valenzuela, R., Tapia, G., González, M. y Valenzuela, A. (2011). Ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA) y su aplicación en diversas situaciones clínicas. *Revista chilena de nutrición*, 38(3), 356-367.
- Wang, S., Zhu, F. y Kakuda, Y. (2018). Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses. *Food chemistry*, 265, 316-328.
- Wang, C., Sun, C., Lu, W., Gul, K., Mata, A. y Fang, Y. (2020). Emulsion structure design for improving the oxidative stability of polyunsaturated fatty acids. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2955-2971.
- Zhao, Y., Ren, Y., Zhang, R., Zhang, L., Yu, D., Jiang, L. y Elfalleh, W. (2018). Preparation of hydrogenated soybean oil of high oleic oil with supported catalysts. *Food bioscience*, 22, 91-98.
- Zhu, Q., Pan, Y., Jia, X., Li, J., Zhang, M. y Yin, L. (2019). Review on the stability mechanism and application of water in oil emulsions encapsulating various additives. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 18(6), 1660-1675.

Microencapsulation strategies in ruminant nutrition: Advances in formulation, delivery systems, and functional applications

Estrategias de microencapsulación en la nutrición de rumiantes: avances en formulación, sistemas de administración y aplicaciones funcionales

Villamil-Galindo, E.¹, Jiménez-Marquéz, S.², Barrero-Echeverría, M.³ y Hoyos-Leyva, J. D.^{3*}

¹ Departamento de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

² Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

³ Grupo de Investigación e Innovación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2021 / **Fecha de aceptación:** julio de 2021

Abstract

This article aims to present the process of making microcapsules and its benefits within animal nutrition, more specifically for ruminants. The review was carried out through a study of the literature regarding the nutrition of ruminants and the elaboration of microcapsules in order to choose the appropriate procedure that meets the desired purpose. A spreadsheet was elaborated to allow us to gather and summarize all the information found relating to authors, processes, materials, and techniques to later analyze those that were more effective. Following this, the writing of the article began considering the information found that allowed us to recognize the application of different specific methods used in the animal nutrition industry, among which spray drying and spray cooling stand out as successful techniques in the field of encapsulation of compounds of interest to implement improvements in the nutrition of ruminants.

Keywords: Feed additives, encapsulation techniques, bioactive compounds, animal feed technology, nutrient delivery systems.

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

Resumen

El presente artículo de revisión pretende dar a conocer el proceso de elaboración de microencapsulados y sus beneficios dentro de la nutrición animal, más específicamente en rumiantes. La revisión se llevó a cabo mediante un estudio de la literatura respecto a la nutrición de rumiantes y la elaboración de los microencapsulados, esto con el fin de escoger el procedimiento adecuado que cumpla con el fin deseado. Se elaboró una tabla que permitiera reunir y resumir toda la información encontrada, relacionando autores, procesos, materiales y técnicas, para posteriormente analizar aquellos que tuvieran mayor efectividad. Seguido a esto, se inició la redacción del artículo teniendo presente la información encontrada, la cual permitió reconocer la aplicación de distintos métodos específicos usados en la industria de la nutrición animal, dentro de los cuales se encuentran el secado por aspersión y el enfriamiento por aspersión como técnicas exitosas en el campo del encapsulamiento de compuestos de interés para ejecutar mejoras en la nutrición de los rumiantes.

Palabras clave: aditivos alimentarios, técnicas de encapsulación, compuestos bioactivos, tecnología de alimentos para animales, sistemas de liberación de nutrientes.

Introduction

Microencapsulation is a technique in which an active material, in any state of aggregation, is coated with a matrix of wall material to protect it and to optimize its bioavailability and utilization within the organism. This coating allows the core material to be released in a controlled manner, through diffusion processes, at a specific site along the digestive tract where it can be absorbed and used effectively (Moschona & Liakopoulou-Kyriakides, 2018). A microparticle is composed essentially of two components: the core material, which corresponds to the active compound with a nutritional or functional effect, and the wall material, which acts as a protective barrier against external agents, thereby maintaining the integrity of the system until it reaches its target site of action (Contreras-Pacheco *et al.*, 2026).

Microcapsules are designed to release the core material at controlled rates under specific conditions, clearly differentiating between pre-ruminal and post-ruminal release phases in the case of ruminants (Contreras-Pacheco *et al.*, 2026). This capability for programmed release enables the encapsulated compound to be protected from adverse environmental factors such as light, oxygen, temperature, pH, acidity, and the presence of other reactive compounds, thereby preserving its chemical stability and biological activity (Thies, 2012). This controlled delivery mechanism is particularly important in ruminants, where the core material must bypass the harsh conditions of the rumen to be effectively absorbed in the lower gut.

Among the principal benefits of microencapsulation are the protection of the core material from critical environmental conditions (such as moisture, temperature, pH, oxidation, and light) and the preservation of the activity of sensitive bioactive compounds, including probiotics, non protein nitrogen, carbohydrates, lipids, vitamins, and proteins (Marcillo-Parra *et al.*, 2021). Furthermore, microencapsulation enables the controlled release of the active principle at a specific site within the organism, facilitating its absorption and reducing adverse reactions such as interference with the ruminal microbiota or premature loss of nutrients due to fermentation (Tolve *et al.*, 2021). By modifying the physical properties of the microcapsule, it is possible to balance the release and bioavailability of the compound, thereby improving its efficacy and reducing the need for frequent or excessive dosing (Tolve *et al.*, 2021).

In the field of veterinary medicine and animal nutrition, microencapsulation has become a key technological tool, particularly in ruminant nutrition (Kiran & Deswal, 2020). Applications include the use of microcapsules containing essential oils, whose effects have been evaluated on milk production and quality in lactating dairy cows. Da Silva *et al.* (2020) supplemented primiparous dairy cows with microencapsulated essential oils and reported beneficial effects on milk yield and composition, which were attributed to alterations in ruminal fermentation and improved nutrient utilization. Similarly, they evaluated microencapsulated selenium in dairy cattle and observed superior mineral

absorption compared with inorganic sodium selenite, with higher transfer of selenium from the supplemented diet into milk.

In this way, microencapsulation represents a highly valuable technology in the animal feed industry, as it enables the development of more efficient nutrient and additive delivery strategies, reducing losses and improving animal performance and health, as well as the quality of animal derived products such as milk and meat. This biotechnological advancement contributes to the sustainability of animal production by optimizing the use of feedstuffs and minimizing metabolic and environmental impacts within the ruminant organism.

Methodology

This mini review was conducted using a structured and reproducible approach that integrates elements of a systematic literature review with a critical narrative synthesis, aiming to provide a comprehensive and analytical overview of microencapsulation strategies in ruminant nutrition. The scope of the review includes studies published up to December 2021, allowing for a consolidated assessment of established technologies and applications prior to recent developments in the field.

Literature search strategy

A comprehensive literature search was performed across Scopus. The search strategy combined keywords related to microencapsulation technologies and ruminant nutrition using Boolean operators.

The core search string included terms such as: TITLE-ABS-KEY ((“microencapsulation” OR “encapsulation” OR “microcapsules” OR “nanoencapsulation” OR “coating”) AND (“ruminant nutrition” OR ruminants OR cattle OR dairy OR rumen OR sheep OR goats OR bovine) AND (“controlled release” OR bioavailability OR “feed additives” OR “rumen protection” OR “bypass nutrients” OR “targeted delivery” OR digestibility)) AND PUBYEAR>2000 AND PUBYEAR<2021 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “re”)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, “English”) OR LIMIT-TO (LANGUAGE, “Spanish”)).

Inclusion and exclusion criteria

The following inclusion criteria were applied: (i) original research articles, controlled trials, and comprehensive reviews on microencapsulated nutrients or additives used in ruminants (including bovine, sheep, goats, and camelids); (ii) studies reporting encapsulation materials and techniques, as well as biological outcomes such as production performance, ruminal fermentation, animal health, and milk or meat quality; and (iii) articles written in English, Spanish, or Portuguese, provided that the methodology and results were clearly described.

Articles were excluded if they: (i) focused on microencapsulation for monogastric animals, aquaculture, or human food applications without explicit relevance to ruminant nutrition; (ii) were short communications, editorial comments, or patent documents lacking experimental

data on animal performance or ruminal behavior; or (iii) analyzed encapsulation methods without presenting results related to ruminant physiology, productivity, or product quality.

Study selection and synthesis process

The study selection process followed a structured approach inspired by the PRISMA guidelines. Selection was conducted in two stages. First, titles and abstracts were screened to exclude clearly irrelevant studies, such as those involving non-ruminant species or non-nutritional applications. In the second stage, the full texts of potentially eligible articles were evaluated to confirm compliance with all inclusion criteria and to ensure sufficient methodological and experimental detail.

For each retained study, relevant information was systematically extracted and compiled into a structured synthesis table, including animal species and physiological stage (e.g., lactating dairy cows, growing beef cattle, and ewes); encapsulated compound (e.g., essential amino acids, polyunsaturated fatty acids, vitamin E, selenium, enzymes, and probiotics); encapsulation technique (e.g., spray drying, spray chilling, fluidized-bed coating, coacervation, and emulsion-based systems); wall material composition (lipid-, polymer-, protein-, carbohydrate-based, or multilayer systems); proposed or demonstrated site of release (ruminal or post-ruminal), along with the evaluation method (in vitro simulations or in vivo trials); and the main outcomes reported, such as milk yield and composition, carcass

traits, ruminal pH, volatile fatty acids, methane emissions, digestibility, and health indicators.

This tabular synthesis enabled a systematic comparison across studies and supported the identification of trends, inconsistencies, and knowledge gaps in the literature on microencapsulation in ruminant nutrition up to 2021.

Thematic organization and qualitative analysis

Following data extraction, the selected studies were organized into thematic sections to facilitate a coherent and in-depth analysis. These sections included: (i) formulation of microencapsulated nutrients, focusing on core materials and the rationale for encapsulation; (ii) wall materials and delivery systems, including lipid-based, polymer-based, protein-based, and multilayer matrices; (iii) encapsulation technologies commonly applied in ruminant feed systems; (iv) functional applications and biological outcomes reported in ruminants up to 2021; and (v) limitations, challenges, and emerging trends that suggest future research directions beyond 2021.

Within each section, the analysis combined descriptive synthesis with critical interpretation, emphasizing convergent findings, methodological variability, and unresolved scientific questions. The level of evidence was assessed qualitatively rather than through formal scoring systems, maintaining consistency with the scope and format of a mini review while ensuring a rigorous and insightful evaluation of the field.

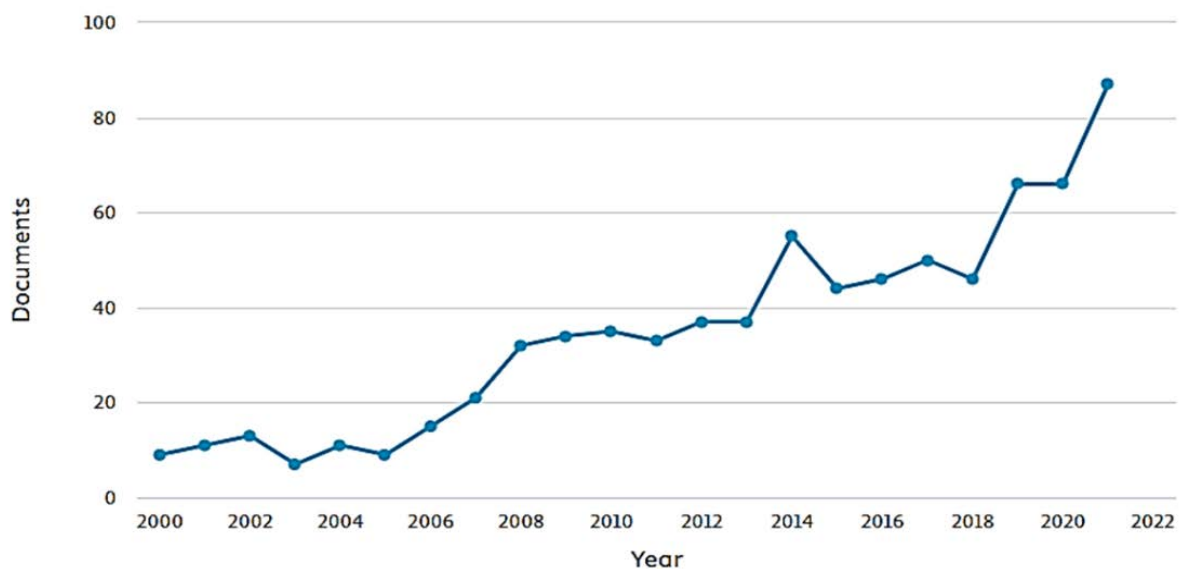
Results and discussion

Figure 1 shows the temporal distribution of publications, revealing a steady increase in research output from 2000 to 2021, with a marked acceleration after 2014. Early studies (2000–2006) were limited in number, reflecting the emerging nature of microencapsulation technologies in ruminant systems.

From 2007 onwards, progressive growth was observed, likely driven by advances in encapsulation techniques and their application in improving nutrient delivery and rumen stability (Tolve *et al.*, 2021).

Notably, the sharp increase in publications after 2018 highlights the growing interest in functional feed additives, rumen-protected compounds, and sustainable livestock production strategies (Park *et al.*, 2018).

Figure 1. Number of documents published per year in Scopus on microencapsulation/encapsulation in ruminant nutrition (2000–2021)



Source. Own elaboration.

Figure 2 depicts the keyword co-occurrence generated using VOSviewer software (version 1.6.5, developed by Van Eck and Waltman, NL). The keyword co-occurrence map delineates a highly interconnected and multidisciplinary research landscape centered on microencapsulation and its applications across biomedical and animal-related systems. The network structure

reveals both conceptual consolidation and translational expansion, characteristic of a field transitioning from fundamental formulation science toward application-driven innovation.

At the core of the map, high-frequency nodes such as particle size, drug delivery system, nanoparticle, and encapsulation function

as dominant intellectual anchors. Their central positioning and extensive linkages indicate that control over physicochemical properties—particularly size, surface charge (zeta potential), and morphology—remains the principal determinant guiding system performance. These variables underpin critical functionalities such as drug release, bioavailability, and biocompatibility, which collectively define the efficacy of encapsulated systems.

The network segregates into four major thematic clusters, each reflecting a distinct yet overlapping research trajectory:

1. Physicochemical and formulation science (blue cluster)

This cluster is densely organized around terms such as drug bioavailability, drug solubility, dispersity, and drug targeting. It represents the mechanistic backbone of the field, emphasizing how formulation parameters influence absorption, distribution, and overall therapeutic performance. The prominence of oral drug administration and nanoparticle engineering suggests a sustained focus on overcoming solubility and permeability barriers.

2. Delivery systems and functional materials (green cluster)

Anchored by terms such as drug delivery system, biocompatibility, polymer, and bovine serum albumin, this cluster reflects advances in carrier design. The frequent appearance of protein-based systems highlights a growing interest in biologically derived materials as encapsulation matrices.

Notably, the inclusion of humans and animals within this cluster underscores its translational relevance, bridging material science with in vivo applicability.

3. Chemical and encapsulation processes (red cluster)

This cluster is centered on encapsulation, chemistry, controlled release, and microencapsulation. It reflects the engineering and process-oriented dimension of the field, including emulsification, gelation, and the development of structured delivery systems.

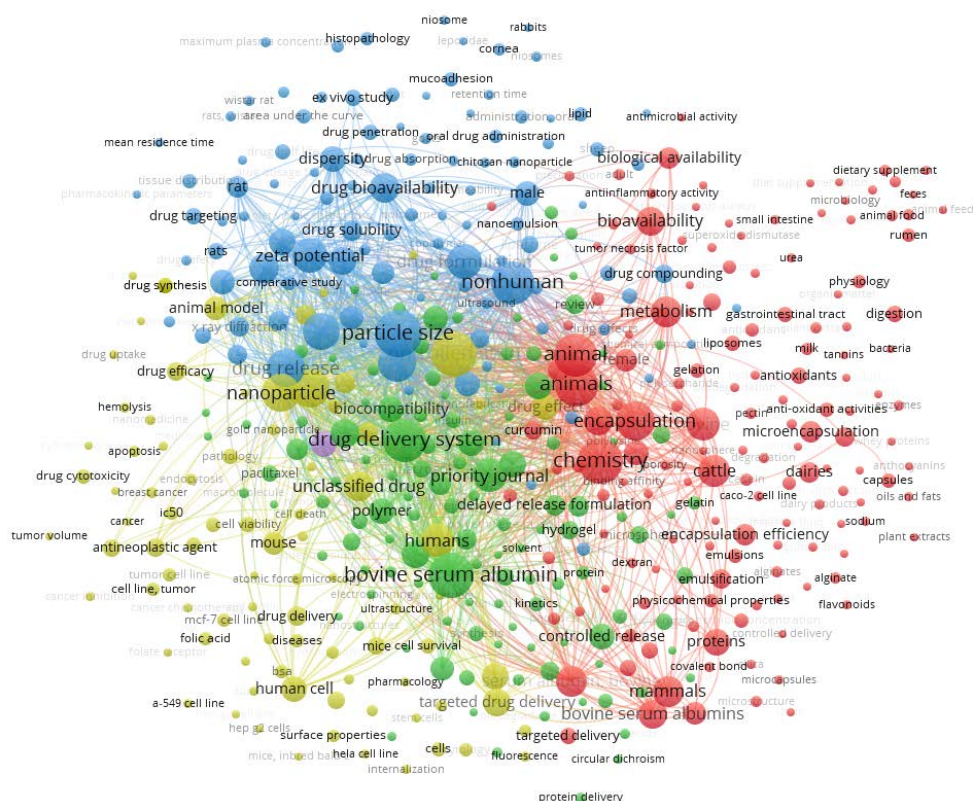
The co-occurrence of terms such as antioxidants, flavonoids, and plant extracts signals a strong trend toward incorporating functional bioactives, particularly those of natural origin. Importantly, nodes such as “animal”, “cattle”, and “dairies” indicate the extension of encapsulation technologies into animal nutrition and agro-industrial applications.

4. Biomedical and therapeutic applications (yellow cluster)

This cluster emphasizes antineoplastic agents, drug efficacy, cell viability, and human cell models, reflecting the biomedical origins of microencapsulation research. The presence of terms such as tumor cell line and apoptosis suggests a strong orientation toward oncology and targeted therapies.

However, its peripheral yet connected position indicates that while biomedical applications remain foundational, they are increasingly integrated with broader delivery system innovations.

Figure 2. Keyword co-occurrence generated using VOSviewer software from papers published between 2017 and 2021



Source. Own elaboration.

Emerging trends and conceptual convergence

A key insight from the map is the convergence between traditionally distinct domains—pharmaceutical sciences, materials engineering, and animal nutrition. The proximity of terms such as animal, metabolism, and bioavailability to core encapsulation terms suggests that principles initially developed for human therapeutics are being actively translated into animal feed systems. This includes the delivery of antioxidants, enzymes, and bioactive compounds to enhance digestion, health, and productivity.

Additionally, the increasing visibility of nanoemulsion, liposome, and hydrogel systems reflects a shift toward more sophisticated and tunable delivery platforms. These systems enable controlled and targeted release, aligning with the broader paradigm of precision delivery.

Another notable trend is the integration of natural compounds (e.g., curcumin, flavonoids, and plant extracts) within encapsulation frameworks, reinforcing the movement toward sustainable and functional additives, particularly relevant in the context of antibiotic-free animal production systems.

Microencapsulation methods and their selection

To select an appropriate microencapsulation method, it is necessary to consider the target site and the physiological conditions under which the core material must be delivered, as well as its compatibility with the wall material. In the animal feed industry, a wide range of encapsulation technologies has

been applied to address key nutritional and metabolic challenges in ruminants, thereby improving the quality of animal-derived products such as milk and meat (Kiran & Deswal, 2020).

Table 1 summarizes the most commonly used microencapsulation methods in ruminant nutrition, along with their main functional characteristics.

Table 1. Microencapsulation strategies in ruminant nutrition: materials, release mechanisms, and functional outcomes

Method	Core material	Wall material	Release mechanism	Functional objective	Key outcome	Reference
Extrusion	Probiotics (Lactobacillus, Bifidobacterium)	Sodium alginate/pectine	Diffusion/enzymatic degradation	Protection of viable	Improved immune response and animal performance	(Melo <i>et al.</i> , 2021)
Liposomes	Curcumin	Phospholipids	Diffusion-controlled	Slow nitrogen release	Improved ruminal performance	(Wu <i>et al.</i> , 2020)
Dispersion	Urea	Poly (3-hydroxybutyrate)	Diffusion	Controlled nitrogen delivery	Sustained nitrogen release without toxicity	(Arjona <i>et al.</i> , 2021)
Lyophilization	Urea	Beeswax	Lipid digestion	Slow nitrogen release	Improved ruminal performance	(de B. Carvalho <i>et al.</i> , 2019)
Lipid encapsulation	Methionine, lysine	Lipid matrix	Lipid digestion	Rumen protection of amino acids	Increased post-ruminal bioavailability	(King <i>et al.</i> , 2021)

Lipid coating	Soybean meal protein	Fat (palmitic/stearic acids)	Lipid digestion	Rumen bypass protein	Increased rumen-undegraded protein	(Campos <i>et al.</i> , 2021)
Fat coating	Glucose	Lipid matrix	Lipid digestion	Energy	Improved milk production and metabolic status	(Li <i>et al.</i> , 2019)
Emulsification + Spray drying	Proteins (ovalbumin, whey, plant proteins)	Polymeric matrix	Diffusion/matrix erosion	Protection against ruminal hydrolysis	Enhanced protein stability	(Tan <i>et al.</i> , 2021)
Emulsification-sonication	Lysine	Arachidic or stearic acids and Tween 60	Diffusion-controlled	Controlled nitrogen delivery	Improved stability and delivery of bioactives	(Albuquerque <i>et al.</i> , 2020)
Emulsification + Spray drying	Tannin extract	Gum arabic-maltodextrin	Diffusion/degradation	Fermentation modulation	Reduced ruminal degradation	(Adejoro <i>et al.</i> , 2019)
Spray drying	Branched-chain VFAs	Mixed materials	Controlled release	Fermentation control	Modified gas production dynamics	(Dias Batista <i>et al.</i> , 2020)
Emulsification	Cu and Se	Lipid matrix	Lipid digestion	Mineral delivery and fermentation modulation	Altered rumen microbial activity	(Arce-Cordero <i>et al.</i> , 2020)
Liposomes	Curcumin	Milk/krill	Enzymatic digestion	Bioavailability enhancement	Improved digestibility and stability	(Wang <i>et al.</i> , 2009)

Source. Own elaboration.

As shown in table 1, spray drying, extrusion, emulsification, and spray cooling are the most frequently employed techniques. The selection of each method depends not only on processing considerations but also on the physicochemical properties of both the core and wall materials, as well as the environmental conditions that the microcapsule must withstand, including pH variations, temperature fluctuations, and enzymatic activity within the gastrointestinal tract (Thies, 2012). The following sections provide a detailed overview of these processes.

Extrusion is a well-established technique in which microcapsules are formed by injecting droplets of a colloidal solution into a hardening bath, leading to the formation of gel-based capsules around the active compound. This method is particularly suitable for ingredients of low volatility and high stability, as the resulting gel network provides a robust and controllable matrix for encapsulation (Melo *et al.*, 2021). Its relatively mild processing conditions also make it advantageous for preserving the functional integrity of sensitive bioactive compounds.

Emulsification involves the dispersion of one immiscible liquid phase into another, typically generating oil-in-water or water-in-oil systems in which the polymer phase contains the active compound. Upon phase solidification, induced by temperature changes, cross-linking, or solvent removal, solid microcapsules are formed within the continuous phase. This technique allows the production of particles with relatively narrow size distributions and improved structural homogeneity (Arjona *et al.*, 2021).

Depending on the operational parameters, external gelation can produce particles in the range of 400 μm to 1 mm, whereas internal gelation enables the formation of smaller and more uniform microcapsules ($\sim 50 \mu\text{m}$), which may enhance release control and bioavailability (Adejoro *et al.*, 2019).

Spray drying remains the most widely used microencapsulation method in the food and feed industries due to its cost-effectiveness, scalability, and ability to produce stable, free-flowing powders with controlled particle size and rapid dispersibility (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018; Macías-Cortés *et al.*, 2020). The process involves atomizing a liquid feed into a hot air stream, where rapid solvent evaporation leads to the formation of dry microcapsules. Final particle characteristics depend strongly on process parameters and feed composition. However, a key limitation of spray drying lies in the restricted selection of wall materials, which must withstand high temperatures during processing. Therefore, prior characterization of the core material is essential to ensure adequate thermal stability and high encapsulation efficiency (Zanoni *et al.*, 2020).

In ruminant nutrition, spray-dried microcapsules have been successfully applied to protect proteins from microbial degradation in the rumen. For instance, King *et al.* (2021) demonstrated that microencapsulation significantly improved the resistance of dietary proteins to ruminal hydrolysis, thereby enhancing their post-ruminal availability. In that study, protein sources with simpler molecular structures, such as whey protein and ovalbumin, formed more homogeneous and structurally robust

capsules, exhibiting greater resistance to ruminal microbiota and improved protein retention. These findings highlight the potential of spray drying as a practical and efficient strategy for developing rumen-protected protein systems.

Spray cooling represents an alternative encapsulation technique particularly suited for heat-sensitive or volatile compounds. In this process, a molten lipid matrix containing the active ingredient is atomized into a cooled chamber, where rapid solidification results in the formation of lipid-based microcapsules (Adejoro *et al.*, 2019). This method offers advantages in terms of process simplicity, high retention efficiency, and protection against oxidation and volatilization. The encapsulated core may be hydrophilic or lipophilic, provided that it can be adequately dispersed within the lipid phase.

Microencapsulation in ruminant nutrition

Microencapsulation strategies in ruminant nutrition are predominantly driven by the need to balance ruminal protection and post-ruminal release, which ultimately determines the bioavailability and functional efficacy of the encapsulated compounds. Across the dataset, a clear technological trend emerges, where lipid-based encapsulation systems dominate applications aimed at rumen bypass, particularly for nutrients highly susceptible to microbial degradation, such as amino acids, glucose, and urea.

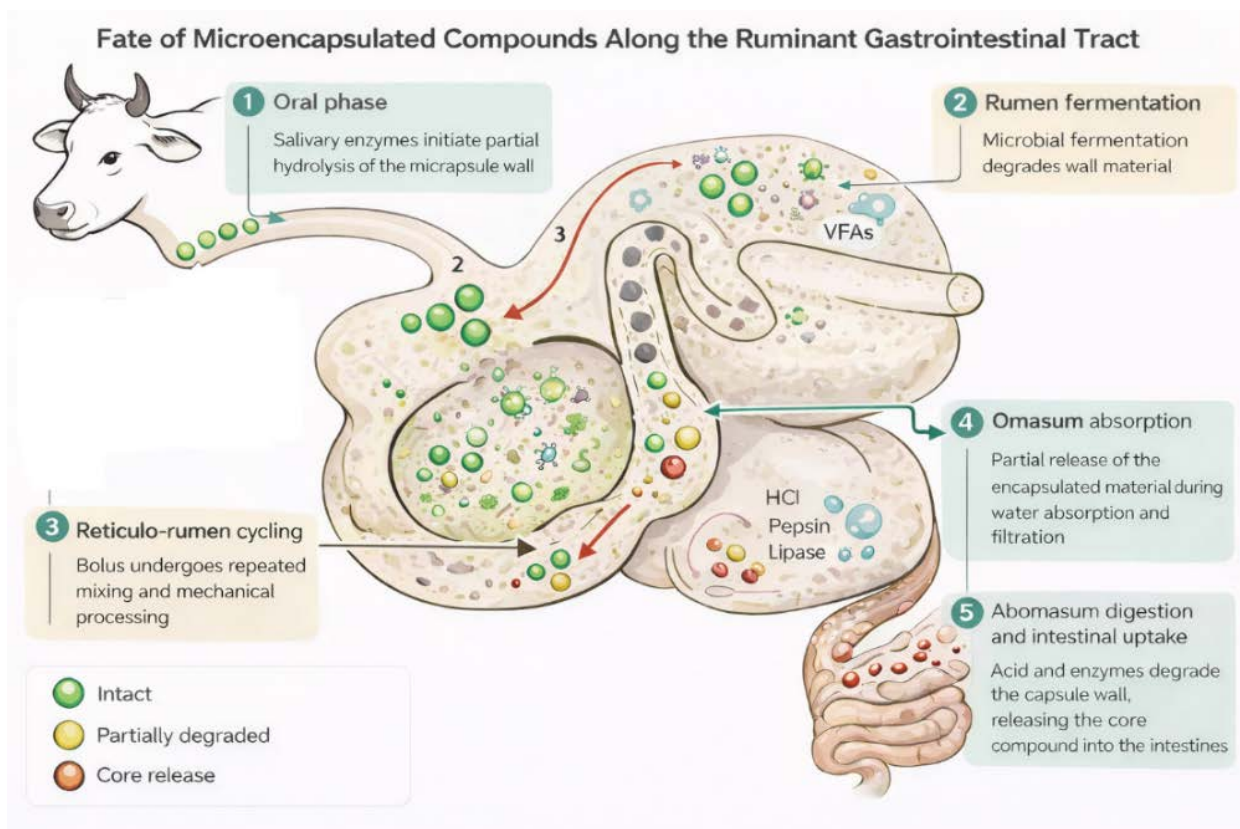
In the context of ruminant nutrition, lipid-based microcapsules produced by spray

cooling have proven effective in protecting minerals and other labile nutrients from ruminal degradation. For example, Arce-Cordero *et al.* (2020) reported that microencapsulated sodium selenite exhibited greater resistance to ruminal reduction compared to its non-encapsulated counterpart, resulting in enhanced selenium transfer into plasma and milk. Animals receiving the encapsulated form showed higher milk selenium concentrations, indicating improved absorption and bioavailability. These results demonstrate the relevance of lipid encapsulation systems for improving the efficiency of micronutrient delivery in dairy production systems.

The effectiveness of microencapsulation strategies in ruminant nutrition is ultimately determined by the dynamic interaction between the encapsulated compound and the complex digestive physiology of the host animal. As illustrated in Figure 3, microcapsules undergo a series of transformations throughout the gastrointestinal tract. Upon ingestion, microcapsules are exposed to salivary enzymes that may initiate partial hydrolysis of surface components (Kiran & Deswal, 2020).

In the rumen, which is the most critical stage, microcapsules are subjected to intense microbial fermentation, where bacteria, protozoa, and fungi can degrade the wall material depending on its composition and resistance (Mizrahi *et al.*, 2021). Simultaneously, the production of volatile fatty acids (VFAs) creates a chemically dynamic environment that further challenges capsule stability.

Figure 3. Fate and functional behavior of microencapsulated compounds along the ruminant gastrointestinal tract



Source. Own elaboration.

The repeated cycling of digesta between the rumen and reticulum enhances mechanical breakdown and microbial exposure, potentially compromising capsule integrity. As the digesta progresses to the omasum, water absorption and mechanical filtration increase the interaction between microcapsules and digestive fluids, facilitating partial release of the encapsulated compounds (Öztürk & Gür, 2021). In the abomasum, acidic pH and enzymatic activity (e.g., pepsin) promote the breakdown of the encapsulating matrix, enabling the release of the core material, which is subsequently absorbed in the intestine.

The efficiency of this process depends critically on the balance between structural resistance in the rumen and controlled disintegration in post-ruminal compartments. If the capsule degrades too early, the active compound is lost due to microbial metabolism; if it is too resistant, nutrient release and absorption are compromised (Carvalho *et al.*, 2019). Therefore, the design of effective encapsulation systems requires precise tuning of material properties and release kinetics to achieve targeted delivery.

Overall, these findings underscore that microencapsulation is not merely a

protective strategy but also a functional delivery system that can enhance nutrient bioavailability, reduce metabolic losses, and improve animal performance. Moreover, its application contributes to more sustainable livestock production by enabling more efficient nutrient utilization and reducing environmental impacts such as methane emissions and nitrogen excretion (Haque, 2018). Future research should focus on optimizing material selection, improving scalability, and validating these systems under long-term *in vivo* conditions to fully realize their potential in commercial ruminant production systems.

The main microencapsulation strategies applied in ruminant nutrition highlight the relationship between encapsulation technique, material selection, and functional outcomes. Lipid-based systems dominate applications aimed at rumen protection, whereas polymeric systems are more frequently associated with controlled release mechanisms.

Lipid matrices, including hydrogenated fats and waxes, have been widely employed due to their hydrophobic nature and resistance to ruminal microbial activity. Studies such as Arce-Cordero *et al.* (2020), Campos *et al.* (2021), and Li *et al.* (2019) demonstrate that lipid-encapsulated amino acids and proteins can effectively bypass ruminal degradation, leading to enhanced intestinal digestibility and improved nitrogen utilization. These findings highlight the high translational potential and industrial scalability of lipid-based systems, which explains their widespread adoption in commercial feed formulations.

However, despite their effectiveness in protecting core materials, lipid-based systems exhibit limited control over release kinetics, as their degradation is largely governed by passive physicochemical processes such as melting and enzymatic lipolysis. This lack of precision may result in suboptimal synchronization between nutrient release and animal metabolic demands, particularly under variable physiological conditions. Consequently, while lipid encapsulation ensures protection, it does not always guarantee targeted delivery, which is increasingly recognized as a key requirement in precision livestock nutrition.

In contrast, polymeric encapsulation systems, including calcium pectinate and polysaccharide-based matrices, offer greater flexibility in modulating release profiles through mechanisms such as diffusion, swelling, and enzymatic degradation. Adejoro *et al.* (2019) showed that biopolymer-based encapsulation of tannins reduced their rapid degradation in the rumen, allowing for a more controlled modulation of fermentation processes. These systems provide a higher degree of tunability compared to lipid matrices, making them particularly suitable for applications requiring controlled or delayed release.

Nevertheless, polymeric systems face significant limitations related to scalability, cost, and mechanical stability, which hinder their widespread application in commercial feed production. Their sensitivity to processing conditions and variability in performance under *in vivo* conditions further complicate their industrial implementation.

This trade-off between functional precision and technological feasibility represents one of the main challenges in the field.

Another relevant trend identified in table 1 is the growing interest in encapsulating compounds aimed at modulating rumen fermentation, including tannins, branched-chain volatile fatty acids, and trace minerals. Arce-Cordero *et al.* (2020) demonstrated that lipid-based microencapsulation of copper and selenium altered microbial fermentation patterns, suggesting that encapsulation can be used not only for protection but also as a tool to strategically influence the rumen microbiota.

These findings suggest that microencapsulation is evolving from a passive protective technology into an active modulation strategy, capable of influencing rumen ecology and metabolic outputs. This shift aligns with current trends in sustainable livestock production, where improving feed efficiency and reducing environmental impacts—such as methane emissions and nitrogen losses—are key priorities.

In addition, emerging systems such as liposomes and nanostructured carriers, as reported by Albuquerque *et al.* (2020), demonstrate the potential for enhancing the stability and bioavailability of bioactive compounds, including antioxidants and phytochemicals. Although these advanced systems are still primarily explored in food and biomedical contexts, their application in ruminant nutrition represents a promising research frontier. However, their adoption remains limited due to economic constraints, regulatory considerations, and scalability issues, which must be addressed before practical implementation.

Overall, the analysis of the available studies indicates that no single encapsulation strategy fully satisfies all functional and industrial requirements. Instead, the field is characterized by a trade-off between protection efficiency, release control, and scalability. Lipid-based systems offer robustness and feasibility but limited precision, whereas polymeric systems provide tunability at the expense of industrial applicability.

From a future perspective, research efforts should focus on the development of hybrid encapsulation systems that combine the structural stability of lipid matrices with the controlled release capabilities of polymers. Additionally, integrating encapsulation technologies with precision feeding strategies and real-time monitoring of animal metabolism could significantly enhance their effectiveness. The use of agro-industrial residues as encapsulating materials or bioactive cores also represents a promising avenue, particularly in the context of the circular economy and sustainable production systems.

Conclusions

Microencapsulation has moved well beyond being a formulation convenience, it is now shaping how we think about nutrient delivery in ruminant systems. What emerges from this review is a field that has matured technically yet is still negotiating the balance between biological effectiveness and industrial reality. Encapsulation clearly improves the stability and post-ruminal availability of sensitive compounds, and

there is consistent evidence that this translates into better nutrient utilization and, in many cases, improved animal performance. At the same time, the rumen remains a highly variable and difficult environment to control, and this continues to challenge the precision that we aim to achieve.

Lipid-based systems have become the practical standard, largely because they work reliably and can be produced at scale. Their success is not surprising—they offer robust protection and integrate well into existing feed manufacturing processes. However, their dependence on passive digestion limits the degree to which nutrient release can be fine-tuned.

Polymeric systems, in contrast, offer a more sophisticated level of control, allowing release to be modulated through well-understood physicochemical mechanisms. Yet, after years of promising experimental results, their adoption remains limited, reflecting unresolved issues related to cost, scalability, and consistency under real production conditions.

What is particularly striking is the growing interest in more complex delivery systems, including liposomes and nano-structured carriers. These approaches open new possibilities, especially for delivering functional compounds with higher specificity and stability. Still, they largely remain within the experimental domain. Moving these technologies toward practical application will require not only technical refinement, but also a clearer demonstration of their value under commercial conditions.

Perhaps the most important takeaway is that there is no single “ideal” encapsulation strategy. Each approach involves trade-offs between protection, release control, and feasibility. The next phase of progress will likely depend on hybrid systems that combine the strengths of different materials and mechanisms, rather than relying on any one solution. Designing such systems will require a more integrated understanding of both material science and ruminant physiology.

Looking ahead, the field would benefit from a stronger emphasis on *in vivo* validation and on linking encapsulation performance with measurable outcomes in animal production. Too often, promising technologies remain at the level of laboratory characterization. Bridging this gap is essential if encapsulation is to become a routine tool in precision nutrition. There is also a clear opportunity to align these developments with sustainability goals, particularly through the use of agro-industrial by-products as encapsulating materials or functional ingredients.

In that sense, microencapsulation is not just about protecting nutrients—it is about rethinking how feeds are designed and how efficiently they are used. Its continued development will play an important role in improving productivity while reducing environmental impact, which is ultimately the direction in which ruminant production systems need to move.

References

- Adejoro, F. A., Hassen, A., & Thantsha, M. S. (2019). Characterization of starch and gum Arabic-maltodextrin microparticles encapsulating acacia tannin extract and evaluation of their potential use in ruminant nutrition. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(7), 977–987. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0632>
- Albuquerque, J., Casal, S., Páscoa, R. N. M. de J., Van Dorpe, I., Fonseca, A. J. M., Cabrita, A. R. J., Neves, A. R., & Reis, S. (2020). Applying nanotechnology to increase the rumen protection of amino acids in dairy cows. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63793-z>
- Arce-Cordero, J. A., Monteiro, H. F., Lelis, A. L., Lima, L. R., Restelatto, R., Brandao, V. L. N., Leclerc, H., Vyas, D., & Faciola, A. P. (2020). Copper sulfate and sodium selenite lipid-microencapsulation modifies ruminal microbial fermentation in a dual-flow continuous-culture system. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 7068–7080. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17913>
- Arjona, J. de C., Silva-Valenzuela, M. D. G., Wang, S. H., & Valenzuela-Diaz, F. R. (2021). Biodegradable nanocomposite microcapsules for controlled release of urea. *Polymers*, 13(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/polym13050722>
- Campos, A. C., Silva, A. L., Silva, A. M. A., Araujo Filho, J. M., Costa, T., Pereira Filho, J. M., Oliveira, J. P. F., & Bezerra, L. R. (2021). Dietary replacement of soybean meal with lipid matrix-encapsulated urea does not modify milk production and composition in dairy goats. *Animal Feed Science and Technology*, 274(August 2020), 114763. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114763>
- Contreras-Pacheco, Y. V., Gerardo, V. E., Jorge Alberto, S. B., Ghotekar, S., Fellah, M., & Pérez Larios, A. (2026). Natural sources of bioactive compounds: recent advances in isolation, functionalization, and health benefits. *Food Research International*, 223(May 2025). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117853>
- Da Silva, R. B., Pereira, M. N., De Araujo, R. C., De Rezende Silva, W., & Pereira, R. A. N. (2020). A blend of essential oils improved feed efficiency and affected ruminal and systemic variables of dairy cows. *Translational Animal Science*, 4(1), 182–193. <https://doi.org/10.1093/TAS/TXZ183>
- de B. Carvalho, A., da Silva, A. L., de A. Silva, A. M., Netto, A. J., de Medeiros, T. T. B., Araújo Filho, J. M., da S. Agostini, D. L., de Oliveira, D. L. V., Mazzetto, S. E., Kotzebue, L. R. V., Oliveira, J. R., Oliveira, R. L., & Bezerra, L. R. (2019). Effect of slow-release urea microencapsulated in beeswax and its inclusion in ruminant diets. *Small Ruminant Research*, 179(June), 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.09.005>

- Dias Batista, L. F., Norris, A. B., & Tedeschi, L. O. (2020). Effects of salts of branched-chain volatile fatty acids protected with different combinations of encapsulation materials on gas production dynamics when incubated in vitro with *Brachiaria brizantha* 'Marandu.' *Applied Animal Science*, 36(5), 677–687. <https://doi.org/10.15232/aas.2020-02017>
- Haque, M. N. (2018). Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Journal of Animal Science and Technology*, 60(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40781-018-0175-7>
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Alvarez-Ramirez, J., & Garcia, H. S. (2018). Microencapsulation using starch as wall material: A review. *Food reviews international*, 34(2), 148-161.
- King, L., Wickramasinghe, J., Dooley, B., McCarthy, C., Branstad, E., Grilli, E., Baumgard, L., & Appuhamy, R. (2021). Effects of microencapsulated methionine on milk production and manure nitrogen excretions of lactating dairy cows. *Animals*, 11(12), 3545. <https://doi.org/10.3390/ani11123545>
- Kiran, & Deswal, S. (2020). Role of feed additives in ruminant ' s production: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 9(2), 394–397.
- Li, X. P., Tan, Z. L., Jiao, J. Z., Long, D. L., Zhou, C. S., Yi, K. L., Liu, C. H., Kang, J. H., Wang, M., Duan, F. H., Tang, S. X., He, Z. X., & Han, X. F. (2019). Supplementation with fat-coated rumen-protected glucose during the transition period enhances milk production and influences blood biochemical parameters of liver function and inflammation in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 252(April), 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.04.010>
- Macías-Cortés, E., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., Moreno-Jiménez, M. R., Medina-Torres, L., & González-Laredo, R. F. (2020). Microencapsulation of phenolic compounds: Technologies and novel polymers. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 19(2), 491–521. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim642>
- Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D. S., González, Z., & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review. *Trends in Food Science and Technology*, 116(July), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>
- Melo, M., da Silva, A., Silva Filho, E., Oliveira, R., Silva Junior, J., Oliveira, J. P., Vaz, A., Moura, J., Pereira Filho, J., & Bezerra, L. (2021). Polymeric microparticles of calcium pectinate containing urea for slow release in ruminant diet. *Polymers*, 13(21), 3776. <https://doi.org/10.3390/polym13213776>
- Mizrahi, I., Wallace, R. J., & Moraïs, S. (2021). The rumen microbiome: balancing food security and environmental

- impacts. *Nature Reviews Microbiology*, 19(9), 553–566. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00543-6>
- Moschona, A., & Liakopoulou-Kyriakides, M. (2018). Encapsulation of biological active phenolic compounds extracted from wine wastes in alginate-chitosan microbeads. *Journal of Microencapsulation*, 35(3), 229–240. <https://doi.org/10.1080/02652048.2018.1462415>
- Öztürk, H., & Gür, G. (2021). Rumen physiology: Microorganisms, fermentation and manipulation. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 68(4), 423–434. <https://doi.org/10.33988/auvfd.960447>
- Park, J. H., Kumar, G., Yun, Y. M., Kwon, J. C., & Kim, S. H. (2018). Effect of feeding mode and dilution on the performance and microbial community population in anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 248, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.025>
- Tan, P., Liu, H., Zhao, J., Gu, X., Wei, X., Zhang, X., Ma, N., Johnston, L. J., Bai, Y., Zhang, W., Nie, C., & Ma, X. (2021). Amino acids metabolism by rumen microorganisms: Nutrition and ecology strategies to reduce nitrogen emissions from the inside to the outside. *Science of the Total Environment*, 800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149596>
- Thies, C. (2012). 8 - Microencapsulation methods based on biopolymer phase separation and gelation phenomena in aqueous media. In N. Garti & D. J. B. T.-E. T. and D. S. for F. I. and N. McClements (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition* (pp. 177–207). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095909.2.177>
- Tolve, R., Tchuente-Magaia, F., Di Cairano, M., Caruso, M. C., Scarpa, T., & Galgano, F. (2021). Encapsulation of bioactive compounds for the formulation of functional animal feeds: The biofortification of derivate foods. *Animal Feed Science and Technology*, 279(July), 115036. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115036>
- Wang, Y., Lu, Z., Lv, F., & Bie, X. (2009). Study on microencapsulation of curcumin pigments by spray drying. *European Food Research and Technology*, 229(3), 391–396. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1064-6>
- Wu, Y., Mou, B., Song, S., Tan, C. P., Lai, O. M., Shen, C., & Cheong, L. Z. (2020). Curcumin-loaded liposomes prepared from bovine milk and krill phospholipids: Effects of chemical composition on storage stability, in-vitro digestibility and anti-hyperglycemic properties. *Food Research International*, 136(May), 109301. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109301>
- Zanoni, F., Primiterra, M., Angeli, N., & Zoccatelli, G. (2020). Microencapsulation by spray-drying of polyphenols extracted from red chicory and red cabbage: Effects on stability and color properties. *Food Chemistry*, 307, 125535. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125535>

Thermal treatment effects on the microstructure and flexural performance of handmade $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ crucibles

Efectos del tratamiento térmico en la microestructura y el comportamiento a flexión de crisoles de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ elaborados artesanalmente

Rueda Cadavid, D. A.^{1*}, Caicedo Chacon, W. D.² y Morales Carreño, A. N.³

¹Departamento de Ingeniería Química y de Alimentos, Universidad Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

²Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

³Ciencia e Ingeniería de Materiales, Departamento de Mecánica, Universidad Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

Fecha de recepción: marzo de 2021 / Fecha de aceptación: julio de 2021

Abstract

Alumina crucibles are widely used ceramic components in materials science and engineering owing to their high thermal stability and suitability for processes such as melting and solid-state synthesis. This study reports the structural, morphological, and mechanical characterization of locally handmade alumina crucibles sourced from a commercial supplier in Bogotá, Colombia, evaluated after three distinct thermal histories: as-received at room temperature (AT), high-temperature exposure at 1350 °C for 12 hours (HT), and cold treatment by liquid nitrogen immersion at -196 °C (CT). X-ray diffraction identified $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (corundum) as the dominant crystalline phase in all conditions, with minor SiO_2 and Al_2SiO_5 -related secondary signals. No phase transformations were detected after any treatment, confirming the material's high structural and chemical stability. Fracture surface analysis revealed that HT samples exhibited the largest projected pore area ($8.12 \pm 1.67 \mu\text{m}^2$) compared with AT ($6.51 \pm 1.60 \mu\text{m}^2$) and CT ($5.38 \pm 1.22 \mu\text{m}^2$), accompanied by a distributed network of grain-scale microcracks. Mechanical testing indicated that HT crucibles reached the highest apparent bending modulus (331.78 GPa) and load-bearing capacity, surpassing AT (238.87 GPa) and CT (106.17 GPa), which was attributed to a microcrack toughening mechanism, whereas CT displayed a more brittle response. The mechanical behavior was governed primarily by defect architecture rather than

* Correspondencia: diaruedaca@unal.edu.co

compositional changes, and the crucibles demonstrated performance levels compatible with the moderate temperature melting of non-ferrous metals.

Keywords: Alumina, refractory crucibles, thermal treatment, mechanical properties, microstructure, locally manufactured materials.

Resumen

Los crisoles de alúmina son componentes cerámicos ampliamente utilizados en ciencia e ingeniería de materiales debido a su alta estabilidad térmica y su idoneidad para procesos como la fusión y la síntesis en estado sólido. Este estudio presenta la caracterización estructural, morfológica y mecánica de crisoles de alúmina elaborados artesanalmente y obtenidos de un proveedor comercial en Bogotá, Colombia, evaluados después de tres historias térmicas diferentes: recibidos a temperatura ambiente (AT), exposición a alta temperatura a 1350 °C durante 12 horas (HT) y tratamiento en frío mediante inmersión en nitrógeno líquido a -196 °C (CT). La difracción de rayos X identificó la α -Al₂O₃ (corindón) como la fase cristalina predominante en todas las condiciones, junto con señales secundarias menores asociadas a SiO₂ y Al₂SiO₂. No se detectaron transformaciones de fase después de ninguno de los tratamientos, lo que confirma la elevada estabilidad estructural y química del material. El análisis de las superficies de fractura reveló que las muestras HT presentaron la mayor área proyectada de poros ($8,12 \pm 1,67 \mu\text{m}^2$) en comparación con AT ($6,51 \pm 1,60 \mu\text{m}^2$) y CT ($5,38 \pm 1,22 \mu\text{m}^2$), acompañada por una red distribuida de microgrietas a escala de grano. Los ensayos mecánicos indicaron que los crisoles HT alcanzaron el mayor módulo aparente de flexión (331,78 GPa) y la mayor capacidad de carga, superando a AT (238,87 GPa) y CT (106,17 GPa). Este comportamiento se atribuyó a un mecanismo de tenacificación por microgrietas, mientras que las muestras CT mostraron una respuesta más frágil. El comportamiento mecánico estuvo gobernado principalmente por la arquitectura de defectos más que por cambios composicionales, y los crisoles demostraron niveles de desempeño compatibles con la fusión de metales no ferrosos a temperaturas moderadas.

Palabras clave: alúmina, crisoles refractarios, tratamiento térmico, propiedades mecánicas, microestructura, materiales de fabricación local.

Introduction

Crucibles are essential refractory vessels for laboratory and thermochemical operations, enabling the containment and processing of materials at very high temperatures during melting, heat treatment, calcination, and solid-state synthesis (Alimdjanova *et al.*, 2025; Khan *et al.*, 2024). Their selection and performance depend on thermo-mechanical stability and chemical inertness under aggressive environments, which is why application-oriented characterization and process control remain critical for safe and reproducible high-temperature work (Fan *et al.*, 2021).

Commercial and custom refractory crucibles are commonly based on oxides such as alumina (Al_2O_3), magnesia (MgO), and zirconia (ZrO_2), selected to withstand temperatures above approximately $\sim 1200^\circ\text{C}$ and intense thermal gradients. Small additions of specific elements or phases (e.g., Ni, Zr, or mullite formers) may be used to tune sintering, microstructure, and corrosion resistance, thereby improving thermo-mechanical robustness and service lifetime in service (Fan *et al.*, 2023a). The ability to resist thermal shock without permanent deformation or catastrophic fracture is particularly important for minimizing downtime and extending component life; likewise, chemical stability against molten metals and slags reduces interfacial reactions, limits refractory dissolution, and prevents contamination of melts and treated samples (Nwankwo *et al.*, n.d.).

Together with microstructural optimization and proper raw-material selection (purity, additives, and coatings), these attributes translate into durable and reliable performance in metallurgical and materials research settings (Nwankwo *et al.*, n.d.).

Among oxide refractories, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (corundum) is a workhorse material because of its high hardness, elastic stiffness, and thermal/chemical stability (Ikesue and Aung, 2023; Fan *et al.*, 2023a). Corundum's trigonal structure offers a well-understood crystallography, enabling tailoring of the processing–property relationship. When alumina is sintered to high density, hardness typically reaches the upper teens of GPa, and flexural strength can exceed several hundred MPa under appropriate processing and surface finish (Ikesue and Aung, 2023). In practice, the processing route (e.g., powder quality from Bayer-derived alumina, slip casting, and sintering at $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$) governs defect populations and grain growth, ultimately controlling mechanical performance and reliability (Fan *et al.*, 2023a). Crystallographic fingerprints of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and its strongest reflections are extensively tabulated, facilitating phase identification and preferred-orientation assessment during quality control (Ikesue and Aung, 2023).

The process–microstructure–performance linkage in alumina crucibles is especially sensitive to porosity architecture (volume fraction, size distribution, and connectivity), grain size, and secondary phases introduced intentionally (e.g., ZrO_2 , MgO , and silica) or carried as residuals.

As porosity increases and pores coarsen, strength decreases sharply and data variability increases; conversely, densification, defect refinement, and controlled grain growth improve flexural strength and thermal-shock tolerance. These trends have been quantified in both conventionally processed and additively manufactured alumina, where microstructural control raises the Weibull modulus and shifts characteristic strength upward (Makireddi *et al.*, 2020). For porous or slip-cast alumina crucibles with moderate porosity, reported room-temperature flexural strength can fall to a few tens of MPa; however, strength retention after thermal-shock cycling may remain acceptable for certain melting operations (Fan *et al.*, 2021, p. 2).

Benchmark properties of high-purity sintered alumina include a Young's modulus on the order of 380–400 GPa and a Poisson's ratio near 0.25–0.27, reflecting a stiff, low-compliance solid (Munro, 1997). Under optimized processing and surface preparation, monolithic alumina can exhibit flexural strengths typically in the ~300–550 MPa range and a fracture toughness of ~3–5 MPa·m^{1/2}, values consistent with a hard yet intrinsically brittle ceramic (Shakirzyanov *et al.*, 2025). Recent advances in advanced forming (e.g., stereolithography) reaffirm that dense alumina parts approach the higher end of these ranges when porosity is minimized, and flaw populations are carefully controlled.

Despite these well-established principles, handmade α -Al₂O₃ crucibles, which remain attractive in cost-constrained contexts, often experience variable thermal histories and uncontrolled microstructures, and systematic studies connecting

thermal treatment, microstructure, and service-relevant mechanical response are scarce. This knowledge gap is consequential: without data-driven guidance, users face risks of sample contamination, premature failure, and avoidable costs. Studies on handmade crucibles produced from local clays in West Africa highlight economic and availability advantages relative to imports, underscoring the value of fit-for-purpose characterization to inform local manufacturing (Barry *et al.*, 2024; Nwankwo *et al.*, n.d.).

At the same time, reports of low strength and poor thermal-shock stability in locally produced crucibles often trace back to compositional and microstructural shortcomings, including insufficient alumina-rich or mullite phases, high residual porosity, and non-optimized sintering cycles (Barry *et al.*, 2024).

This work addresses that gap by examining how thermal treatments modulate the phase constitution (XRD), microstructure, and porosity (SEM/stereology) and flexural performance of handmade α -Al₂O₃ crucibles. Specifically, we evaluate the effects of thermal history on (i) lattice-level indicators and secondary-phase signatures, (ii) porosity content and architecture, and (iii) bending strength and its scatter, discussed in the context of defect populations relevant to thermal-shock scenarios. By explicitly mapping processing to microstructure and mechanical response, our study provides application-oriented guidance to improve local manufacturing practices, establish a technical baseline for performance benchmarking, and reduce variability and risk in high-temperature operations that rely on alumina crucibles.

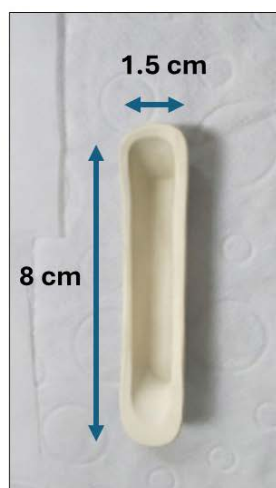
Materials and methods

Materials and specimen description

Handmade alumina (Al_2O_3) crucibles were sourced from local artisanal manufacturers in Ricaurte, Bogotá, Colombia. According to the supplier, the crucibles were produced manually from high-purity alumina powders; however, no certified technical datasheet,

standardized manufacturing protocol, or detailed compositional/mechanical specifications were available. The nominal external dimensions were ~80 mm in length, ~15 mm in width, and ~10 mm in depth, with a boat-shaped geometry (Figure 1). Minor dimensional variability across pieces was expected given the artisanal process; therefore, all test-relevant dimensions (span, width (b), and thickness (d)) were individually measured with a digital caliper (± 0.01 mm) immediately prior to testing to minimize geometric bias.

Figure 1. Handmade crucibles used in the study.



Source. Own elaboration.

Thermal treatments

Three thermal-history conditions were defined: (i) as-received (AT), with no thermal treatment; (ii) high-temperature treatment (HT), consisting of furnace exposure at 1350°C in ambient air for 12h, followed by controlled cooling to room temperature; and (iii) cold treatment (CT), consisting of a single immersion cycle at -195°C

(liquid nitrogen) for 12h. The HT condition was selected to be representative of a consolidation/densification heat-treatment window for alumina-based bodies, whereas CT was explored as a contrasting history to probe microstructural and mechanical sensitivity to severe temperature excursions. After each treatment, crucibles were allowed to equilibrate to laboratory conditions for at least 24h prior to characterization.

Phase analysis by X ray diffraction (XRD)

Powder XRD patterns were collected on a PANalytical X'Pert PRO MPD diffractometer (Cu K α , λ = 1.5406 Å) over 10–90° 2 θ . Diffraction data were acquired using a step size of 0.02° with an equivalent counting time sufficient to resolve minor peaks. Phase identification was performed by pattern matching against reference databases (ICDD/NIST) with particular attention to the α -Al₂O₃ (corundum) fingerprints and potential SiO₂/aluminosilicate signatures. Peak positions and relative intensities of corundum were cross checked against well curated datasets (e.g., NIST SRM676a/1976c summaries and recent IUCr/NIST analyses of α -Al₂O₃ intensity sequences) to avoid misassignment of quartz family reflections near 26.6° 2 θ (Cu K α).

Microstructure and composition (SEM/EDS) and pore stereology

Fracture surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM, TESCAN VEGA3). Representative regions were imaged to assess grain morphology, pore distribution and size, and the presence of defects associated with the manufacturing route and thermal history. Qualitative energy dispersive X ray spectroscopy (EDS) was used to screen for elemental signatures of possible secondary phases (e.g., Si, Mg, or Zr bearing species). To contextualize porosity, image analysis and stereology were performed on SEM micrographs using ImageJ. The images were calibrated with scale bars. A reproducible thresholding

workflow was applied to segment pores, and the area fraction and equivalent circular diameters were extracted.

Flexural testing

Bending tests were performed on a universal testing machine (Shimadzu AG IS, 5 kN load cell) in a three point bending configuration to obtain comparative flexural strength across thermal histories. Because the available material consisted of complete crucibles (i.e., non standard bars) and only one specimen per condition was available, tests were executed as an exploratory comparison and do not constitute an ASTM compliant strength characterization. Where geometry permitted, a constant outer span and mid span loading were used; the span (L), width (b), and thickness (d) of the loaded section were measured immediately prior to testing. The cross head speed was chosen to keep the time to failure within the typical windows used for advanced ceramics.

Although the setup was inspired by ASTM C1161 practice (flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature), we explicitly acknowledge two departures from the standard: (1) specimen geometry was not machined to a prescribed bar, and (2) $n = 1$ per condition prevents statistical treatment or size scaling. Accordingly, results are interpreted as comparative indicators suitable for discussing thermal history effects within this study but not as design allowables. For future work, we plan to test ≥ 10 replicate bars per condition, report strength distributions, and estimate Weibull parameters in full compliance with ASTM C1161.

The maximum outer fiber stress (reported here as “flexural strength” for brevity) under three point bending was calculated from simple beam theory:

$$\sigma_f = \frac{3 F_{\max} L}{2 b d^2} \quad (1)$$

where $F_{\max}$ is the peak load (N), L is the support span (mm), b is the specimen width (mm), and d is the thickness (mm). Results are reported in MPa. The Young’s modulus in bending, when estimated, was obtained from the initial force-stroke slope $S = \Delta F / \Delta \delta$ according to ASTM C1161 data reduction guidance for three point bending of rectangular beams:

$$E = \frac{L^3 S}{4 b d^3} \quad (2)$$

This formulation avoids non physical ratios of “stress/strain at failure” and reflects small deflection beam theory.

Data handling, limitations, and quality assurance

Because each thermal history condition was represented by a single crucible, no statistical analysis (e.g., Weibull plotting) was attempted. All dimensional measurements and raw load-displacement data were archived; SEM fields of view and image analysis steps were documented to ensure reproducibility. The exploratory nature of the test matrix is clearly disclosed alongside the departures from ASTM C1161 so that flexural results are interpreted as comparative metrics rather than standardized material properties.

Results and discussion

Structural characterization (XRD)

Figure 2 shows the X-ray diffraction (XRD) patterns collected for the as-received (AT), high-temperature (HT, 1350 °C/12 h), and cold-treated (CT, −195 °C/12 h) crucibles. All diffractograms are dominated by α - Al_2O_3 (corundum), as evidenced by the set of reflections near 35.1° (104), 43.3° (113), 52.5° (024), 57.5° (116), and 66–68° 2 θ (300/1.10.4) for Cu K α radiation, peak families that are canonical for corundum and widely tabulated in ICDD/NIST resources and corundum intensity studies.

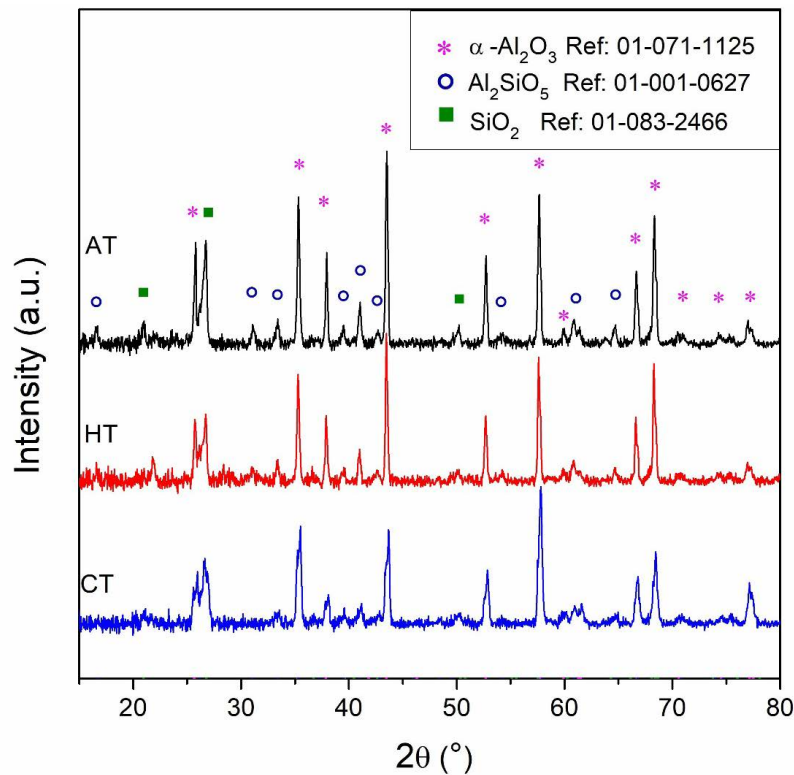
Low angle features around 26.6° 2 θ and, depending on the specimen, near 22.8° 2 θ are not characteristic of α - Al_2O_3 ; they are consistent instead with SiO_2 (quartz) and aluminosilicate-type contributions, respectively. This assignment agrees with the relative intensities predicted/reported for corundum (where the strongest peaks are located at ~35–58° 2 θ) and helps avoid misindexing the quartz reflection as corundum.

Across AT, HT, and CT, no new crystalline phases appeared within the detection limit, indicating phase stability of α - Al_2O_3 over the applied thermal histories (Figure 2). Minor signals assigned to SiO_2 and an Al_2SiO_5 -type phase were present in all conditions with much lower intensities than corundum, suggesting secondary fractions likely associated with raw material residuals or process-induced contamination in the artisanal manufacturing route.

Given the HT schedule (1350°C) and the Al_2O_3 – SiO_2 system, mullite formation cannot be ruled out; the peak profiles associated with Al_2SiO_5 can overlap with

mullite families at moderate intensity, and definitive discrimination would require Rietveld refinement and/or selective peak fitting beyond this exploratory scope.

Figure 2. DRX patterns of samples AT, HT, and CT.



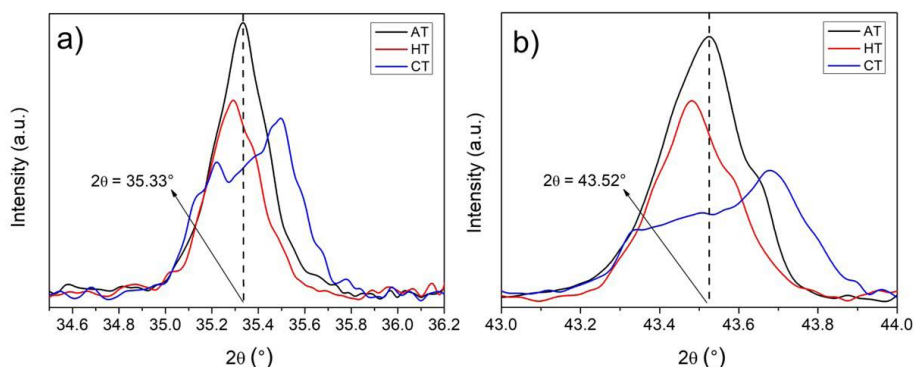
Source. Own elaboration.

A careful overlay (Figure 3) reveals small, systematic peak shifts between conditions at the strongest α - Al_2O_3 reflections (e.g., $\sim 35.1^\circ$ and $\sim 43.3^\circ$ 2θ). The HT pattern exhibits slight shifts to lower 2θ , qualitatively consistent with increased interplanar spacing (lattice expansion and/or relaxation of residual stresses after the 1350°C dwell), whereas CT shows slight shifts toward higher 2θ values, compatible with a lattice-contraction scenario (Luo *et al.*, 2020). While such trends are physically plausible for ceramics

subjected to distinct thermal histories, any strain quantification would require an internal standard and Rietveld parameter refinement to separate instrument drift from true lattice changes (Fan *et al.*, 2021; Hattali *et al.*, 2010; Rietveld, 2014).

Figure 3 shows the XRD patterns of handmade α - Al_2O_3 crucibles after AT, HT, and CT treatments. Dominant α - Al_2O_3 reflections are labeled, and low-intensity features consistent with $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_5$ are

Figure 3. Magnified views around the (104) and (113) α -Al₂O₃ reflections, highlighting small peak shifts among AT/HT/CT.



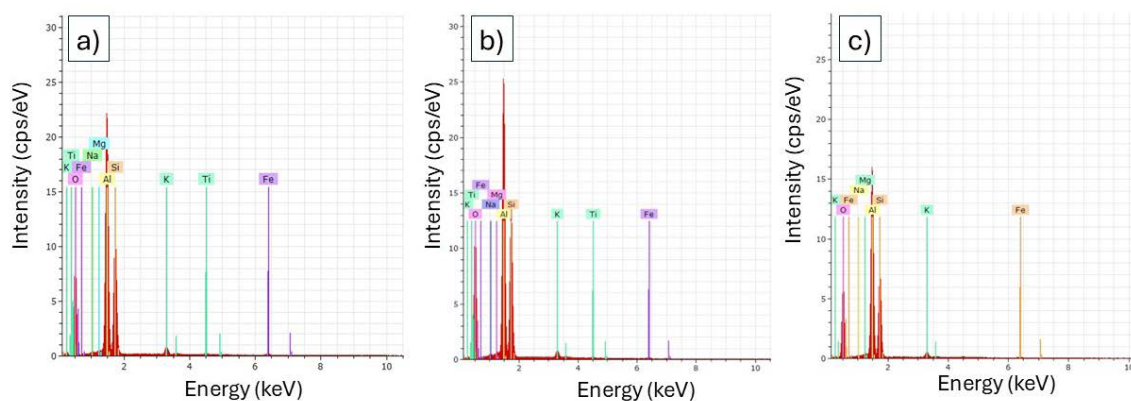
Source. Own elaboration.

Compositional characterization (EDS)

Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) confirms that O and Al are the predominant elements in all conditions, with Si consistently present, supporting the XRD observation of silica/aluminosilicate secondary species (Figure 4). Trace amounts of K, Na, Mg, Ti, and Fe were detected at <1 at.% (Table 1), compatible with impurities

originating from raw materials and/or the artisanal manufacturing process. Within the resolution limits of EDS on fractured surfaces, no systematic compositional change was observed between AT, HT, and CT. The slight increase in O and corresponding decrease in Al in HT are within the typical semiquantitative uncertainty of the technique and are therefore not interpreted as evidence of volatilization/segregation (Musket and Strausser, 1980).

Figure 4. EDS spectra for (a) AT, (b) HT, and (c) CT.



Source. Own elaboration.

Table 1. Elemental composition (at.%) of handmade α -Al₂O₃ crucibles after the three thermal histories: AT, HT (1350 °C, 12 h), and CT (−195 °C, 12 h) measured by EDS on fracture surfaces.

Element	AT (at.%)	HT (at.%)	CT (at.%)
O	64.63	66.05	64.63
Al	22.82	21.01	22.82
Si	10.63	10.94	10.63
K	0.63	0.53	0.63
Na	0.58	0.72	0.53
Mg	0.45	0.53	0.54
Fe	0.16	0.12	0.17
Ti	0.10	0.10	-
Total	100	100	100

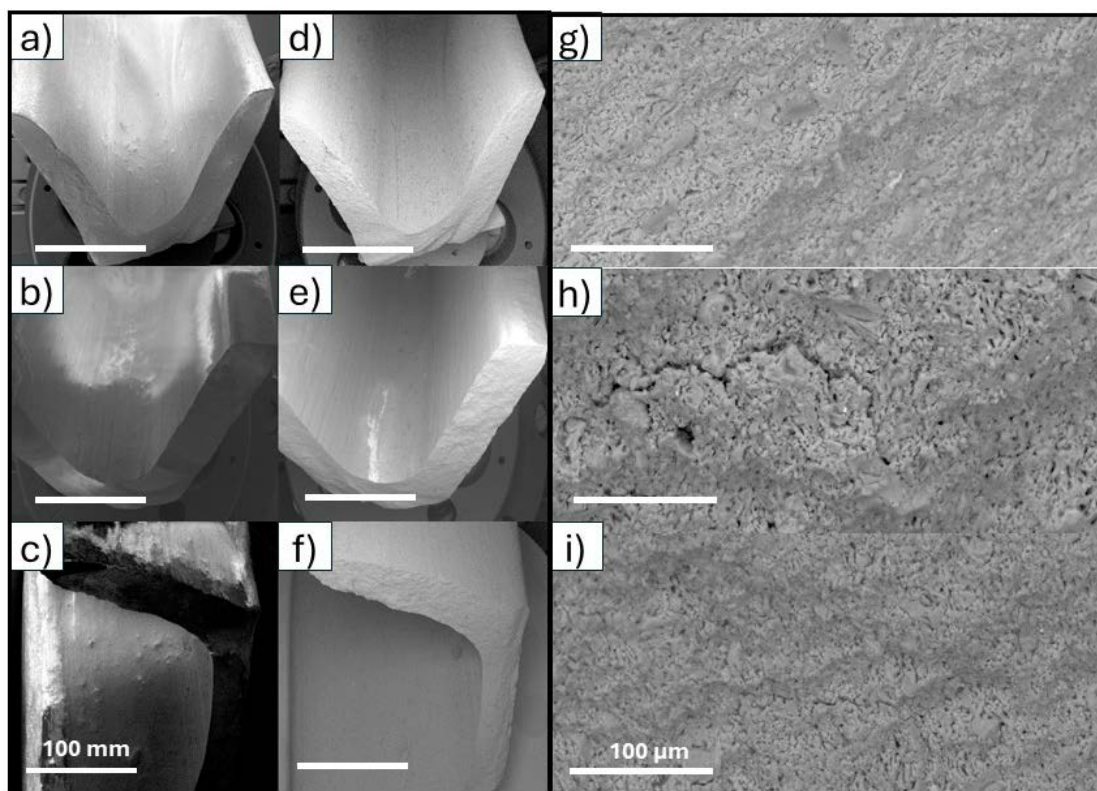
Source. Own elaboration.

Morphological characterization

Surface morphology was examined by SEM at multiple magnifications to assess the pore population, grain-scale features, and thermally induced defects in AT, HT, and CT. Representative micrographs are shown in Figure 5. At low/intermediate magnification, the three conditions exhibit a broadly similar intergranular morphology typical of sintered α -Al₂O₃, with a discontinuous pore network. At higher magnification, however, the HT specimen shows a distributed microcrack population intersecting grain boundaries and ligament bridges, whereas CT does not display a pervasive microcrack network within the same magnification range, consistent with literature reports of thermally driven microcracking in oxide ceramics (Sun *et al.*, 2024).

To quantify porosity differences, fracture micrographs were analyzed by ImageJ/Fiji (calibration with the scale bar, background correction, fixed threshold segmentation, and binary cleanup with a minimum feature size), following best-practice digital image analysis procedures (Schneider *et al.*, 2012). For each condition, *n* representative fields were processed, and the equivalent pore area (projected, μm^2) was extracted. The resulting mean $\pm$ SD values were 6.51 ± 1.60 (AT), 8.12 ± 1.67 (HT), and 5.38 ± 1.22 (CT), indicating a larger projected pore size after the 1350 °C dwell (HT) and a smaller value after cold exposure (CT) (Figure 5). The rank order HT > AT > CT was consistent across the analyzed fields. Variations of pore size with thermal exposure are well documented in ceramics and porous glass ceramic systems, where high temperature holds can promote coarsening, crack formation, and redistribution of porosity (Guo *et al.*, 2022; Nigay *et al.*, 2017).

Figure 5. SEM surface morphology of handmade α -Al₂O₃ crucibles AT (a–c, g), HT (1350 °C/12 h; d–e, h), and CT (–195 °C/12 h; f, i) conditions. Left and center columns (a–f) show low-magnification views (scale bar = 100 μ m), whereas the right column (g–i) presents high-magnification micrographs (scale bar = 100 μ m) showing grain-scale porosity and the distributed microcrack network observed in HT (h).



Source. Own elaboration.

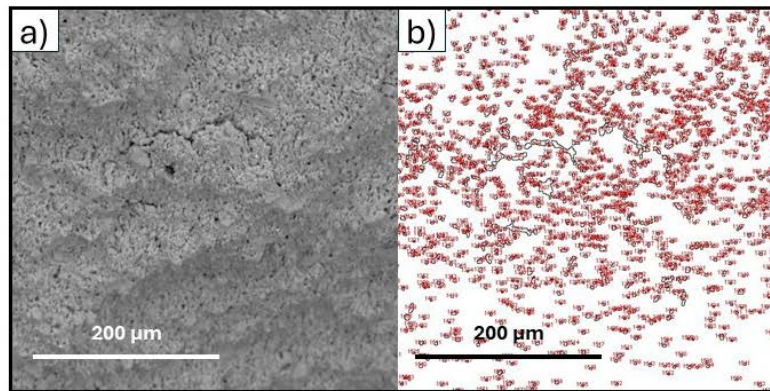
Mechanistically, the increase in equivalent pore area for HT can arise from pore coalescence/coarsening and grain boundary relaxation during the high temperature dwell, while the decrease for CT may reflect closure of narrower ligament voids in the projected fracture surface and a shift of the detectable pore population.

Because fracture surface stereology preferentially samples open porosity and 2D projections, these interpretations remain qualitative; a volumetric cross check (e.g., the Archimedes method) would better

resolve the open/closed pore balance as illustrated by the segmentation workflow in Figure 6.

In brittle ceramics, larger and/or more connected defects increase stress concentration and tend to lower flexural strength while raising scatter, whereas refined pore populations improve characteristic strength and reliability, trends repeatedly observed in Al₂O₃ systems and relevant to the mechanical response discussed later (Guo *et al.*, 2022; Ikesue and Aung, 2023; Nigay *et al.*, 2017).

Figure 6. Pore stereology on SEM fracture surfaces (example shown for AT).



Note. (a) Raw secondary electron micrograph; (b) segmented pore mask overlaid on the same field (red) used to compute the equivalent pore area (μm^2). Scale bar = 100 μm . The same ImageJ/Fiji workflow (fixed threshold and minimum feature size) was applied to AT, HT, and CT; report as mean $\pm$ SD over n fields per condition.

Source. Own elaboration.

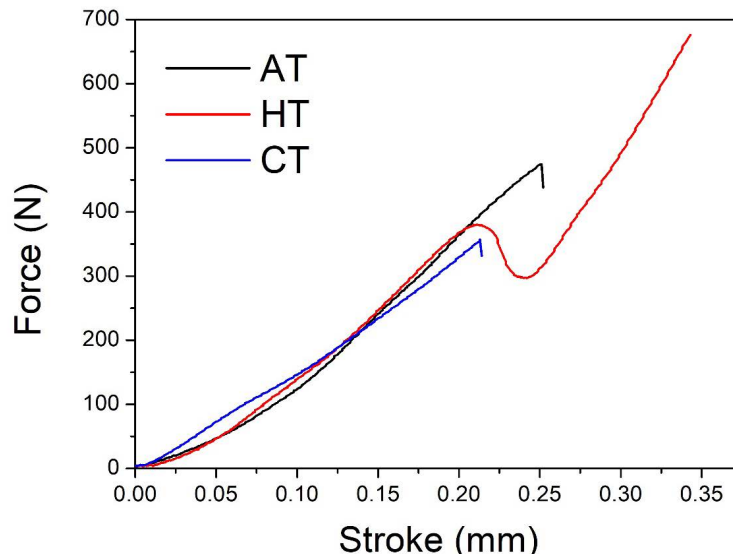
Mechanical testing (three point bending)

To assess the effect of thermal history on mechanical response, three point bending tests were performed on one crucible per condition (AT, HT, CT) using a universal testing machine (Shimadzu AG-IS, 5 kN cell). The span (L), width (b), and thickness (d) at the loaded section were measured immediately prior to testing. Figure 7 plots the resulting force-displacement curves. In the initial linear regime, the CT specimen exhibits a slightly higher slope (apparent stiffness) than AT and HT; as the displacement increases, the HT specimen attains the highest peak force and, critically, shows a pre-failure nonlinear segment (arrow in Figure 7) before final fracture. At room temperature, macroscopic plasticity is not expected in alumina; such nonlinearity is instead consistent with stable propagation of preexisting microcracks and distributed

crack-bridging events that dissipate energy without immediate catastrophic failure. The behavior aligns qualitatively with the microcrack network observed in HT by SEM (Section 3.3).

Quantitative outcomes are summarized in Tables 2-3 (peak force F_{max} , displacement at peak load, apparent flexural stress, and maximum strain). In our dataset, HT reached the largest F_{max} and displacement at peak load, indicating the highest load bearing capacity and the largest elastic plus nonlinear deflection prior to failure. Conversely, CT showed the lowest F_{max} and displacement, consistent with the most brittle response among the three conditions. Because $n=1$ per condition, these differences must be regarded as comparative/indicative rather than statistically representative; a full characterization will require ASTM C1161 compliant bars with ≥ 10 replicates per condition to enable Weibull analysis and size scaling.

Figure 7. Force-stroke curves from three point bending at room temperature for handmade α -Al₂O₃ crucibles after the three thermal histories: AT (as received, black), HT (1350 °C/12 h, red), and CT (−195 °C/12 h, blue).



Source. Own elaboration.

Table 2. Three-point bending results for handmade α -Al₂O₃ crucibles after the three thermal histories: AT (as-received), HT (1350 °C/12 h), and CT (−195 °C/12 h). Peak force and displacement at peak are reported together with flexural stress and strain at peak.

Sample	MaxForce (N)	MaxDisp (mm)	MaxStress (N/mm ²)	MaxStrain (%)
AT	474.063	0.251	42665.6	0.04183
HT	675.625	0.343	60806.3	0.05717
CT	357.031	0.213	32132.8	0.03550

Source. Own elaboration.

Taken together with the SEM observations, the microcracks observed only in the HT condition can rationalize the load-bearing behavior when interpreted through the lens of fracture mechanics in ceramics. It is important to distinguish between open porosity, which weakens ceramics when pores are large, interconnected, and randomly oriented, and thermally induced distributed microcracking, which can

operate as a toughening mechanism. As discussed by Clegg and subsequent studies on polycrystalline alumina (Brahmadathan and Lakshmana, 2024), a network of fine, controlled microcracks at the grain scale can increase the apparent fracture resistance by promoting crack deflection and branching and distributed energy dissipation without necessarily reducing flexural strength, provided that critical flaws (large pores)

do not increase in proportion (Jia *et al.*, 2026; Nigay *et al.*, 2017; Brahmadathan and Lakshmana, 2024). This behavior is consistent with microcrack toughening, in which numerous distributed microcracks facilitate deflection, branching, and arrest of the main crack, increasing the effective fracture surface area and the energy dissipated during failure (Barros *et al.*, 2021). According to the Evans & Faber model (1984), microcrack toughening is effective when grain size is on the order of 10–50 μm and microcrack density is sufficiently high to deflect the main crack without forming a percolating fracture path. Although K_{IC} was not measured in this study, the pseudo plastic segment in the HT force-stroke curve (Figure 6) constitutes indirect evidence of a distributed energy dissipation mechanism consistent with microcrack toughening (Barros *et al.*, 2021; Maiti *et al.*, 2022).

Table 3 summarizes the bending modulus (E) and the reported flexural strength (FS) for each condition. The highest E is found in HT (331.78 GPa), followed by AT (238.87 GPa) and CT (106.17 GPa). In the literature, the flexural strength of alumina typically lies in the ~300–550 MPa range for dense, high purity bodies, values characteristic of a hard yet intrinsically brittle ceramic (Shakirzyanov *et al.*, 2025). Conversely, E is known to decrease systematically with porosity; for example, aluminas with ~9% porosity may show $E \approx 114$ GPa, whereas porosity levels of 20–50% can reduce E to ~17–83 GPa (Asmani *et al.*, n.d.; Nakajima *et al.*, 2019). Within the exploratory nature of our dataset, the present E values are compatible with an estimated porosity of ~5–15%, coherent with the artisanal sintering route of the crucibles. A volumetric porosity measurement (e.g., the Archimedes method) is recommended for future work to validate this correlation.

Table 3. Young's modulus (E) and flexural strength (of) from three point bending of handmade α -Al₂O₃ crucibles after the three thermal histories: AT (as received), HT (1350 °C/12 h), and CT (–195 °C/12 h), measured at room temperature .

Sample	E (GPa)	FS (Mpa)
AT	238.87	4.98
HT	331.78	6.91
CT	106.17	2.21

Source. Own elaboration.

In contrast to the toughening-like response inferred for HT, the CT condition exhibited a different mechanical signature relevant to prolonged low-temperature storage or liquid nitrogen assisted syntheses. The smaller equivalent pore area (5.38 μm^2) and lower

flexural strength reported for CT suggest that rapid cooling to –196 °C may produce differential contraction of the crystal lattice (also reflected by right-shifted XRD peaks), introducing microstresses without developing an observable microcrack network.

This, together with the reduced E (106.17 GPa), indicates that artisanal alumina crucibles are less suitable for cyclic cold use unless thermally consolidated beforehand.

To understand the origin of these differences across conditions, structural and compositional results were integrated. No phase transformation was detected by XRD after thermal treatments, supporting structural stability. Likewise, EDS revealed no elemental segregation. These findings indicate that the observed mechanical variations are primarily associated with microstructural evolution and deformation mechanisms (e.g., porosity architecture and microcracking) rather than bulk compositional changes. Given that phases and stoichiometry were preserved at both high and low temperatures for all three specimens, the mechanical behavior can be attributed mainly to morphology and microstructure.

Overall, these results help contextualize the application envelope of the artisanal crucibles. The bending strengths we obtained in this study are lower than the ~300-550 MPa range reported for dense, high-purity alumina but comparable to the ~20-30 MPa reported for slip-cast Al_2O_3 crucibles with moderate porosity (Fan *et al.*, 2023b). This suggests that the crucibles studied here, particularly under the HT condition, possess adequate mechanical resistance for melting at moderate temperatures (below the melting point of most non-ferrous metals), whereas they may be insufficient for more demanding applications such as steel or high-temperature alloy melting above ~1500 °C.

Conclusions

X-ray diffraction demonstrated that $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (corundum) is the dominant phase in all conditions (AT, HT, CT), with no formation or disappearance of crystalline phases after thermal treatments at 1350 °C and -196 °C, confirming high structural stability of alumina within the explored temperature window. Minor $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_5$ -type signals, consistent with aluminosilicate residues from processing, were present at low intensity and did not alter the phase field. The mechanical response can therefore be attributed primarily to $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ coupled with microstructural rather than compositional changes.

SEM and pore stereology corroborated thermal-history-dependent defect populations: a larger projected pore area with distributed microcracking in HT and a smaller projected pore area in CT. This trend is consistent with reports on porous alumina and other refractories, where thermal history governs pore size, connectivity, and morphology, directly impacting stiffness, flexural response, and apparent toughness. In the crucibles studied, the slight decrease in projected pore area for CT and the thermally induced microcrack network in HT rationalize the observed bending behavior: pores act as stress concentrators and fracture origins, with larger pores being most deleterious, whereas fine distributed microcracks at the grain scale dissipate energy through crack deflection and branching, temporarily impeding unstable propagation. Consequently, the HT microstructure exhibited greater resistance

to crack advance and a pre-failure nonlinear regime in bending, while AT and CT showed a more brittle-like response.

Overall, the artisanal α -Al₂O₃ crucibles studied here deliver mechanical performance compatible with moderate-temperature melting operations below the melting points of most non-ferrous metals. However, their flexural behavior, consistent with porous and slip-cast alumina, indicates they are not suitable for the most demanding high-temperature applications, such as steel or advanced-alloy processing above approximately 1500 °C, unless densification and defect control are improved. Given $n=1$ per condition and the use of non-standard specimen geometries, these conclusions should be interpreted as comparative and indicative. Full validation will require ASTM C1161-compliant bars with at least 10 replicates per condition, Weibull statistical analysis, fractographic evaluation of failure origins, Archimedes porosity measurements, and thermal-shock cycling tests to define practical service windows.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES Foundation), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil), the Santa Catarina State Research and Innovation Support Foundation (FAPESC), and the Brazilian Funding Agency for Studies and Projects (FINEP).

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

Declaration of generative AI and AI assisted technologies in the writing process

We acknowledge the use of generative artificial intelligence (AI) tools exclusively to proofread and improve language clarity. All AI assisted outputs were critically reviewed and verified by the authors to ensure accuracy and originality. The authors take full responsibility for the content of this publication.

Funding

No funds, grants, or other support was received.

Ethics

This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

References

- Alimdjanova, D. I., Babakhanova, Z. A., Ayupov, U. M., Nusretov, R. A., & Kurniawan, T. A. (2025). Fireclay crucibles with improved properties for assaying ores. *Glass and Ceramics*, 82, 171–176. <https://doi.org/10.1007/s10717-025-00767-5>
- Asmani, M., Kermel, C., Leriche, A. & Ourak, M. (n.d.). Influence of porosity on Young's modulus and Poisson's ratio in alumina ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 21(8):1081-1086.
- Barry, K., Sawadogo, Y., Sawadogo, M., Sorgho, B., Seynou, M., Guel, B., Blanchart, P., & Zerbo, L. (2024). Manufacture of industrial refractory crucibles based on clays from Burkina Faso. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 12, 79–90. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2024.122006>
- Barros, M., Jelitto, H., Hotza, D., Janssen, R. (2021). Microstructure and mechanical behavior of TiO₂ MnO doped alumina/alumina laminates. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(3), 1047–1057. <https://doi.org/10.1111/jace.17490>
- Brahmadathan, V. B., & Lakshmana, R. C. (2024). Development of micro-mechanical constitutive model for alumina at high strain rates using unified mechanics theory. *Procedia Structural Integrity* 60, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.043>
- Evans, A.G. & Faber, K.T. (1984). Crack growth resistance of microcracking brittle materials. *Journal of the American Ceramic Society* 67, 255–260. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1984.tb18842.x>
- Fan, J., Fan, H., Song, Z., Guo, Y., Li, M., Li, X., Qi, C., & Xu, X. (2023a). Thermal-shock stable Al₂O₃ crucible for superalloy smelting through slip casting with particle gradation. *Ceramics International* 49, 8762–8771. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.022>
- Fan, K., Jiang, W., Ruiz-Hervias, J., Baudín, C., Feng, W., Zhou, H., Bueno, S., & Yao, P. (2021). Effect of Al₂TiO₅ content and sintering temperature on the microstructure and residual stress of Al₂O₃–Al₂TiO₅ ceramic composites. *Materials*, 14(24), 7624. <https://doi.org/10.3390/ma14247624>
- Guo, F., He, Z., Liu, L., Li, J. & Huang, Y. (2022). High-strength and corrosion-resistant Al₂O₃ ceramics with excellent closed-cell structure. *Ceramics International* 48(23), 33160–33166. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.253>
- Hattali, M. L., Valette, S., Ropital, F., Mesrati, N., Tréheux, D. (2010). Calculation and experimental determinations of the residual stress distribution in alumina/Ni/alumina and alumina/Ni/nickel alloy systems. *J Mater Sci*, 45(15), 4133–4140. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4502-8>
- Ikesue, A. & Aung, Y. L. (2023). Anisotropic alumina ceramics with isotropic optical properties. *Journal of Advanced Ceramics* 12(1), 72–81. <https://doi.org/10.26599/JAC.2023.9220667>

- Jia, X., Cao, X., Cheng, X., Zhang, Z., Wang, Q., Zhou, J. & Li, W. (2026). Strain rate-dependent indentation responses and microstructural evolution mechanisms of aluminum oxynitride ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 109, e70470. <https://doi.org/10.1111/jace.70470>
- Khan, S.A., Mohd Zain, Z., Siddiqui, Z., Khan, W., Aabid, A., Baig, M. & Abdul Malik, M. (2024). Development of Magnesium Aluminate (MgAl₂O₄) Nanoparticles for refractory crucible application. *PLoS ONE*, 19(1), e0296793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296793>
- Luo, L., Zhang, T., Zhang, X., Yun, R., Lin, Y., Zhang, B. & Xiang, X. (2020). Enhanced hydrogen production from ethanol photoreforming by site-specific deposition of au on Cu₂O/TiO₂ p-n junction. *Catalysts*, 10(5), 539. <https://doi.org/10.3390/catal10050539>
- Maiti, P., Sadhukhan, D., Ghosh, J., & Mukhopadhyay, A.K. (2022). Nanoscale plasticity in titania densified alumina ceramics. *Journal of Applied Physics*, 131(13), 135107. <https://doi.org/10.1063/5.0081872>
- Makireddi, D., Ghuge, V. D., Thakare, G., & Thawre, M. M. (2020). Application of two-step sintering cycle to 20–30 nm α -Al₂O₃ compacts to investigate microstructure, hardness, strength, density and corundum formation. *Materials Research Express*, 6(12), 1250e1. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab653b>
- Munro, R. G. (1997). Evaluated material properties for sintered alpha alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(8), 1919–1928. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb03074.x>
- Musket, R. G., & Strausser, Y. E. (1980). Detection of monolayer quantities of oxygen on silicon using energy-dispersive x-ray spectrometry. *Applied Physics Letters*, 37(5), 478–480. <https://doi.org/10.1063/1.91737>
- Nakajima, D., Kikuchi, T., Yoshioka, T., Matsushima, H., Ueda, M., Suzuki, R.O., & Natsui, S. (2019). A superhydrophilic aluminum surface with fast water evaporation based on anodic alumina bundle structures via anodizing in pyrophosphoric acid. *Materials*, 12(21), 3497. <https://doi.org/10.3390/ma12213497>
- Nigay, P.M., Cutard, T., & Nzihou, A. (2017). The impact of heat treatment on the microstructure of a clay ceramic and its thermal and mechanical properties. *Ceramics International*, 43(2), 1747–1754. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.084>
- Nwankwo, E. I., Onyegirim, S. N. K., Owuama, K. C., & Ubani, C. A. (n.d.) Engineering crucible pots: a review of kaolin-based composites with functional additives. *International Journal of Applied and Natural Sciences*, 3(2), 50–62.
- Rietveld, H. M. (2014). The Rietveld method. *Physica Scripta*, 89(2), 098002. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/89/9/098002>

- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Shakirzyanov, R., Maznykh, S., Garanin, Y., & Kaliyekperov, M. (2025). Compositional effects on mechanical performance of zirconia–magnesia–alumina ceramics. *Ceramics*, 8(3), 114.
- Sun, Z., Lin, H., Zhang, L., Cai, X., Feng, T., Zhang, J., & Yang, X. (2024). Investigation of phase and microstructural transformations in different alumina-silica fibers at varied heat treatment temperatures: Exploring the mechanism of Silica's influence. *Ceramics International*, 50(21), 39406–39421. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.315>

A los autores

La revista *Journal of Research in Engineering Sciences* publica artículos que cumplen con los criterios internacionales de calidad académico-científica, en los cuales se presentan elementos relevantes como la referenciación bibliográfica, las metodologías con base en el diseño experimental científico y el soporte estadístico. Además, el soporte teórico en la discusión de los resultados y conclusiones que aporten al desarrollo sostenible de la sociedad y el ambiente. Los trabajos que se presenten deben ser originales, inéditos, no estar a consideración de otra revista y su contenido debe ser responsabilidad exclusiva de los autores, sin comprometer en forma alguna a la revista. Asimismo, en ella se podrán publicar en inglés los trabajos originalmente escritos en ese idioma, aunque el idioma oficial de la revista es el español. Se debe especificar a qué tipo de artículo corresponde la propuesta:

- a) **Artículo de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- b) **Artículo de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, acerca de un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
- c) **Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo de la ingeniería, haciendo énfasis en la sustentabilidad ambiental y en el desarrollo regional con enfoque territorial. Lo anterior, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

Los trabajos y la correspondencia pueden ser enviados al editor a la siguiente dirección:
Editor Journal of Research in Engineering Sciences
Correo electrónico: JournalofResearch@uniagraria.edu.co
Teléfono: 57 (1) 6671515 ext. 158
Facultad de Ingeniería
Fundación Universitaria Agraria de Colombia- UNIAGRARIA
Calle 170 No. 54A - 10, Villa del Prado. Bogotá, Colombia.

La revista *Journal of Research in Engineering Sciences* publica artículos que cumplen con los criterios internacionales de calidad académico-científica, en los cuales se presentan elementos relevantes como la referenciación bibliográfica, las metodologías con base en el diseño experimental científico y el soporte estadístico. Además, el soporte teórico en la discusión de los resultados y conclusiones que aporten al desarrollo sostenible de la sociedad y el ambiente. Los trabajos que se presenten deben ser originales, inéditos, no estar a consideración de otra revista y su contenido debe ser responsabilidad exclusiva de los autores, sin comprometer en forma alguna a la revista. Asimismo, en ella se podrán publicar en inglés los trabajos originalmente escritos en ese idioma, aunque el idioma oficial de la revista es el español. Se debe especificar a qué tipo de artículo corresponde la propuesta:

- a) **Artículo de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- b) **Artículo de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, acerca de un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
- c) **Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo de la ingeniería, haciendo énfasis en la sustentabilidad ambiental y en el desarrollo regional con enfoque territorial. Lo anterior, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

Los trabajos y la correspondencia pueden ser enviados al editor a la siguiente dirección:

Editor *Journal of Research in Engineering Sciences*

Correo electrónico: JournalofResearch@uniagraria.edu.co

Teléfono: 57 (1) 6671515 ext. 158

Facultad de Ingeniería

Fundación Universitaria Agraria de Colombia- UNIAGRARIA

Journal of Research in Engineering Sciences

Publicación de la Fundación Universitaria
Agraria de Colombia, *UNIAGRARIA*.
Editado por Entrelibros SAS
Bogotá D.C. - 2021

Contenido

Nota editorial Decano Javier D. Hoyos-Leyva Ph.D.	5
Evaluación del extracto de semillas de moringa como coagulante natural para la reducción de la turbidez del agua en el proceso de tratamiento del acueducto Mariano Ospina en el municipio de Guasca, Cundinamarca Arevalo J., Bernal M., Castañeda K. y Cardenas C.	8
Diseño teórico y estructuración de un esparcible tipo margarina a partir de aceite de sachá inchi (<i>Plukenetia volubilis</i> L.) mediante fraccionamiento físico: una alternativa nutricionalmente superior Gómez Cardenas, E. F. y Hoyos Leyva, J. D.	21
Microencapsulation strategies in ruminant nutrition: Advances in formulation, delivery systems, and functional applications Villamil-Galindo, E., Jiménez-Marquéz, S., Barrero-Echeverría, M. y Hoyos-Leyva, J. D.	35
Thermal treatment effects on the microstructure and flexural performance of handmade α-Al₂O₃ crucibles Rueda Cadavid, D. A., Caicedo Chacon, W. D. y Morales Carreño, A. N.	54
Instrucciones para los autores	73