



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y POSGRADO

— MEMORIA —



20^a VERANO
DE INTRODUCCIÓN A LA
CIENCIA

★ **2026** ★

UAQ | CRECER EN LA DIVERSIDAD

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano

Rectora

Dr. José Guadalupe Gómez Soto

Secretario Académico

Dr. Manuel Toledano Ayala

Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Directora de Investigación

M. en GIC. Karina Villarauz Camargo

Coordinadora de Difusión y Enlace

Dirección de Investigación y Posgrado

Dr. Manuel Toledano Ayala

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Comité Organizador

M. en GIC. Karina Villarauz Camargo

Coordinadora de Difusión y Enlace

C. Laura Pilar Wendolyn Vázquez Jasso

Secretaria de la Coordinación

Apoyo logístico

Publicación especial

Del 20° Verano de Introducción a la Investigación

Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n

Código Postal 76010, Querétaro, Qro., México.



INTRODUCCIÓN

Una de las funciones sustantivas de la universidad es la investigación, tarea a través de la cual la **Universidad Autónoma de Querétaro** asume el compromiso de atender algunas de las problemáticas sociales más apremiantes. Aunado a lo anterior, la investigación, al estar vinculada con la docencia y, en la mayoría de los casos, con la vinculación permite proporcionar a las y los estudiantes una formación integral.

Desde la Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, a través de la Dirección de Investigación se propone la realización de acciones que contribuyan a la formación en investigación de nuestro estudiantado, una de estas es el **Verano de la Ciencia que se organiza anualmente**. Esta actividad, consiste en una estancia de cinco semanas en donde las y los estudiantes colaboran dentro de un proyecto de investigación tutelado por una persona investigadora de nuestra universidad, con el objetivo de acercarlos a la ciencia, formarlos en investigación y despertar el interés por cursar un posgrado.

El Verano de la Ciencia se realiza en dos modalidades: el **Verano de la Ciencia UAQ**, dirigido a estudiantes de licenciatura que cursan del quinto semestre en adelante y el **Verano de Introducción a la Investigación** dirigido a estudiantes que cursan del primero al cuarto semestre. En estos programas, pueden participar estudiantes y docentes de cualquier facultad, lo cual amplía la oportunidad de formación tanto para estudiantes como para investigadoras e investigadores.

Este año celebramos la edición número **20° del Verano de Introducción a la Investigación**, en el que participaron **21 estudiantes asesorados por 14 investigadores**. En la presente compilación presentamos el producto final de las y los participantes, el cual consiste en un informe de actividades de la estancia con formato de artículo científico.

Los trabajos presentados, además de que ejercitan a las y los estudiantes en la escritura con fines de comunicación académica, muestra el trabajo realizado y los aprendizajes adquiridos. Cabe señalar que todos los trabajos fueron revisados y avalados por las personas investigadoras que fungieron como anfitriones.

Agradecemos a las y los estudiantes, a las personas investigadoras por su participación e interés.

Deseamos que lo aprendido trascienda en la formación personal y científica de todas y todos.

Atentamente

“Educo en la Verdad y en el Honor”

Dr. Manuel Toledano Ayala
Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes
Directora de Investigación

20° VERANO DE INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN, UAQ

INDICE

Participantes	Proyecto
Valeria Olguín-Velázquez; Alexis Matadamas-Ortiz	Efecto de la carga de quercetina en nanopartículas de sílice mesoporosa sobre su capacidad antioxidante.
Reyes Bravo, Ricardo; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia	Criogel Basado en Chicharo y Extracción de Derivados de Café Usado
Bertha Isabel Carvajal Gámez; Ana Karen Hernández Juárez; Kathia Lorena Rubio Cruz	Identificación in silico del inhibidor A de elastasa de <i>Rhipicephalus sanguineus</i>
Velazquez García, Manuel Fabian; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia	Criogeles de proteína chicharo y extracción de subproductos de café
Joshua Sierra Jiménez; Dra. Paola Itzel Bautista Espinoza	Desarrollo de una película inteligente y bioactiva a base de lavanda mexicana con respuesta colorimétrica inducida para aplicaciones en empaques
Joel Alfredo Ramirez Arriaga; María Cristina Ávalos González; Carlos Hernández Rodríguez; Adrián Sosa Domínguez	Repetibilidad en un electrodo de ion selectivo de Litio
Luna Montaña Ximena; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia	Extracción de bioactivos de café para aerogeles cosméticos.
Victor Armando Dionisio Olamendi; María Cristina Ávalos González; Carlos Hernández Rodríguez; Adrián Sosa Domínguez	Evaluación de la precisión intermedia de un método para cuantificar Li
Marieli Moyado Lino; Beatriz Rosas Rodríguez	Política de dividendos y diversidad en consejos de administración
Saúl Guzmán Rodríguez; Juana Isela Rojas Molina; Alexa Janine Arredondo Villacaña; Mariana Arredondo Soto	Nanoesferas proteína-polisacárido transportadoras de calcio en ratas OVX
Medrano Martínez Julieta; Castañeda Olvera María Danaé; Abadía García Lucia Guadalupe	Valorización del suero lácteo mediante hidrólisis enzimática y fermentación
María Guadalupe Martinez Medina; Monserrat Escamilla García	Evaluación del potencial antagonista de un consorcio microbiano frente a fitopatógenos del jitomate
Díaz Cano, César Alejandro; Mendoza Díaz, S. O.; González Galeana, Claudio.	Hidrogel de garbanzo y jamaica agotada para impresión 3D

Kimberly Quintero Mora; Dra. Monserrath Escamilla Garcia.	Consorcio microbiano para el biocontrol de fitopatógenos en jitomate
Ramírez Arteaga Daniela; Herrera Miguel Arturo; Abadía García Lucía Guadalupe	Suero lácteo: de subproducto a fuente de fibra prebiótica mediante ultrasonido

Efecto de la carga de quercetina en nanopartículas de sílice mesoporosa sobre su capacidad antioxidante.

Valeria Olguín-Velázquez¹, Alexis Matadamas-Ortiz²

¹Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro. volquin03@alumnos.uaq.mx

²Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro
amatadamas717@alumnos.uaq.mx

Resumen:

La quercetina es un compuesto polifenólico con elevada capacidad antioxidante; sin embargo, su baja biodisponibilidad e inestabilidad en el ambiente fisiológico limitan su bioactividad. Las nanopartículas de sílice mesoporosa (NSM) constituyen una alternativa para mejorar su estabilidad y favorecer su liberación controlada. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la carga de quercetina en NSM funcionalizadas con grupos amino (A-NSM), carboxilo (C-NSM) o tiol (T-NSM) sobre su capacidad antioxidante a través del tiempo. Para ello, se realizó un ensayo de liberación en solución amortiguadora de fosfatos (PBS, pH 7.4) a 37 °C y se determinó la capacidad antioxidante mediante el método ABTS durante 2 h. Además, se evaluó la contribución de la presencia de las nanopartículas en el medio mediante el análisis de muestras centrifugadas y no centrifugadas. Los resultados mostraron que las T-NSM presentaron la mayor capacidad antioxidante (77.41 ± 7.88 % de inhibición) con respecto a la quercetina libre (54.90 ± 3.27), mientras que las A-NSM mantuvieron la actividad del compuesto (68.93 ± 7.27) y las NSM sin funcionalizar la disminuyeron (27.71 ± 0.59). Asimismo, se observó que los tratamientos no centrifugados mostraron un mayor efecto antioxidante, indicando que el mecanismo no solo depende de la quercetina liberada, sino también de la fracción adsorbida en la superficie o de la interacción directa del material con los radicales. Los hallazgos obtenidos evidencian que las NSM funcionalizadas constituyen un vehículo eficiente de quercetina,

favoreciendo su potencial aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos.

Abstract:

Quercetin is a polyphenolic compound with high antioxidant capacity; however, its low bioavailability and instability under physiological conditions limit its bioactivity. Mesoporous silica nanoparticles (MSN) represent a promising strategy to improve quercetin stability and provide controlled release. This study aimed to evaluate the effect of quercetin loading into amino-functionalized (A-MSN), carboxyl-functionalized (C-MSN), or thiol-functionalized (T-MSN) mesoporous silica nanoparticles on their antioxidant capacity over time. A release assay was performed in phosphate-buffered saline (PBS, pH 7.4) at 37 °C, and antioxidant capacity was determined using the ABTS assay through a period of 2 h. In addition, the effect of nanoparticle presence in the medium was evaluated by analyzing centrifuged and not centrifuged samples. The results showed that T-MSN exhibited the highest antioxidant capacity ($77.41 \pm 7.88\%$ inhibition) compared with free quercetin ($54.90 \pm 3.27\%$), whereas A-MSN maintained the antioxidant activity of the compound ($68.93 \pm 7.27\%$) and non-functionalized MSNs showed lower antioxidant capacity ($27.71 \pm 0.59\%$). Furthermore, non-centrifuged samples displayed greater antioxidant activity, indicating that the mechanism depends not only on the released quercetin but also on the fraction adsorbed onto the nanoparticle surface and/or the direct interaction of the material with ABTS radicals. These findings demonstrate that functionalized MSN are an efficient carrier for quercetin, supporting their potential

application in the development of functional foods and nutraceuticals.

Palabras clave: Quercetina; nanopartículas de sílice mesoporosa; capacidad antioxidante; funcionalización superficial.

Keywords: Quercetin; mesoporous silica nanoparticles; antioxidant capacity; surface functionalization .

1. Introducción

El estrés oxidativo es un proceso fisiopatológico caracterizado por un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y los mecanismos antioxidantes del organismo. La acumulación excesiva de ROS provoca daño en biomoléculas contribuyendo al desarrollo y progresión de diversas enfermedades, entre ellas cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes y trastornos neurodegenerativos (Powers & Jackson, 2008).

Entre los antioxidantes naturales, los flavonoides han despertado gran interés debido a su capacidad para neutralizar radicales libres mediante la donación de electrones o átomos de hidrógeno. La quercetina es un flavonoide de la subclase de los flavonoles y constituye uno de los compuestos fenólicos más abundantes en la dieta humana (Wang et al., 2022). Esta es una molécula bioactiva ampliamente estudiada debido a sus múltiples efectos farmacológicos, entre los que destacan su actividad antioxidante, antiviral, inmunomodulador y anticancerígena (Aghababaei & Hadidi, 2023). De manera natural, este flavonol se encuentra distribuido en una amplia variedad de alimentos de origen vegetal, como cebollas, espárragos, té verde, pimiento verde y diversas frutas y verduras (Wang et al., 2022).

Estructuralmente la quercetina se define como (2-(3,4-hidroxifenil)-3,5,7-trihidroxi-4H-cromen-4-ona) y consiste en 3 anillos aromáticos y 5 grupos hidroxilo (Figura 1), donde estos últimos le confieren su actividad antioxidante debido a que es un potente eliminador ROS protegiendo así a las células del estrés oxidativo, además que aumenta la expresión de

sustancias antioxidantes como la superóxido dismutasa, catalasa y los niveles de glutatión (Aghababaei & Hadidi, 2023; Powers & Jackson, 2008).



Figura 1. Estructura química de la quercetina y mecanismos asociados a su capacidad antioxidante.

A pesar de los numerosos beneficios para la salud asociados con la quercetina, este compuesto presenta limitaciones relacionadas con su estabilidad, ya que es sensible a las variaciones de pH, la exposición a la luz y la temperatura. Además, es un compuesto hidrofóbico, por lo que tiende a formar aglomeraciones en los fluidos gástricos, lo que limita su solubilidad y biodisponibilidad (Liu et al., 2025). Debido a esto se han desarrollado algunas alternativas de encapsulación para aumentar esa biodisponibilidad de la quercetina, una de ellas es la encapsulación mediante nanopartículas de sílice mesoporosa (NSM).

Las NSM son un tipo de nanopartícula inorgánica con una excelente biocompatibilidad, buena flexibilidad en cuanto a la manipulación de su estructura y propiedades teniendo un tamaño de poro de alrededor de 2 a 50 nm, así mismo posee una alta superficie específica y una fácil funcionalización (Chen et al., 2024; Xu et al., 2023). Esta funcionalización se lleva a cabo debido a la gran cantidad de grupos silanol (Si-OH) que poseen en su superficie los cuales favorecen la modificación covalente por ligandos orgánicos, polímeros, biomoléculas, péptidos, anticuerpos o algún ligando de direccionamiento (Almatroudi, 2025; Patel et al., 2026). La funcionalización de las NSM además de permitir una mayor bioseguridad o larga circulación estas pueden ser utilizadas para diseñar sistemas de transporte de fármacos inteligentes (Xu et al., 2023).

2. Objetivo

Evaluar el efecto de la carga de Quercetina en Nanopartículas de sílice mesoporosa (NSM) funcionalizadas con grupos amino (A-NSM), carboxilo (C-NSM) y tiol (T-NSM) sobre su capacidad antioxidante a través del tiempo.

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales

El bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB), NaOH, ortosilicato de tetraetilo (TEOS), aminopropiltrimetoxisilano (APTES), mercaptopropiltrimetoxisilano (MPTMS), anhídrido succínico (SA), el cloroformo, el etanol (>99%), la quercetina y el ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) se obtuvieron de Merck (Naucalpan, Estado de México, México).

3.2. Síntesis de las nanopartículas y funcionalización

Para sintetizar las NSM de tipo MCM-41 se siguió la metodología de Kresge et al. (1992). Se obtuvo una solución de CTAB (1 g) (Xu et al., 2023), como agente generador de poros, en agua destilada (480 mL) mediante la ayuda de un baño ultrasónico. Posteriormente, la solución se transfirió a un matraz bola de tres bocas y se le añadió 3.5 mL de NaOH 1N. A la boca central del matraz se acopló un condensador conectado a un recirculador con refrigeración (4 °C) y a las bocas laterales un termómetro y una bureta. Una vez la temperatura de la solución alcanzó los 80°C, se añadieron gota a gota 5 mL de TEOS, como fuente de sílice, y se mantuvo el calentamiento por 2 horas. En seguida, se recuperó el sólido mediante filtración y se lavó dos veces con agua destilada y dos veces con etanol. Finalmente, el surfactante se eliminó por calcinación a 500 °C durante 5 h.

Para la funcionalización con grupos amino (A-NSM), carboxilo (C-NSM) y tiol (T-NSM) se siguió la metodología de Zaharudin et al. (2020). Para las A-NSM se tomó 0.1 mL de APTES y se disolvió en 20 mL de etanol para funcionalizar 100 mg de NSM dejando en incubación a temperatura ambiente bajo agitación durante 24 h, transcurrido el tiempo se recuperaron las A-NSM y se lavaron dos veces con etanol. El procedimiento para las T-NSM fue el mismo que para las A-NSM cambiando APTES por

MPTMS. Mientras que para las C-NSM se colocó 100 mg de A-NSM en 50 mL de anhídrido succínico al 2% en cloroformo y se dejó bajo agitación durante 24h a temperatura ambiente posteriormente se recuperaron las C-NSM y se lavaron con cloroformo, agua destilada y etanol.

3.3. Carga de las NSM con quercetina

Para la carga de las nanopartículas con quercetina se suspendieron 100 mg del material en 50 mL de una solución saturada de quercetina en etanol (2 mg/mL). La suspensión se mantuvo en agitación a temperatura ambiente hasta la volatilización total del disolvente. La quercetina residual no cargada en las nanopartículas se eliminó mediante un lavado con etanol. Para ello las partículas se suspendieron en 50 mL de etanol, se agitaron en vortex por 1 min y se centrifugaron a 6000 rpm por 15 min. Las partículas lavadas se secaron a temperatura ambiente.

3.4. Estandarización de la concentración de quercetina para el ensayo ABTS.

Para la determinación de la capacidad antioxidante (CA) se realizó un ensayo de inhibición de radicales ABTS. Se probaron diferentes concentraciones de quercetina (0.5, 1, 2 y 4 µg/mL) para determinar aquella que ofreciera una inhibición parcial de los radicales.

3.5. Cálculo de la masa de nanopartículas equivalente a la concentración de quercetina seleccionada

Una vez seleccionada la concentración de trabajo, se calcularon tratamientos con concentraciones equivalentes de quercetina cargada en los diferentes materiales. Para ello se utilizaron los datos reportados por Matadamas-Ortiz et al. (2026) (Tabla 1) que corresponden a la capacidad de carga de los diferentes tratamientos.

Tabla 1. Capacidad de carga con quercetina (g Quercetina/ g partículas)

	Loading Capacity (%)
MSN	2.79 ^b ± 0.20
A-MSN	5.26 ^a ± 0.06
C-MSN	1.85 ^c ± 0.23
T-MSN	1.26 ^c ± 0.34

3.6 Efecto de la funcionalización de nanopartículas de sílice mesoporosa sobre la cinética de capacidad antioxidante en medio acuoso de la quercetina mediante el método ABTS.

La capacidad antioxidante de la quercetina libre (Q) y de la cargada en los diferentes vehículos (NSM, A-NSM, C-NSM y T-NSM) se evaluó durante un ensayo de liberación en PBS (pH 7.4) a 37 °C por 120 min.

Durante este periodo, cada 30 min se tomaron dos alícuotas de cada tratamiento. Una de ellas se centrifugó a $10,000 \times g$ durante 5 min para determinar la capacidad antioxidante atribuible únicamente a la quercetina liberada en el medio. La segunda se analizó sin centrifugar con el fin de evaluar si la presencia de las nanopartículas influía en la capacidad antioxidante. Cada muestra se analizó mediante el ensayo ABTS siguiendo la misma metodología que la estandarización de la quercetina.

En cada tiempo de muestreo se determinó el porcentaje de inhibición del radical ABTS mediante la ecuación 1:

$$\% \text{ inhibición} = \frac{A_{\text{Control}} - A_{\text{Muestra}}}{A_{\text{Control}}} \times 100 \quad (1)$$

Donde A_{Control} corresponde a la absorbancia del radical ABTS en ausencia de muestra y A_{Muestra} a la absorbancia del radical ABTS en presencia de la muestra.

Asimismo, se evaluaron las nanopartículas sin carga de quercetina siguiendo el mismo procedimiento experimental, con el objetivo de determinar si las nanopartículas funcionalizadas y sin funcionalizar presentaban actividad antioxidante intrínseca.

4. Resultados y discusión

4.1 Curva de calibración del efecto antioxidante de la quercetina libre

El porcentaje de inhibición de los radicales ABTS producido por diferentes concentraciones de quercetina libre se presenta en la Figura 2.

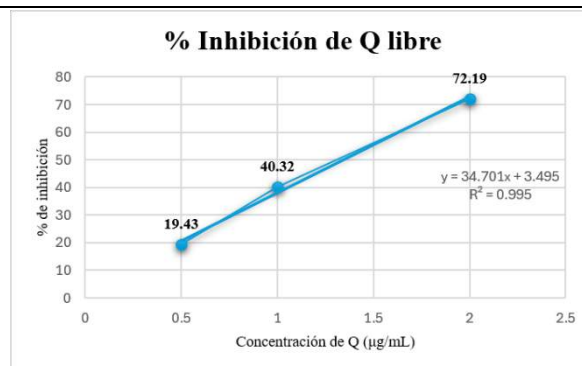


Figura 2. Efecto de la concentración de quercetina libre sobre el porcentaje de inhibición del radical ABTS.

La concentración de 4 µg/mL mostró una inhibición ≥ 100 %. Al alcanzarse una inhibición total del radical, no es posible establecer si dicha concentración corresponde a la mínima necesaria para lograr este efecto, por lo que no se tomó en cuenta para la curva de calibración. Como puede observarse, la concentración de 1 µg/mL produjo una inhibición parcial de aproximadamente 40 %, por lo que se eligió para ensayos posteriores. Esta concentración permite determinar incrementos o decrementos en la CA debido a la carga del compuesto en los vehículos mesoporosos.

4.2. Evaluación de la capacidad antioxidante intrínseca de las NSM

Entre los tratamientos evaluados, solo las T-NSM mostraron capacidad antioxidante intrínseca, alcanzando porcentajes de inhibición del radical ABTS de entre el 20 y el 25 %. Este comportamiento podría atribuirse a que los grupos tiol (-SH) son capaces de donar átomos de hidrógeno o electrones para neutralizar especies radicalarias a través de mecanismos de transferencia de átomos de hidrógeno (HAT) o transferencia de electrones (ET) (Jeon et al., 2026). Es probable que estas reacciones de neutralización de radicales generadas por los grupos tiol, influyeran en la capacidad de captación de radicales ABTS mostrando así una mayor CA en comparación con los demás tratamientos.

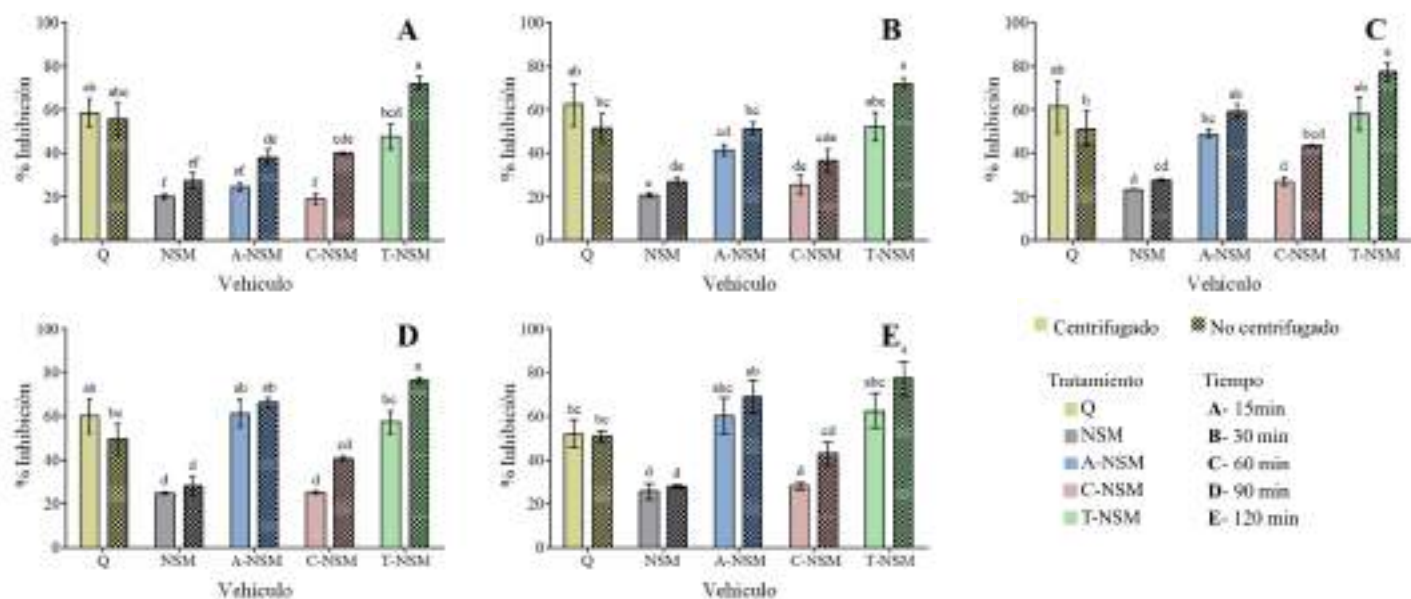


Figura 3. Inhibición de radicales ABTS por quercetina libre (Q) o cargada en NSM, A-NSM, C-NSM o T-NSM tras 15 min (A), 30 min (B), 60 min (C), 90 min (D) y 120 min (E) de exposición a medio acuoso pH 7.4. Las columnas muestran medias $\pm$ D.E ($n=2$). Columnas no conectadas por la misma letra son significativamente diferentes ($p<0.05$).

4.3. Cinética de capacidad antioxidante de la quercetina en medio acuoso

En la Figura 3 se muestra la evolución del porcentaje de inhibición del radical ABTS de los diferentes tratamientos durante el ensayo de liberación en PBS. La quercetina mantuvo su capacidad antioxidante durante las 2 h de exposición. La disminución de la CA de las NSM sin funcionalizar tras la carga de quercetina podría estar relacionada con la interacción entre los grupos hidroxilo de la quercetina con los grupos silanol (Si-OH) presentes en la superficie del material. Esta interacción ha sido evidenciada por Berlier et al. (2013) mediante espectroscopía infrarroja, quienes observaron cambios en las bandas asociadas con los grupos Si-OH tras la incorporación de la quercetina, atribuidos a la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo específicamente los grupos fenilo de la quercetina que se unen a los grupos silanol de la superficie. Esta interacción puede contribuir a una disminución de la disponibilidad de los grupos hidroxilo de la quercetina para que interactúen con los radicales libres observándose así una menor CA. Por su parte, tras 30 min de exposición (Figura 3B), las A-NSM cargadas con quercetina mostraron una CA

equiparable a la de la Q, mostrando una tendencia a aumentar a través del tiempo, lo cual sugiere la liberación del compuesto en el medio. Esta liberación ocurre mediante la desorción de la quercetina de la superficie de las A-NSM y su posterior difusión hacia el medio, proceso en el que las interacciones con los grupos amino de la superficie, principalmente electrostáticas y mediante puentes de hidrógeno, determinan su retención (Carucci et al., 2022). Asimismo, el pH puede modificar el estado de protonación de la quercetina y de los grupos amino de la superficie, alterando su afinidad entre sí y con el medio, y, por tanto, la velocidad de liberación (Saputra et al., 2022). En condiciones donde disminuye la interacción quercetina-superficie, se favorece su desorción y disponibilidad en el medio, lo que podría explicar el incremento de la CA observado con el tiempo. En cuanto a las C-NSM, tras 15 min (Figura 3A), el tratamiento mostró mayor capacidad antioxidante cuando las partículas permanecieron en el medio. Además, durante todo el periodo de evaluación, las muestras no centrifugadas presentaron una capacidad antioxidante comparable a la de la quercetina libre. Considerando que las C-NSM vacías no exhibieron CA, los resultados indican que la CA del sistema depende tanto de la quercetina liberada

como de aquella cargada en el material. Para las T-NSM, estas mostraron tener una CA similar a la de la quercetina hasta un tiempo de 90 min, sin embargo, como se observa en la Figura 3E, este tratamiento con la presencia de las nanopartículas presenta una capacidad antioxidante mayor a la de la quercetina libre ($p < 0.05$), lo cual indica una clara contribución del material a la CA de la quercetina que se libera gradualmente.

Conclusión

Las nanopartículas de sílice mesoporosa funcionalizadas conservaron la capacidad antioxidante de la quercetina durante el ensayo de liberación en PBS. Asimismo, la funcionalización superficial influyó en el desempeño antioxidante de los vehículos, observándose que las C-NSM y, particularmente, las T-NSM potenciaron la capacidad antioxidante, lo que sugiere que este efecto no depende únicamente de la liberación de la quercetina, sino también de la interacción de las nanopartículas con los radicales. En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de las NSM funcionalizadas como sistemas de liberación para preservar la actividad antioxidante de la quercetina y favorecen su aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos.

Agradecimientos

Agradecimientos al Laboratorio de Biotecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Referencias

Aghababaei, F., & Hadidi, M. (2023). Recent Advances in Potential Health Benefits of Quercetin. *Pharmaceutics*, 16(7), 1020. <https://doi.org/10.3390/ph16071020>

Almatroudi, A. (2025). Advances in Mesoporous Silica and Hybrid Nanoparticles for Drug Delivery: Synthesis, Functionalization, and Biomedical Applications. *Pharmaceutics*, 17(12), 1602. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17121602>

Berlier, G., Gastaldi, L., Ugazio, E., Miletto, I., Iliade, P., & Sapino, S. (2013). Stabilization of quercetin flavonoid in MCM-41 mesoporous silica: Positive effect of surface functionalization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 393, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.10.073>

Carucci, C., Sechi, G., Piludu, M., Monduzzi, M., & Salis, A. (2022). A drug delivery system based on poly-L-lysine grafted mesoporous silica nanoparticles for quercetin release.

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 648, 129343. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129343>

Chen, J., Xu, Z., Zhang, M., Ju, Z., Niu, Z., Ma, Y., Xu, Z., Zhang, T., & Shi, F. (2024). Mesoporous silica nanoparticles: A Synthesis Guide and Research Progress in the Biomedical Field. *Materials Today Chemistry*, 42, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102426>

Jeon, S., Kim, K., Oh, E., Jin, H., & Jung, S. (2026). Thiol-Functionalized Succinoglycan via Cysteine Grafting: Enhanced Rheological Properties and Antioxidant Activity. *Polymers*, 18(7), 849. <https://doi.org/10.3390/polym18070849>

Kresge, C. T., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., Vartuli, J. C., & Beck, J. S. (1992). Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, 359(6397), 710-712. <https://doi.org/10.1038/359710a0>

Liu, L., Barber, E., Kellow, N. J., & Williamson, G. (2025). Improving quercetin bioavailability: A systematic review and meta-analysis of human intervention studies. *Food Chemistry*, 477, 143630. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143630>

Matadamas-Ortiz, A., Di Pierro, P., Sorrentino, A., Caputo, I., Paoella, G., Montefusco, A., & Regalado-González, C. (2026). The Protective Effect of Quercetin on Hydrogen Peroxide-Induced Oxidative Damage in Caco-2 Cells Is Enhanced by Its Loading in Mesoporous Silica Nanoparticles. *Pharmaceutics*, 18(3), 316. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics18030316>

Patel, S., Mansuri, M., Mehta, I., & Athalye, M. (2026). Brain-targeted Brivaracetam delivery using mannose-functionalized mesoporous silica nanoparticles for the treatment of epilepsy. *Brain Research*, 1880, 150252. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2026.150252>

Powers, S. K., & Jackson, M. J. (2008). Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiological Reviews*, 88(4), 1243-1276. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>

Saputra, O. A., Lestari, W. A., Kurniansyah, V., Lestari, W. W., Sugiura, T., Mukti, R. R., Martien, R., & Wibowo, F. R. (2022). Organically surface engineered mesoporous silica nanoparticles control the release of quercetin by pH stimuli. *Scientific Reports*, 12(1), 20661. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25095-4>

Wang, G., Wang, Y., Yao, L., Gu, W., Zhao, S., Shen, Z., Lin, Z., Liu, W., & Yan, T. (2022). Pharmacological Activity of Quercetin: An Updated Review. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022(1), 3997190. <https://doi.org/10.1155/2022/3997190>

Xu, B., Li, S., Shi, R., & Liu, H. (2023). Multifunctional mesoporous silica nanoparticles for biomedical applications. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8(1), 435. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01654-7>

Zaharudin, N. S., Mohamed Isa, E. D., Ahmad, H., Abdul Rahman, M. B., & Jumbri, K. (2020). Functionalized mesoporous silica nanoparticles templated by pyridinium ionic liquid for hydrophilic and hydrophobic drug release application. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24(3), 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.01.003>



VERANO DE LA CIENCIA
★ 2026 ★

Criogel Basado en Chícharo y Extracción de Derivados de Café Usado

Reyes Bravo, Ricardo; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia*

*Laboratorio de Micro y Nanoencapsulación, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

En este estudio se realizó un tratamiento al café usado por medio de ultrasonido para generar el efecto de cavitación que permitió la separación de los metabolitos secundarios del residuo, adicionalmente se desarrollaron criogeles basados en proteína de chícharo e impresiones 3D de chocolate y puré de papa. Se determinó que la capacidad antioxidante del extracto del café usado es aceptable para desarrollo cosmetológico y que los criogeles de proteína de chícharo: goma Xantana y GDL son livianos.

Palabras clave: Café usado; Capacidad Antioxidante; Criogeles

Summary

In this study, spent coffee grounds went under treatment using ultrasound-assisted extraction taking advantage of cavitation effect to extract secondary metabolites, additionally pea protein based cryogeles were developed and 3D printing using potato and chocolate ink was overview. It was determined that extract from spent coffee exhibited antioxidant capacity and is acceptable for cosmetological uses as 1:3 GDL:Xantana Gum returns a decent enough yield.

Keywords: Spent Coffee, Antioxidant Capacity, Cryogels

Introducción

El café es una bebida ampliamente consumida en el mundo, con una producción de 168.2 millones de bolsas en el 2023 (ICO, 2023). Su preparación tradicional es mediante la percolación de agua caliente a través de los granos molidos, dichos granos quedan como residuos en el papel filtro donde fueron depositados. Estos residuos son conocidos como pocillos de café usados (SCG), que representan un porcentaje importante de desechos a nivel mundial. Sin embargo, estos pocillos contienen una fuente importante de compuestos bioactivos útiles con aplicaciones en los sectores: agrónomo, por su valor como materia orgánica; bioenergético, al poder transformar el café en biodiésel de segunda generación por transesterificación; alimenticio, como saborizantes; y cosmetológico, por sus propiedades antioxidantes (Zhao et al., 2024).

Los residuos de café requieren ser tratados por diferentes procesos para poder aprovechar cada uno de estos compuestos, en este estudio se realizó un acercamiento a la extracción de compuestos fenólicos asistida por sonotrodo.

Objetivo

Extraer compuestos bioactivos derivados de pocillos de café usado y desarrollar un criogel basado en proteína de chícharo.

Metodología

Proceso Experimental.

I. Capacitación

Se realizó una capacitación básica instrumental, teórica y práctica en el aislamiento de proteína; para ello se utilizó amaranto. El procedimiento inició con el tamizado de harina de amaranto en malla 100, una vez tamizado el amaranto, se adicionó a un matraz Erlenmeyer de 1L y se agregó el suficiente hexano y un agitador magnético. Se tapó el matraz con aluminio y se agitó por 24 horas. Después se recuperó el hexano por rotaevaporación y el amaranto desgrasado se volvió a tamizar, esta vez con malla 60; del resultante obtenido, se colocaron 100 g de harina desgrasada tamizada y 1L de agua desionizada en un vaso de precipitado de 2L. Con ayuda de un potenciómetro, se ajustó el pH a 10.00

± 0.05 utilizando NaOH 1M y 0.1M, una vez verificado que el pH se mantuviera constante dentro de este rango, se llevó a centrifugar con los siguientes parámetros: 9000g a 4 °C durante 20 minutos, este proceso se realizó las veces necesarias hasta agotar la mezcla de harina y agua desionizada. Tras centrifugar, se recuperó el sobrenadante y el sólido se almacenó para futuros estudios –pues contiene alta cantidad de carbohidratos–. El sobrenadante se llevó a un vaso de precipitado y se realizó ajuste de pH a 4.00 ± 0.05 utilizando HCl 1M y 0.1M; hecho el ajuste, se llevó a centrifugar bajo los siguientes parámetros: 9000g a 25 °C durante 20 minutos, este proceso se realizó hasta agotar el líquido. Del resultado, el sobrenadante se almacenó para futuros estudios y el sólido fue recuperado. Una vez concluida la capacitación, se continuó con la obtención de derivados de SCGs y desarrollo de criogel basado en proteína de chícharo.

II. Desgrasado del Café Usado

Se prepararon dos equipos soxhlet, dos cápsulas de papel filtro genérico y el residuo; la extracción se realizó por 24 horas con hexano; el cual fue recuperado por rotaevaporación.

III. Extracción de Compuestos Polifenólicos

Se adicionó 1 g de café usado desgrasado a un vaso de precipitados y se preparó una solución de agua desionizada:etanol absoluto 1:1, de tal solución se adicionaron 50 mL al vaso de precipitado. Esta mezcla fue llevada a un sonotrodo con los siguientes parámetros: 30% amplitud durante 5 minutos a baño de hielo, una vez pasado por el sonotrodo, se agitó a temperatura ambiente por 30 minutos y se centrifugó a 4000g por 10 minutos. El sobrenadante fue recuperado y transferido a un matraz, la fase sólida se recuperó y secó en un deshidratador de alimentos por aire forzado (marca excalibur) a 40 °C por 12 horas. Este procedimiento se realizó por triplicado; una vez recuperados los sobrenadantes, se juntaron y se filtraron con filtros de nitrato de celulosa 0.45 μm para su posterior almacenamiento a 4 °C.

IV. Determinación de Fenoles Totales

Se realizó la determinación de fenoles totales utilizando reactivo de Folin Ciocalteu. Primero se diluyó el reactivo comercial de Folin Ciocalteu 2N a 1N, después se preparó Carbonato de Sodio al

7.5% en agua grado HPLC y por último se preparó *in situ* una solución estándar de ácido gálico 0.1 mg/mL.

Se rotularon 9 viales ámbar; a cada vial se adicionó primero la solución estándar de ácido gálico, después el agua y por último el reactivo de Folin, siguiendo las cantidades indicadas en **Tabla 1**. Las mezclas se agitaron por 5 minutos en un sonicador para posteriormente adicionar la solución de carbonato de sodio al 7.5%.

Preparados los viales, se almacenaron en oscuridad total durante 2 horas. Se realizó la curva de calibración y análisis de muestra en la placa ELISA con 250 μL en cada pocillo utilizando la configuración que indica la **Figura 1**.

Tabla 1. Guía para curva de calibración para Reactivo de Folin

No. Tubo	Solución de Ácido Gálico (μL)	Agua (μL)	Reactivo de Folin (μL)	Solución de Carbonato de Sodio (μL)
Blanco	0	250	125	625
1	10	240	125	625
2	20	230	125	625
3	30	220	125	625
4	40	210	125	625
5	50	200	125	625
6	60	190	125	625
7	70	180	125	625
8	80	170	125	625

Figura 1. Configuración de Pocillos Placa ELISA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bo	Bo	Bo	8	8	8						
B	1	1	1	8	M	M						
C	2	2	2	8	C	C						

D	3	3	3	M								
E	4	4	4	M								
F	5	5	5	M								
G	6	6	6	C								
H	7	7	7									

Nota: Bo, blanco; 1-8, curva de calibración (ver **Tabla 1**); M, muestra; y C, control.

Se hizo lectura de la placa en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 760 nm.

V. Capacidad Antioxidante

Como se mencionó anteriormente, uno de los intereses por los residuos de café, es su aplicación cosmetológica considerando su capacidad antioxidante. En este estudio se hizo el análisis mediante la técnica por DPPH.

Bajo oscuridad, se pesaron 2.5 mg de Trolox y disolvieron en 10 mL de metanol absoluto, esta es una solución stock 1 mM. Se prepararon soluciones de Trolox Estándar siguiendo la **Tabla 2**.

Tabla 2. Soluciones Estándar de Trolox

Concentración de Solución Estándar de Trolox (μM)	Solución Stock (μL)	Metanol (μL)
50	50	950
100	100	900
200	200	800
300	300	700
400	400	600
500	500	500
600	600	400
700	700	300
800	800	200

Se preparó in situ la solución de DPPH, 1.5 mg de DPPH se disolvieron en 20.5 mL de metanol y 4.5 mL de agua. La solución se sónico durante 5 minutos para después ser almacenada en refrigeración.

Una vez elaboradas las soluciones, se colocan en la placa ELISA con la configuración de la **Figura 2**.

Figura 2. Configuración Placa Elisa para DPPH

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bo	Bo	Bo									
B	C	C	C									
C	0.5	0.5	0.5	6	6	6						
D	1	1	1	7	7	7						
E	2	2	2	8	8	8						
F	3	3	3	M ₁	M ₁	M ₁						
G	4	4	4	M ₂	M ₂	M ₂						
H	5	5	5	M ₃	M ₃	M ₃						

Nota: Bo, blanco; C, control; 0.5-8, curva de calibración (ver **Tabla 2**); M, muestra (número de muestra indicada por el subíndice).

La placa se leyó en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 520 nm.

VI. Aislamiento de Proteína de Café

El sólido restante después de la extracción con el sonotrodo se dispersó en agua ajustando el pH a 10.00 ± 0.05 y se centrifugó a 9000g a 4 °C durante 20 minutos, se recuperó la fase sólida y se almacenó para futuros estudios, el sobrenadante fue recuperado y se realizó otro ajuste de pH a 4.00 ± 0.05 para centrifugar a 8759g a 25 °C durante 20 minutos, se almaceno el sobrenadante y el sólido fue recuperado, por último el sólido fue liofilizado para obtener proteína de café.

VII. Impresión 3D

Se realizaron ensayos de impresión usando una impresora por extrusión y tintas alimentarias preparadas con puré de papa y agua 0.75:1 a 30 °C y chocolate a 42 °C. Siguiendo el siguiente procedimiento: primero, cargar preparar la biotinta; segundo, cargar la biotinta en una jeringa, asegurándose que no existan espacios de aire y colocar el émbolo; tercero, insertar la jeringa en la impresora 3D, calibrar el émbolo y el extrusor; y por último, seleccionar figura a imprimir, ajustar parámetros (alta, media o baja calidad de impresión y velocidad).

VIII. Preparación de Hidrogeles

Se mezclaron Goma Xantana y proteína de chícharo en un recipiente plástico en una proporción 1:3, se mezclaron hasta homogeneizar, se ajustó el pH a 10.00 ± 0.05 utilizando NaOH, se dejó reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente se adicionaron 500 μL de Glucono Delta-Lactona (GDL), 100 μL en 3 puntos de inyección, se homogeneizó la mezcla hasta que no quedarán partes traslúcidas y se viera uniformemente distribuida, se mantuvieron en refrigeración por 18 h.

IX. Transformación de Hidrogeles en Criogeles

Los hidrogeles fueron congelados para posteriormente ser liofilizados y depositados en un desecador.

RESULTADOS

Se obtuvieron 32.39 g de café desgrasado, tras adicionar aproximadamente 1 g de este café al sonotrodo, se recuperaron ≈ 6.50 mL de compuestos fenólicos por cada 50 mL de solución, esto representa un 13% v/v cuando es comparado con la solución inicial y se obtuvieron las siguientes curvas de calibración.

Tabla 3. Café Sonotrodo

Vaso Precipitados (g)	Muestra (g)
44.3035	1.0088
45.7074	1.0011
46.4465	1.0043

Figura 3. DPPH: curva de calibración 30



Figura 4. DPPH: curva de calibración 60

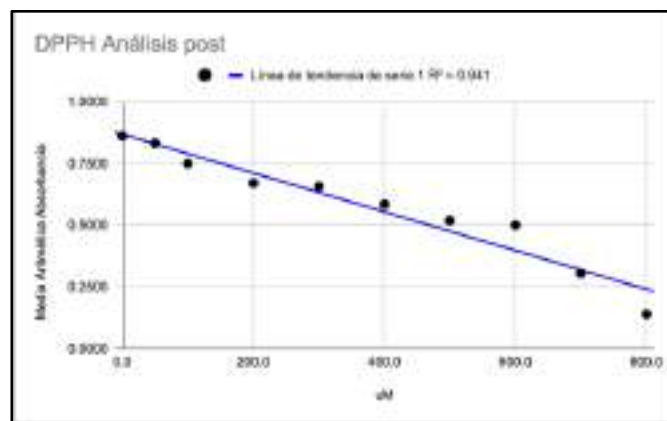
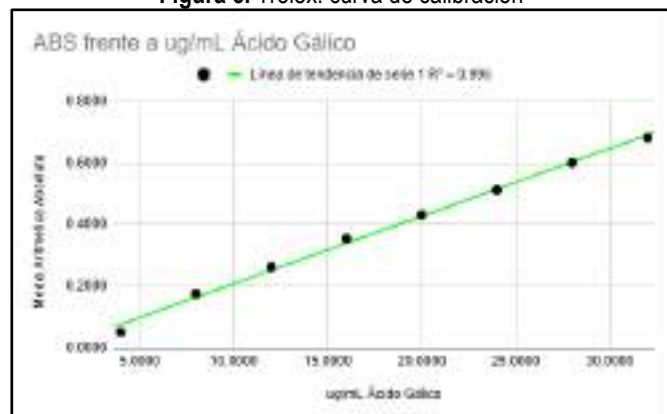


Figura 5. Trolox: curva de calibración



Se determinaron los mg de ácido gálico por gramo de muestra.

Tabla 4. Ácido Gálico/Muestra

Muestra	Ácido Gálico (mg/g de muestra)
A	20.73
B	30.21
C	28.79

En cuanto a la impresión 3D, se realizaron las siguientes figuras: Letra D, cucaracha, cara de personaje animado, cubito.

En cuanto a los criogeles se obtuvieron los siguientes pesos:

Tabla 5. Peso de Criogeles

Nombre	Peso (mg)
Dany	301.5
Manu	268.5

Xime	296.2
Rick	293.0
Chem	281.8

Beaudor, M., Vauchel, P., Pradal, D., Aljawish, A., & Phalip, V. (2023). Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method. *Chemical Engineering And Processing - Process Intensification*, 188, 109358.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109358>

DISCUSIONES

La extracción y análisis de derivados de los residuos de café demostraron que contiene compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, que es de interés para este estudio.

La prueba de DPPH se midió en dos momentos, inmediatamente después de cargar la placa y 60 minutos después. Sin embargo, durante la fase experimental a razón de errores en la medición, no se pudo obtener una R^2 que asegure la regresión lineal, por lo tanto, no se pudo determinar la capacidad antioxidante por técnica DPPH. Esto no indica que no exista capacidad antioxidante, existe, pero en este estudio no es posible dar veracidad de su medición. Las cantidades de ácido gálico entran dentro del rango cuando se compara con los resultados de Beaudor et al. (2023).

En cuanto a la impresión 3D, la biotinta ideal resultó ser el chocolate a 42 °C pues el puré de papa solía ser muy poco consistente.

CONCLUSIONES

Los residuos de café contienen compuestos bioactivos útiles que pueden ser aprovechados para diversos sectores, a pesar de las limitaciones en el proceso experimental, se pudo demostrar que existe capacidad antioxidante. Además, se observó que la proporción de 1:3 Proteína:Goma Xantana es óptima para producir hidrogeles pues tras la inyección de GDL y el proceso de liofilizado se obtuvo un peso constante en los criogeles.

AGRADECIMIENTO

Laboratorio de Nano y Micro Encapsulación

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

International Coffee Organization (ICO). (2023). Coffee Report and Outlook - December 2023. Recuperado de https://icocoffee.org/documents/cy2023-24/Coffee_Report_and_Outlook_December_2023_ICO.pdf

Marina, M. L., et al. (2020). Isolation of proteins from spent coffee grounds. Polyphenol removal and peptide identification in the protein hydrolysates by RP-HPLC-ESI-Q-TOF. *Food Research International*, 137, 109368.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109368>

Identificación in silico del inhibidor A de elastasa de *Rhipicephalus sanguineus*

Bertha Isabel Carvajal Gámez¹, Ana Karen Hernández Juárez¹, Kathia Lorena Rubio Cruz^{1*}

¹Licenciatura en Microbiología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Autor de correspondencia: Kathia Lorena Rubio Cruz.
Correo electrónico: krubio16@alumnos.uaq.mx

Correos electrónicos de los autores: bicarvajal@uaq.mx ; anakaren.hernandez@alumnos.uaq.mx ; krubio16@alumnos.uaq.mx

Resumen

Rhipicephalus sanguineus es una garrapata de gran importancia médica y veterinaria debido a que es un vector de diversos patógenos; Durante su alimentación, moléculas salivales del parásito como los inhibidores de proteasas tiene un rol clave en la evasión del sistema inmune del hospedador, sin embargo la información que hay acerca de estas moléculas (serpinas) es limitada. En este trabajo se abordó la identificación in silico, el análisis bioinformático, el diseño de oligonucleótidos específicos y la extracción del material genético del gen que codifica el inhibidor A de la elastasa leucocitaria en *R. sanguineus*, con la finalidad de ampliar y aportar más conocimiento sobre esta molécula,

Palabras clave: *Rhipicephalus sanguineus*; garrapata café del perro; perros; prevención; *Rickettsia conorii*; fiebre maculosa de las Montañas Rocosas; fiebre botonosa mediterránea; parásitos caninos.

Keywords: *Rhipicephalus sanguineus*; brown dog tick; dogs; prevention; *Rickettsia conorii*; Rocky Mountain spotted fever; Mediterranean spotted fever; canine parasites.

a) Introducción

Rhipicephalus sanguineus, también conocida como la garrapata café del perro, es un ectoparásito de tres huéspedes que se encuentra distribuido de manera global y afecta principalmente a los caninos y si hay una exposición, a los seres humanos ocasionalmente (Dantas-Torres, 2008; Dantas-Torres, 2010). Es de importancia médica y veterinaria por presentar un daño directo en la piel de los hospederos pero más importante el papel que desempeña como un vector biológico de microorganismos patógenos de relevancia en salud pública, como lo pueden ser *Babesia canis*, *Ehrlichia canis* y diversas especies del género *Rickettsia* (*Rickettsia rickettsii* y *Rickettsia conorii*), los cuales tienen impacto en la salud de las personas al causar enfermedades graves como la fiebre maculosa y la fiebre botonosa mediterránea (Dantas-Torres, 2008; Rodríguez-Vivas et al., 2023). En México han sido reportados casos de este parásito en al menos 24 estados del país, lo cual representa un problema en regiones urbanas y rurales (Caro Cruz, 2021; Rodríguez-Vivas et al., 2023).

Al momento de alimentarse, la saliva de la garrapata desempeña un papel muy importante debido a que contiene una mezcla compleja de moléculas entre las cuales suelen estar inmunomoduladores, anticoagulantes e inhibidores de proteasas, moléculas que le confieren el poder de neutralizar las respuestas de defensa del hospedador (Hernández Juárez, 2022). Una de las moléculas destacadas son las serpinas e inhibidores de proteasas de la respuesta inmune local, las cuales al caracterizar su proteómica ha permitido explorar los interactomas complejos que tienen entre los antígenos del vector y los patógenos que son transmitidos [5]. En particular los inhibidores de proteasas como el inhibidor A de la elastasa

leucocitaria son fundamentales para ayudar a mitigar la degradación tisular y de la respuesta inflamatoria que es mediada por neutrófilos en el sitio de fijación (Hernández Juárez, 2022).

b) Objetivos

General

Generar información sobre el inhibidor A de la elastasa leucocitaria de *Rhipicephalus sanguineus*, mediante su identificación, análisis bioinformático y clonación, con la intención de ampliar el conocimiento acerca de esta proteína y contribuir al estudio de un organismo de importancia en la salud pública y de medicina veterinaria.

Específicos

Identificar la secuencia del gen que codifica el inhibidor A de la elastasa leucocitaria en *Rhipicephalus sanguineus*.

Realizar el análisis bioinformático de la secuencia para poder identificar las características moleculares y hacer una comparación con la literatura encontrada de otras especies.

Ampliar el gen mediante PCR y verificar su integridad

Clonar el gen en un vector de expresión

Generar información para que contribuya al conocimiento de esta proteína debido a que la información que hay es limitada en esta especie

c) Metodología

Primero se llevo a cabo una introducción acerca de los cuidados, desecho y buenas practicas de laboratorio, desecho de RPBI, RP y manejo de algunos equipos.

Identificación de la secuencia de interés

Para llevar a cabo la identificación de la secuencia de interés, se buscó el código de acceso XP_037499620.1 en la base de datos GenBank del

NCBI, el cual corresponde a la proteína Inhibidor A de la elastasa leucocitaria de *Rhipicephalus sanguineus*. A partir de este registro, se identificó la anotación del mRNA (XM_037643692.2) y se revisó la sección CDS para determinar la secuencia de nucleótidos, las regiones codificantes, el número de aminoácidos y los límites del gen con las regiones 5' UTR y 3' UTR. Asimismo, se consultó la información genómica del locus (Gene ID: 119373638) para analizar los genes y regiones flanqueantes.

Obtención y análisis de la secuencia

Se recuperó la secuencia de nucleótidos en formato FASTA desde GenBank. Posteriormente, la secuencia se procesó en la herramienta Translate de ExPASy para identificar la pauta de lectura, así como la ubicación exacta de los codones de inicio (ATG) y de paro (TAA).

Diseño de oligonucleótidos

se utilizaron como referencia los codones de inicio y de paro previamente identificados. De este modo, se diseñó el cebador *Forward* a partir del codón de inicio (5'-ATG ACT GCA GAC GTA TCC AG-3') y el cebador *Reverse* con base en el codón de paro (5'-TGT GCG GGA CGT CTA A-3'). Ambos oligonucleótidos se analizaron en la plataforma OligoAnalyzer Tool para determinar sus propiedades fisicoquímicas Mediante un análisis de BLASTn se evaluó la especificidad de las secuencias, observándose coincidencias parciales con otros organismos pero sin registros específicos para *R. sanguineus*. Finalmente, para permitir la clonación en el vector pCold I, se añadieron los sitios de restricción para la enzima *BamHI* en el cebador *Forward* (5'-CGCGGGATCCATGACTGCAGACGTATCCAG-3') y para *EcoRI* en el cebador *Reverse* (5'-CGCGGAATTCTGTGCGGGACGTCTAA-3').

Estrategia experimental

• Extracción de proteínas

Se descongeló en hielo a 4 °C un vial de intestino de garrapata (*Rhipicephalus sanguineus*)

conservado a -20°C . Una vez descongelado, se lavó en cinco ocasiones con 1 mL de una solución de inhibidor de proteasas en PBS, centrifugando a 13 000 rpm y 4°C durante 5 minutos. Tras cada lavado, se decantó el sobrenadante y el tejido se mantuvo en 300 μL de la solución de inhibidor de proteasas en PBS.

Posteriormente, la muestra se sometió a lisis física mediante un sonicador. Para ello, se limpió la sonda con etanol al 70 % (v/v) y se dejó secar al aire. La muestra se colocó en un recipiente con cama de hielo para mantener el tubo firme y evitar que la sonda tocara las paredes del mismo. El equipo se configuró para aplicar 3 pulsaciones de 5 segundos a una amplitud del 45 %.

Se realizó la extracción del ADN genómico con ayuda del kit Quick-Start Protocol DNeasy® Blood & Tissue Kit con el número de catálogo 69504, siguiendo los pasos descritos en el manual de acuerdo a el apartado “1ª. Tissue”, a partir de muestras de intestino de *Rhipicephalus sanguineus*, 1 vial que se encontraba congelado a -20° .

• Purificación de proteínas

Se utilizó el kit ReadyPrep™ 2-D Cleanup (Bio-Rad) siguiendo las instrucciones del fabricante. Se tomaron 100 μL del extracto proteico y se adicionaron 400 μL del agente precipitante 1, homogeneizando en vórtex durante 30 segundos e incubando en hielo por 15 minutos. A continuación, se añadieron 400 μL del agente precipitante 2 y se mezcló en vórtex durante 30 segundos. La mezcla se centrifugó a 12 000 rpm durante 5 minutos a 4°C . inmediatamente después de la centrifugación, la muestra se colocó en hielo y se descartó el sobrenadante. Al botón celular (*pellet*) obtenido se le agregaron 40 μL del agente de lavado 1 y se centrifugó a 12 000 rpm por 5 minutos a 4°C . Se desechó el sobrenadante y se añadió 1 mL del reactivo de lavado 2 (previamente enfriado a -20°C durante 1 hora) junto con 5 μL del agente aditivo de lavado 2. La mezcla se incubó a -20°C durante 30 minutos, agitando en vórtex durante 30 segundos cada 10 minutos.

Finalmente, se centrifugó, se descartó el sobrenadante y se dejó secar el *pellet* al aire. La muestra se resuspendió en 200 μL de *buffer* de rehidratación 2-D y se almacenó a -20°C hasta su uso posterior.

• Purificación de Ácidos Nucleicos para obtener muestras puras de ADN

Se hizo uso de DNeasy® Blood & Tissue Kit (cat. nos. 69504 and 69506) al cual se le hicieron modificaciones y se utilizaron otros equipos, el procedimiento que se siguió fue:

Seguir los pasos de acuerdo al apartado de “Tejido celular” de los pasos 1 a 4, se colocó en uno de los tubos que venían en el Kit 180 μL de Buffer ATL, a continuación agregar 20 μL de Proteinasa K, mezclando con Vortex hasta homogeniza (se tiene la solución, incubar a 56°C en Termobañó marca ANOVA model W6 sustituyendo a la incubadora durante 30 minutos finalmente vortexear durante 15 segundos; agregar 200 μL de Buffer AL mezclando bien con Vortex e incubando en este paso durante 10 minutos a 56°C , en el mismo tubo agregar etanol de grado biología molecular y mezclar con vortex para homogeneizar. Pipetear la mezcla obtenida en una columna (que se adhiere a un nuevo tubo), centrifugar a 8000 rpm a 4°C durante 1 minuto, se pone el líquido sobrante se desecha junto con el tubo, quedándose únicamente con la columna, colocar la columna en un tubo nuevo, agregar 500 μL de Buffer AW1 centrifugar a 8000 rpm a 4°C por un minuto, el procedimiento se repite hasta ver la mezcla transparente, hasta este paso, la muestra cumplía con ese requisito. Se desecha el líquido y el tubo de recolección. la columna se coloca en un tubo nuevo y se agregan 500 μL de Buffer AW2, a continuación se centrifuga a 14,000 rpm por 3 minutos se desecha el líquido y el tubo. Se traslada la columna a un tubo nuevamente nuevo, se eluye el ADN agregando 200 μL de Buffer AE en la columna, se incuba durante 1 minuto a temperatura ambiente y enseguida se centrifuga por 1 minuto a 8000 rpm a 4°C , este último paso se repite 1 vez mas

Se extrajo ADN genómico a partir de muestras de intestino de *Rhipicephalus sanguineus* utilizando el kit DNeasy® Blood & Tissue Kit (Cat. Nos. 69504 y 69506), siguiendo las especificaciones del apartado "Tejido" (*Tissue*, pasos 1 a 4) con ligeras modificaciones.

En un tubo del kit se colocaron 180 μ L de *Buffer* ATL y 20 μ L de Proteinasa K, homogeneizando en vórtex. La solución se incubó a 56 °C durante 30 minutos en un termobañó (ANOVA, modelo W6) y posteriormente se agitó en vórtex durante 15 segundos. Se añadieron 200 μ L de *Buffer* AL, se mezcló en vórtex y se incubó a 56 °C durante 10 minutos. A continuación, se agregó etanol grado biología molecular y se homogeneizó nuevamente en vórtex.

La mezcla se trasvasó a una columna de centrifugado y se centrifugó a 8 000 rpm y 4 °C durante 1 minuto. Se descartó el líquido filtrado junto con el tubo de colección. La columna se transfirió a un tubo nuevo, se añadieron 500 μ L de *Buffer* AW1 y se centrifugó a 8 000 rpm y 4 °C por 1 minuto (paso que se repitió hasta observar la mezcla transparente). Tras descartar el tubo con el filtrado, la columna se colocó en un tubo nuevo, se agregaron 500 μ L de *Buffer* AW2 y se centrifugó a 14 000 rpm durante 3 minutos.

Por último, la columna se trasladó a un tubo eppendorf nuevo para realizar la elución del ADN. Se añadieron 200 μ L de *Buffer* AE sobre la columna, se incubó durante 1 minuto a temperatura ambiente y se centrifugó a 8 000 rpm y 4 °C durante 1 minuto. Este último paso de elución se repitió dos veces más.

• Electroforesis

Para la electroforesis, se utilizó el SISTEMA MINI ELECTROPHORESIS SYSTEM (modelo MSMINIONE, INPUT AC 100-120 W, Serial No. MINIONE-225). Previamente, la cámara de electroforesis y los peines se limpiaron con alcohol al 70%. El gel se preparó con agarosa al 1% en 50 mL de tampón TAE 1X.

Para el primer gel, se cargaron dos pocillos: en el pocillo 7.1 se añadieron 5 μ L de la escala de peso molecular de 1000 pb mezclados con 1 μ L de buffer de carga sobre Parafilm®; en el pocillo 7.2 se cargaron 10 μ L de la muestra de ADN mezclados con 2 μ L de buffer de carga (homogeneizados 5 veces con micropipeta). La electroforesis se programó a 100 V durante un tiempo total de 31 minutos, observándose la resolución de las bandas en la **Fig. 1**.

Para el segundo gel, se repitió exactamente el mismo procedimiento de preparación y carga, sustituyendo únicamente el marcador por una escala de peso molecular de 100 pb (pocillo 7.3) frente a la muestra de ADN (pocillo 7.4), corriendo el gel a 100 V durante 29 minutos, como se ilustra en la **Fig. 2**.

d) Resultados

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y secuencias de los oligonucleótidos diseñados para el gen del Inhibidor A de la elastasa leucocitaria.

Primer	Secuencia	Sitios de restricción	Longitud	% GC	Tm	Estructuras secundarias
Forward	ATG ACT GCA GAC GTA TCC AG	BamHI CGCGGG ATCCATG ACTGCAG ACGTATC CAG	20 pb	50.0 %	61.3° C	Hair pin
Revers	TGT GCG GGA CGT CTA A	EcoRI CGCGGA ATTCTGT GCGGGA CGTCTAA	16 pb	56.2 %	59.8 °C	Hair pin

La concentración del ADN, fue de 5.9 ng/ μ L, con valores de relación 260/280= 2.47 y de 260/230= 0.28.



Fig1. Electroforesis en gel de agarosa al 1% empleando marcador de peso molecular de 1000 pb. Pocillo 7.1: Escalera de 1000 pb; Pocillo 7.2: Muestra de ADN purificado.

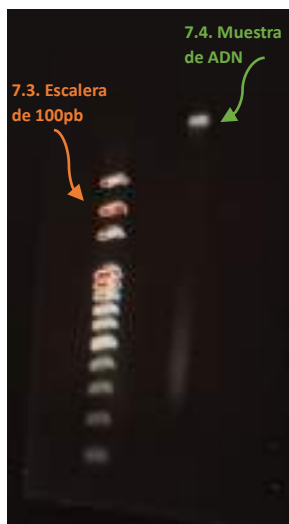


Fig2. Electroforesis en gel de agarosa al 1% empleando marcador de peso molecular de 100 pb. Pocillo 7.3: Escalera de 100 pb; Pocillo 7.4: Muestra de ADN purificado.

e) Discusión y conclusiones

En relación con la fase experimental, la extracción del ADN a partir de el intestino de *R. sanguineus* la cual tuvo una concentración de 5.9 ng/μL indica

lo complejo que puede ser trabajar con muestra de tejido como la de la garrapata, diversos autores han reportado que las muestras provenientes de garrapatas presentan dificultades durante la lisis y purificación debido a que tienen pigmentos derivados de la digestión de la sangre, pigmentos que pueden interferir en la pureza y disminuir la eficiencia de la extracción (Caro Cruz, 2021; Rodríguez-Vivas et al., 2023).

Por otro lado, la falta de resolución de bandas claras y emparentadas en los geles de agarosa se puede explicar porque al extraer el ADN genómico, la masa molecular del genoma integro sobrepasa el rango de separación de las escaleras de peso molecular como lo son de 100 pb a 1000 pb si el material no se ha fragmentado en su totalidad o se ha amplificado previamente por PCR (Green y Sambrook, 2012; Lee et al., 2012).

Como conclusión, se identificó exitosamente la secuencia del gen que codifica para el inhibidor A de la elastasa leucocitaria en *Rhipicephalus sanguineus* en la base de datos GenBank. Se diseñaron y caracterizaron in silico los oligonucleótidos para poder realizar una clonación posterior en el vector pColdI. Se realizo una estandarización del ADN genómico a partir de tejido de intestino de garrapata y se identificaron necesidades para optimizar las condiciones de la lisis y la purificación para poder llevar a cabo una amplificación por PCR y clonación.

f) Agradecimientos

Las autoras agradecen al Laboratorio de Inmunología y Vacunas (LINVAS Investigación) de la Universidad Autónoma de Querétaro , en especial al personal técnico de laboratorio por facilitar el uso del sonicador, equipo fundamental para la lisis de las muestras utilizadas durante este proyecto.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento al Programa de Verano de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Secretaría de Investigación y Posgrado encabezado por el Dr.

Manuel Toledano Ayala y a la Dirección de Investigación, dirigida por la Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes, por hacer posible la realización de esta estancia de investigación

g) Referencias Bibliográficas

A. K. Hernández Juárez, *Interactoma de proteínas de Rhipicephalus sanguineus, con antígenos de Rickettsia rickettsii* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México, 2022.

F. Dantas-Torres, "Biology and ecology of the brown dog tick, *Rhipicephalus sanguineus*", *Parasites & Vectors*, Vol. 3, Article 26. Disponible en <https://doi.org/10.1186/1756-3305-3-26> [consultado en 2026].

F. Dantas-Torres, "The brown dog tick, *Rhipicephalus sanguineus* (Latreille, 1806) (Acari: Ixodidae): From taxonomy to control", *Veterinary Parasitology*, Vol. 152, Issue 3–4, pp 173–185. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2007.12.030> [consultado en 2026].

M. R. Green y J. Sambrook, *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, 4.^a ed. Cold Spring Harbor, NY, EE. UU.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2012.

O. Caro Cruz, *Tipificación génica de Rhipicephalus sanguineus sensu lato en Mexicali, Baja California* [Tesis de Maestría]. Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B. C., México, 2021.

P. Y. Lee, J. Costumbrado, C. Hsu, y Y. H. Kim, "Agarose gel electrophoresis for the separation of DNA fragments", *Journal of Visualized Experiments*, No. 62, e3923, 2012. Disponible en <https://doi.org/10.3791/3923> [consultado en 2026].

QIAGEN, *Supplementary Protocol: Purification of total DNA from ticks using the DNeasy® Blood & Tissue Kit for detection of Borrelia DNA*, 2008.

R. I. Rodríguez-Vivas, G. J. Flota Burgos, M. E. Bolio-González, et al., "La garrapata café del perro, *Rhipicephalus sanguineus*: Biología y control", *REDVET Revista Electrónica de Veterinaria*, Vol. 16, No. 3, pp 1–10, 2023.



Criogeles de proteína chícharo y extracción de subproductos de café

Velazquez García, Manuel Fabian^a; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia^{ac}

^a Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química.

^c smendoza@uaq.mx

RESUMEN

Este estudio se inscribe en el marco de la economía circular y tiene como propósito dar valor agregado a los posos de café (SCG), con el fin de mitigar su impacto ambiental. El objetivo principal fue desarrollar criogeles a partir de proteína de chícharo y extraer compuestos fenólicos presentes en posos de café, evaluando su potencial aplicación en el sector cosmético. La metodología consistió en un desgrasado inicial de los residuos de café mediante extracción Soxhlet, seguido de una extracción asistida por ultrasonido para la recuperación de compuestos fenólicos. La capacidad antioxidante se determinó mediante los métodos Folin-Ciocalteu y DPPH, y se llevaron a cabo pruebas de impresión 3D con tintas de base alimentaria. Los criogeles se obtuvieron por gelificación ácida de aislado proteico de chícharo con goma xantana y posterior liofilización. Los resultados revelaron concentraciones de fenoles totales entre 6.10 y 8.76 mg equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra. Si bien el ensayo DPPH y las pruebas de impresión 3D presentaron limitaciones técnicas derivadas de la degradación de reactivos y del control térmico, se logró obtener criogeles estables, libres de sinéresis. Se concluye que los posos de café constituyen una fuente viable de antioxidantes, y que las proteínas de chícharo permiten generar matrices estables adecuadas para el transporte y almacenamiento de sustancias bioactivas.

Palabras clave: Criogeles, proteína de chícharo, posos de café, compuestos fenólicos, economía circular

ABSTRACT

This study focuses on circular economy by giving an additional value to spent coffee grounds to reduce environmental impact. The objective was to develop pea protein-based cryogels and extract phenolic compounds from spent coffee grounds (SCG) for potential cosmetic applications. The methodology involved degreasing SCG via Soxhlet extraction, followed by ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds. Antioxidant capacity was assessed using Folin-Ciocalteu and DPPH assays, alongside 3D printing trials with food-grade inks. Finally, cryogels were synthesized through acid gelation of pea protein isolate and xanthan gum, followed by lyophilization. Results revealed total phenolic concentrations between 6.10 and 8.76 mg gallic acid per gram used. Despite technical challenges in the DPPH assay and 3D printing due to reagent degradation and temperature control issues respectively, stable cryogels without syneresis were produced. It is concluded that coffee residues are a viable source of antioxidants and that pea proteins form stable matrices suitable for bioactive compound storage and transport.

Keywords: Cryogels, pea protein, spent coffee grounds, phenolic compounds, circular economy

INTRODUCCIÓN

La gestión de subproductos agroindustriales dejó de ser un reto logístico y se volvió una oportunidad clave dentro de la economía circular, buscando reducir el impacto ambiental y agregar valor a biomásas frecuentemente desechadas. En este contexto, el bagazo o los posos de café (Spent Coffee Grounds, SCG) surgen como uno de los residuos sólidos más relevantes, debido a su generación anual estimada en 6 millones de toneladas a nivel global (Zhao et al., 2024). Este subproducto representa cerca del 45% del grano original tras el proceso de infusión y su manejo incorrecto al desecharlo puede tener efectos fitotóxicos en el compostaje (Beaudor et al., 2023). No obstante, los SCG son ricos en compuestos de alto valor como carbohidratos, lípidos, proteínas y principalmente, compuestos fenólicos como los ácidos clorogénicos (Zhao et al., 2024) los cuales pueden ser extraídos con gran rendimiento y eficiencia con métodos como la extracción asistida

por ultrasonido (UAE, por sus siglas en inglés), donde se reduce el consumo energético en comparación con métodos convencionales (Beaudor et al., 2023).

Para proteger, almacenar y transportar extractos, se ha optado por usar la tecnología de encapsulación en biogeles desarrollados a partir de proteínas vegetales como el chícharo, aprovechando su capacidad de conservación de sustancias sensibles o lábiles gracias a su alta estabilidad (Casanova y Santos, 2015). Esto promueve su almacenamiento y procesamiento para un posterior uso cosmético.

OBJETIVO

Desarrollar criogeles basados en proteína de chícharo y extraer proteínas y compuestos fenólicos de subproductos de café con potencial uso cosmético.

Particulares

- Conocer el funcionamiento de impresoras 3D de alimentos con tinta de puré de papa y chocolate.

METODOLOGÍA

I. Capacitación en técnicas experimentales de laboratorio y conocimiento teórico

Previo a la realización de la metodología, se llevó a cabo una semana de capacitación intensiva en técnicas que permitieron el desarrollo del proyecto al estandarizar procedimientos y garantizar el correcto manejo del material volumétrico y los equipos de medición. Para ello se realizaron extracciones de hexano con un rotoevaporador (Figura 1) y curvas de calibración con micropipetas en volúmenes de 1 mL y 100 μ L con tal de practicar el pipeteo correcto para el posterior análisis de capacidad antioxidante.



Figura 1. Rotaevaporador BUCHI

II. Desgrasado por Soxhlet de café usado generados en la preparación de café expreso

Se elaboraron dos cartuchos con hojas de papel filtro para desgrasar con hexano muestras de café tamizadas en un equipo Soxhlet por 8 horas (Figura 2).



Figura 2. Extracción de lípidos de posos de café en equipo Soxhlet

III. Extracción de compuestos fenólicos mediante cavitación por sonotrodo.

Posterior al desgrasado, se agregó 1 gramo de muestra a 50 ml de una mezcla 1:1, etanol:agua y se sonicó (Figura 3) con los siguientes parámetros: 30 % de amplitud 5 min en baño de hielo, agitar 30 min a temperatura ambiente. Posteriormente la muestra se centrifugó a 4000 g por 10 minutos y el sobrenadante se transfirió a un matraz. El procedimiento se repitió 3 veces.

Los sobrenadantes se juntaron y la fase sólida fue secada a 40 °C por 12 h en un deshidratador de alimentos de aire forzado (Food Dehydrator, Excalibur). La fase líquida se filtró con filtros de nitrato de celulosa 0.45 μ m y se guardó a 4 °C en viales ámbar.



Figura 3. Muestra de café en sonotrodo

IV. Ensayos de capacidad antioxidante

Se realizaron dos ensayos de determinación de capacidad antioxidante: Determinación de fenoles totales con reactivo de Folin-Ciocalteu y por DPPH.

Se siguió la metodología establecida por Prior et al., en 2005 para el ensayo con reactivo de Folin-Ciocalteu. Asimismo, se realizó la determinación de DPPH según la metodología establecida por Prior et al., en 2005.

V. Impresión 3D con tintas comestibles (puré de papa, chocolate)

Se utilizó una impresora por extrusión (*Foodbot S2 Multi Ingredient Food 3D Printer*) para imprimir en 3D distintos modelos precargados en la aplicación de impresión. Para el puré de papa se usó colorante azul y rojo, con una preparación común de empaque y se llevó a una temperatura de 32 °C, usando de modelo un cubo tridimensional (Figura 4), con el objetivo de observar la estabilidad estructural del puré de papa.

Posteriormente se usó chocolate a 42 °C con una punta más fina y se usaron distintos modelos con profundidad y otros planos (Figura 5).

VI. Elaboración de hidrogeles y criogeles.

Se pesaron 0.15 g de goma xantana y se agregaron 5 mL de agua desionizada para homogeneizar sin generar grumos. Se ajustó el pH a 10 con NaOH y se dejó 24 horas en el congelador.

Se disolvieron 0.15 g de aislado proteico de chícharo en 4.5 mL de agua y se agitó por 2 horas. Se colocaron 500 µL de la dispersión + 35 µL de GDL, se aforó a 10 mL y se produjo su gelificación ácida hasta pH de 4. Se congeló a -5 °C por 18 horas y se liofilizó por 48 horas para generar el criogel.

RESULTADOS

I. Capacitación en técnicas experimentales de laboratorio y conocimiento teórico

Se obtuvieron dos curvas de calibración, la primera con un volumen de 1 mL (Figura 4) y la segunda de 100 µL (Figura 5).

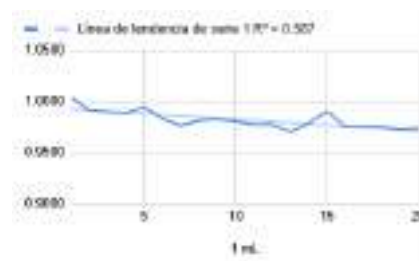


Figura 4. Repetición de 20 volúmenes de 1 mL

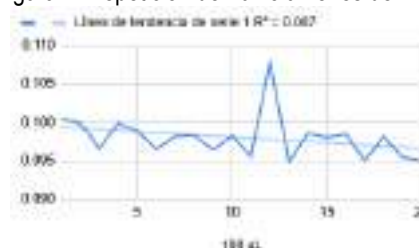


Figura 5. Repetición de 20 volúmenes de 100 µL

II. Desgrasado por Soxhlet de restos de café usado.

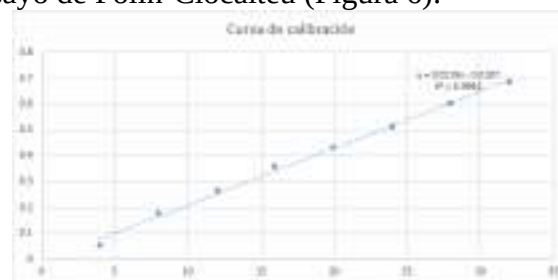
Se recuperaron 32.3918 g de posos de café desgrasados por equipo Soxhlet.

III. Extracción de compuestos fenólicos mediante cavitación por sonotrodo y filtrado

Se obtuvieron ≈ 6.5 mL de compuestos fenólicos por cada 50 mL de muestra. Esto se realizó por triplicado y representa un rendimiento de 13% v/v respecto a la solución inicial.

IV. Ensayos de capacidad antioxidante

Se obtuvo la siguiente curva de calibración con el ensayo de Folin-Ciocalteu (Figura 6):



Gráfica 1. Curva de calibración de método Folin-Ciocalteu expresado en µg/mL de ac. gálico

Y empleandola, se encontraron las concentraciones de tres muestras:

Muestra	mg ac. gálico/g de muestra
A	8.76433283
B	6.10755961
C	8.25748351

Tabla 1. Concentración total de compuestos fenólicos en posos de café

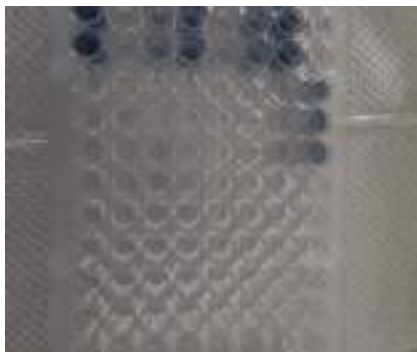


Figura 6. Lector de placa de ensayo Folin-Ciocalteu

La determinación de capacidad antioxidante por la técnica DPPH (Figura 7) fue realizada dos veces, no obstante, el coeficiente de correlación no fue lo suficientemente preciso para poderlo considerar como un parámetro reportable.



Figura 7. Lector de placa de ensayo DPPH

V. Impresión 3D con tintas comestibles (puré de papa, chocolate)



Figura 8. Vistas por encima de las impresiones de un cubo con puré de papa con colorante rojo y azul



Figura 9. Impresión de blattodea con chocolate

VI. Elaboración de bio-geles (hidrogeles y criogeles)

Se obtuvieron los criogeles que se muestran en la Figura 10.



Figura 10. Criogeles de proteína de chícharo y goma xantana

DISCUSIÓN

Los ensayos mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu revelaron concentraciones de fenoles totales entre 6.10 y 8.76 mg de ácido gálico por gramo de muestra. Estos valores se encuentran en el rango reportado en el estudio de Beaudor et al. (2023) y se confirma que los residuos de café son una fuente rica de ácidos fenólicos con actividad antioxidante y potencial aplicación en productos cosméticos anti-envejecimiento (Beaudor et al., 2023; Zhao et al., 2024). Por otro lado, en la prueba con DPPH se presentaron errores con el pipeteo, además de que el reactivo se encontraba ya degradado posiblemente por exposiciones a la luz u oxígeno, dado que es un radical libre y por lo tanto, una sustancia sensible. En ese sentido, se precisa de optimizar las curvas de calibración.

La impresión 3D presentó ciertas complicaciones con ambas tintas debido a la temperatura (muy baja, menor a 35 °C) e incluso a las puntas, las cuales, al extrudir, se obstruían e impedían un correcto depósito de tinta. Adicionalmente, la impresión de chocolate a 42 °C presentó mayores retos técnicos, ya que la fidelidad de la forma en tintas basadas en lípidos depende críticamente de la

cristalización de las grasas y su comportamiento térmico (Raut et al., 2026).

La obtención exitosa de criogeles a partir de aislado proteico de chícharo y goma xantana es un resultado clave para el transporte de compuestos bioactivos debido a su alta estabilidad y perfil de aminoácidos esenciales, demostrando su utilidad en la conservación de sustancias bioactivas lábiles (Casanova y Santos, 2015).

CONCLUSIONES

Se obtuvieron de 6-8 mg de ácido gálico/g de muestra en los posos de café, un rango óptimo para extracción de UAE.

Se desarrollaron criogeles con matrices de proteína de chícharo sin sinéresis.

Se comprendió el correcto funcionamiento de la impresora 3D (puntas, tintas, temperaturas).

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Micro y Nano Encapsulación, a Ángel David Dorantes García, a la Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz, al Dr. Adolfo, a la Dra. Minerva Ramos, al M. en C. Claudio González Galeana y al Centro de Investigación en Química para la Economía Circular.

REFERENCIAS

Beaudor, M., Vauchel, P., Pradal, D., Aljawish, A., & Phalip, V. (2023). Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 188, Artículo 109358. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109358>

Casanova, F., & Santos, L. (2015). Encapsulation of cosmetic active ingredients for topical application – a review. *Journal of Microencapsulation*, 33(1), 1–17. <https://doi.org/10.3109/02652048.2015.1115900>

Raut, S., Pawase, P. A., Khalid, S., Shingote, A. B., Pathare, A. M., Rout, S., Bashir, O., & Abdi, G. (2026). Recent advances in 3D food printing: A critical review of emerging technologies, material innovations, and novel applications. *Applied Food Research*, 6, Artículo 101773. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101773>

Prior R.L., Wu X. and Schaich K. 2005. Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements. *J.Agric. Food Chem.* 53: 4290-4302.

Zhao, N., Liu, Z., Yu, T., & Yan, F. (2023). Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104312. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104312>

Desarrollo de una película inteligente y bioactiva a base de lavanda mexicana con respuesta colorimétrica inducida para aplicaciones en empaques

Autor. Joshua Sierra Jiménez

Asesora. Dra. Paola Itzel Bautista Espinoza.

Resumen.

La formulación de una película orgánica entra con la finalidad de ser una respuesta ante la contaminación por la producción de plásticos sintéticos a base de petróleo, al ser una opción más amigable con el medio ambiente.

Esta película esta hecha a partir de polisacáridos naturales, formando una capa de delgada con capacidad flexible, sin perder estructura siendo así resistente a estímulos físicos y químicos como lo es el cambio de pH.

La utilización de esta película como material para empaques de alimentos entra por su resistencia, similitud con películas de origen sintético y por la capacidad de ser sensible al pH que se señala por cambio de color.

La lavanda es una planta utilizada mundialmente por sus propiedades aromáticas, medicinales y repelentes de insectos. A la estructura de la película por su contenido en antocianinas el cual es un compuesto altamente sensible al pH, le da a la película la capacidad inteligente de cambiar de color al estar suceptible al cambio de pH por la degradación de los alimentos en contacto con dicha película.

Palabras Clave.

Película, Empaques, Color, pH

Abstract

The development of this organic film aims to address the pollution caused by the production of petroleum-based synthetic plastics, offering a more environmentally friendly alternative.

Made from natural polysaccharides, the film forms a thin, flexible layer that retains its structural integrity while resisting physical and chemical stressors, such as pH fluctuations.

Its suitability as a food packaging material stems from its durability, its similarity to synthetic films, and its pH-sensitivity, which is visually indicated by a color change.

Lavender is a plant used worldwide for its aromatic, medicinal, and insect-repellent properties. Its anthocyanin compounds highly sensitive to pH endows the film with "smart" functionality: it changes color in response to pH shifts caused by food degradation when in contact with the packaging.

Keywords

Edible film, packing, color, pH

Introducción.

Los polímeros sintéticos, comúnmente llamados plásticos, son utilizados con el

propósito de sustentar la demanda y necesidades de la población, a partir de esto se obtienen subproductos de estos procesos de síntesis, que quedan en el agua, suelo, aire y el cuero humano, contaminándolos. [1]

El uso de plástico en el mundo moderno se ha convertido en un problema a gran escala debido a la mala administración y el uso desmedido. Estos productos se han convertido en objetos de uso diario que se han adoptado como una necesidad de la población.

Durante la pandemia del 2019 se vió un aumento considerable de esta contaminación por la necesidad del uso de medidas sanitarias y equipo de seguridad médico. [2]

Actualmente se idearon nuevas alternativas para combatir el uso desmedido de plásticos, através de la formación de matrices poliméricas orgánicas, producidas a partir de materias primas vegetales como la celulosa, almidón y aceites vegetales. [3]

El desarrollo de una película en laboratorio que puede volverse parte de un empaque alimenticio y se tomará como nueva alternativa ante empaques de origen sintético, podría ayudar a contribuir a la disminución del aumento de plásticos en el mundo, surgiendo como una opción amigable con el medio ambiente siendo biodegradable, teniendo como capacidad el cambio de color, indicando al consumidor la condición del alimento almacenado.

Objetivos.

Objetivo general. Preparar una película orgánica utilizando extracto de lavanda como materia prima.

Objetivos Específicos.

1. Evaluar la capacidad de la película para presentar cambios de color ante diferentes valores de pH.

2. Determinar la viabilidad de la película de lavanda como material indicador de cambios de pH.

3. Realizar una caracterización física de la película obtenida.

Metodología

1. Obtención del extracto etanoíco.

1.1 Materiales.

Como materia prima del extracto se usó partes de la planta de lavanda, lo que corresponde a hojas, tallo y semillas y se extrajo en una solución de alcohol etílico absoluto.

1.2 Procedimiento.

Se hizo una mezcla de alcohol etílico absoluto y la planta de lavanda con en una proporción de 70:30 (p/v) y se dejó en agitación a temperatura ambiente en un frasco cerrado.

Al terminar el tiempo de agitación se filtró la planta y se devolvió el extracto líquido al frasco hermetico.

2. Preparación de película bioactiva.

2.1 Materiales.

Se utilizó almidón de papa y goma guar como matriz para la estructura de la película, además se le añadió glicerol y el extracto etanoíco.

2.2 Procedimiento.

Se preparo la mezcla de la película base por partes, la primera parte consto de la mitad del volumen total de agua destilada, este se usó para solubilizar el alidón de papa a temperatura ambiente, la segunda parte constó de la otra mitad del volumen de agua para solubilizar la goma guar.

Una vez que ambas mezclas ya no contaban con grumos se mezclaron homogéneamente en una sola.

Se calentó la mezcla para coser el almidón en constante agitación.

Después paso a una etapa de atemperado. Una vez que la mezcla bajo su temperatura se le añadió el 10% del volumen de la mezcla total del extracto etanoico aun en agitación.

Se pesó 1.883g de glicerol de grado alimenticio para plastificar la mezcla.

Al terminar el proceso de mezclado y de incorporación de reactivos se dividió la mezcla en partes iguales en placas que después se llevarón al horno.

3. Prueba del extracto al cambio de pH

3.1 Materiales.

Para esta técnica se prepararon dos soluciones de 100 mL, una de HCl 1N a partir de HCl concentrado y se diluyó con agua destilada, para la segunda solución se preparo NaOH 1N igualmente diluida la base con agua destilada, para la medición se utilizó un potenciómetro modelo. De la marca. Previamente calibrado con sus tres estándares correspondientes.

3.2 Protocolo.

Para la prueba entre cada medición se enjuagó con agua destilada y se seco con una toalla de papel absorbente el potenciómetro para evitar mediciones erróneas.

3.3 Procedimiento.

Se tomaron 2mL del extracto etanoico a los cuales se les midió el pH con un potenciómetro previamente calibrado, el pH inicial obtenido fue de 6.15.

Se añadió la solución de HCl 1N hasta bajar el pH a 6 y donde se tomo la primer

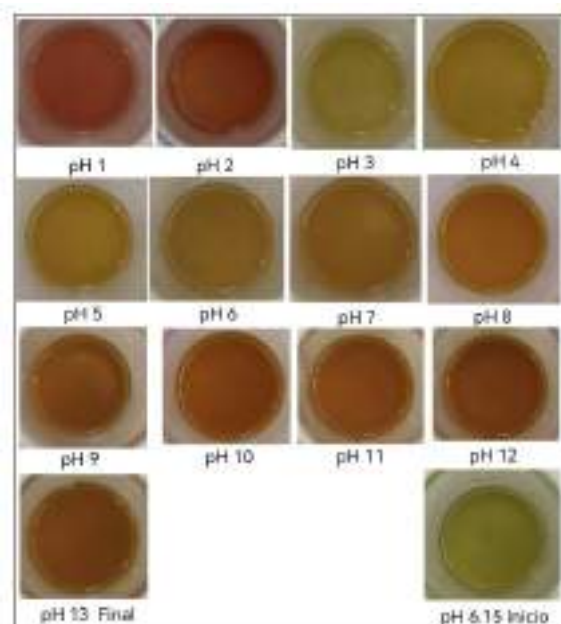
fotografía, después se fué bajando el pH de una unidad en una unidad hasta 1 tomando las fotografías correspondientes, a partir del pH en 1, con la solución de NaOH 1N se fué subiendo el pH de una unidad en una unidad hasta el pH 13 de igual forma tomando sus fotografías correspondientes.

Resultados.

Al añadir las diferentes soluciones se observó que no había un cambio de color tan evidente entre algunas unidades, sin embargo al comprar fotografías, cada una mostró una tonalidad diferente.

Se observó que al iniciar el color de la solución era verde oscuro, al iniciar la prueba se obtuvo un cambio de color inmediato de 6.15 a 6, también se observó que una vez que inicia el contacto con soluciones acido base jamás la solución vuelve a tornarse de color verde, este color se pierde por completo, al intentar regresar al pH inicial la respuesta colorimétrica obtenida fué un tono amarillo naranja con ello se presenta una tabla de fotografías de cada pH obtenido.

Tabla 1. Respuesta del extracto etanoico por adición de soluciones de HCl y NaOH 1N.



Se obtuvo una película de color verde claro translúcida, flexible, de bajo peso y resistente a estímulos físicos.

La película poseía un aroma suave herbal, su superficie era lisa y reflejaba la luz.

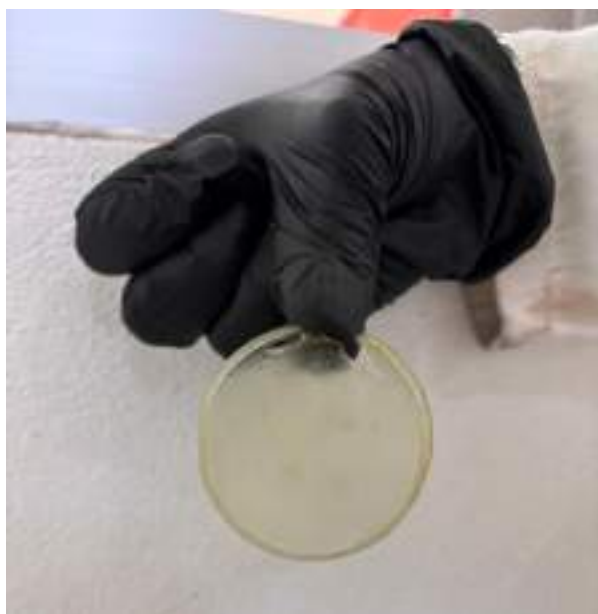


Figura 1. Película de mezcla base y extracto de lavanda 10%.

La caracterización de la película consistió en el cálculo de la resistencia a la tensión.

Para realizar esta caracterización se llevó al laboratorio del Instituto Politécnico Nacional campus (Querétaro, Qro.) Se hizo a través de un instrumento de , se hizo este procedimiento por triplicado y se obtuvieron los resultados de la tabla 2.

Tabla 2. Valores de la resistencia a la tensión de películas al 10%.

Película	Resistencia a la tensión (MPa)
E1	6.3103
E2	3.6592
E3	4.0794

Discusión y conclusiones.

- Cambio de color de pH.

Las antocianinas son un grupo importante utilizado como colorantes dentro del espectro visible, su rango colorimétrico abarca desde rojos hasta azules.

El color de este compuesto va depender del número de los grupos hidroxilos y su orientación, al incrementarlos estos grupos en la molécula produce que absorba mayormente tonalidades rojas y por lo tanto la veamos de tonos azules. Por otro lado si reemplazamos el grupo hidroxilo por grupos metoxi genera un efecto contrario en la molécula, absorbiendo el rango de luz azul y refleja más la luz roja.

El pH es un factor capaz de cambiar tanto la estructura como la estabilidad de la molécula, al estar en pH ácido por la formación de iones y al estar en pH básico por formación de quinoidales [4]

Respecto al rango colorimétrico y la teoría consultada los valores de pH corresponden al cambio de ramificaciones de grupos hidroxilo y metoxi respecto al pH del medio, al entrar a pH básico se esperaría que regresará a una tonalidad verde o azul sin embargo se tornó de nuevo a naranja, esto puede deberse a la oxidación por aire de igual forma mencionada en la teoría.

La oxidación por contacto por el aire en medio básico a diferencia del medio ácido, es que en el medio ácido el compuesto se protege, la acidez tiene este efecto protector permitiéndole el cambio de color a rojo, pero en medio básico al perder este efecto protector se oxida y vuelve al rango rojo claro o naranjado.

Las antocianinas son la molécula que se le atribuye el cambio de color, esta responde a la acidez del medio sustituyéndola y modificando ramificaciones dependiendo del medio y la oxidación del aire

- Película de lavanda.

La película obtenida mostró características de resistencia a estímulos físicos y químicos como el cambio de pH, cambió de color por el tipo de medio, presentó buena estructura.

La matriz generada por el complejo de almidón y goma guar, además de la de administración de un plastificante le permitió a la película tener una estructura elástica y flexible. Al incluir el extracto cambió el color a un tono verde claro que le dio la capacidad del cambio de color al contacto con la acidez del medio provocado por las antocianinas provenientes del extracto base de lavanda.

Aplicando esta película a empaques de alimentos ayudaría al consumidor detectar con mayor facilidad la degradación y el estado de putrefacción del alimento almacenado.

La resistencia del empaque no tendría problema de almacenar y proteger el alimento, además de que el colorante que provoca el cambio de color en la película, ya es utilizado en la industria de los alimentos.

La viabilidad de la película como una alternativa para un empaque de uso alimenticio resultó positiva al poseer

propiedades exigentes y llamativas para el consumidor.

- Resistencia a la tensión.

Se realizó esta prueba por triplicado y se obtuvieron valores desfasados. Al sacar el promedio de las resistencias de las películas se obtuvo un valor de 4.683 MPa.

Al compararla con los resultados de otro artículo de una película a base de una matriz de almidón combinada con antocianinas su resistencia a la tensión fue de 5.8 Mpa. [5]

La resistencia mecánica como lo es el estímulo de tensión también indica dentro de la matriz un efecto plastificante, la variación de valores puede deberse a la dispersión, homogeneidad o la formación de microburbujas en la superficie.

La diferencia de valores sugiere una falta de dispersión de moléculas, un efecto de resistencia a la tensión indica un efecto plastificante proveniente de la goma guar y glicerol.

Agradecimientos.

A la Dra. Paola Itzel Bautista, por haberme enseñado y llevado paso a paso como guía con paciencia y buena voluntad por cada parte del proceso y haberme explicado y enseñado durante todo el periodo del proyecto, ayudarme con investigación y buscar los mejores recursos tanto teóricos como materiales y reactivos para un mejor resultado.

Al Dr. Jorge Gracida por sus enseñanzas, materiales y reactivos, además del préstamo del laboratorio de trabajo.

Al laboratorio de biotecnología. Por haberme prestado sus instalaciones para realizar el proyecto llevado a cabo a través del programa "Verano de Ciencia".

A la estudiant Ximena Leyva Montes. Por su aportación al trabajo y práctica del laboratorio, además del acompañamiento y compañerismo.

A la estudiante Daniela Espinoza. Por su aportación a la práctica en el laboratorio a pesar de que no era su responsabilidad su empatía y amistad siempre estuvo presente.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por el beneficio de la beca mediante el programa "Verano de la Ciencia UAQ" 2026.

Referencias.

1. Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P. K., Kumar, R., Kumar, P., Shubham, Das, S., Sharma, P., & Vara Prasad, P. V. (2021). Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions. *Sustainability*, 13(17), 9963. <https://doi.org/10.3390/su13179963>

2. Procuraduría Federal del Consumidor. (2021, 5 de junio). *Contaminación por plástico*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/profeco/articulos/contaminacion-por-plastico?idiom=es>

3. Fonseca-García, A., Jiménez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Preparation and characterization of bioplastics based on potato starch with active extracts. *Polymers*, 13(19), 3323. <https://doi.org/10.3390/polym131933234>.
GARZÓN, GLORIA ASTRID. (2008). LAS ANTOCIANINAS COMO COLORANTES NATURALES Y COMPUESTOS BIOACTIVOS: REVISIÓN. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36. Retrieved August 16, 2026, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2008000300002&lng=en&tlng=es.

5. Zhang, X., Lu, Y., Saren, G., & Liu, Y. (2024). Intelligent color changing packaging film based on esterified starch and black rice anthocyanins. *Food Chemistry: X*, 24, 101850. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101850>

Repetibilidad en un electrodo de ion selectivo de Litio

Joel Alfredo Ramirez Arriaga^{1*}, María Cristina Ávalos González¹, Carlos Hernández Rodríguez¹ y Adrián Sosa Domínguez^{1*}.

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, joelalfredoramirez294@gmail.com, adrian.sosa@uaq.mx

Resumen

En el presente trabajo de investigación se desarrolló en primer lugar un electrodo de ión selectivo de litio utilizando electrodos serigrafiados y modificando su superficie con nanotubos de carbono de pared múltiple con el objetivo de aumentar la sensibilidad del electrodo en la detección de litio en agua. Una vez que se desarrolló el electrodo de ión selectivo de litio se procedió a realizar la evaluación de la repetibilidad del método electroanalítico empleado que fue potenciometría. La repetibilidad se evalúa con el fin de determinar qué tan cercanos son entre sí los resultados en condiciones de mismo analista, equipo, y método en un intervalo corto de tiempo. Para evaluar la repetibilidad se realizaron seis réplicas de una muestra con una concentración de 1×10^{-4} M. Los resultados indicaron que el método electroanalítico propuesto es preciso evaluado a partir de la repetibilidad mostrando un coeficiente de variación entre 2 % y 5 %.

Palabras clave: electrodo selectivo de litio, precisión, repetibilidad.

Abstract

In the present research work, a lithium ion-selective electrode was first developed using screen-printed electrodes, whose surface was modified with multi-walled carbon nanotubes in order to increase the sensitivity of the electrode for lithium detection in water. Once the lithium ion-selective electrode was developed, the repeatability of the electroanalytical

method employed, namely potentiometry, was evaluated. Repeatability was assessed to determine how closely the results agree with each other under the same analyst, equipment, and method conditions over a short period of time. To evaluate repeatability, six replicates of a sample with a concentration of 1×10^{-4} M were analyzed. The results indicated that the proposed electroanalytical method is precise based on the repeatability assessment, showing a coefficient of variation ranging from 2% to 5%.

Keywords: lithium-selective electrode, precision, repeatability.

Introducción

El monitoreo preciso del ion litio (Li^+) es fundamental en la actualidad, tanto en el ámbito clínico -debido al estrecho margen terapéutico del litio como estabilizador del ánimo— como en el sector industrial, impulsado por el auge de las baterías de ion-litio y la transición energética. Frente a los métodos analíticos tradicionales, los electrodos de ion selectivo destacan como una alternativa portátil, económica y miniaturizada para la cuantificación de este analito [1].

Los electrodos selectivos por iones (ISE) son cruciales para detectar especies iónicas y se utilizan ampliamente en sensores electroquímicos debido a su alta sensibilidad, selectividad, bajo coste, simplicidad y amplia aplicabilidad en los campos biomédico, ambiental, agrícola e industrial. Las EEI son especialmente útiles cuando las especies iónicas están electroquímicamente inactivas o cuando generar señales de corriente a partir de reacciones faradaicas resulta complicado. Esto se debe a que los EEI determinan las concentraciones de iones midiendo las diferencias de potencial en interfaces selectivas de iones en respuesta a la actividad iónica [2].

Entre los distintos tipos de EEI, los EEI de membrana polimérica basados en ionóforos reciben una atención significativa, especialmente en la medición de iones electrolitos, por ejemplo, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , y Cl^- en fluidos corporales, como sangre, suero, sudor y orina, en aplicaciones biomédicas [3]. Una ISE clásica de membrana polimérica es del tipo de contacto líquido, típicamente compuesta por membranas poliméricas

selectivas por iones que contienen portadores iónicos neutros o cargados (ionóforos), una solución de relleno interna y un electrodo de referencia Ag/AgCl (RE) [4].

Debido a las modificaciones que se hacen a estos electrodos que implican procesos manuales que pueden introducir variaciones microscópicas en el espesor del sensor, es indispensable evaluar su reproducibilidad. Este parámetro metrológico mide la consistencia y homogeneidad en la respuesta analítica entre diferentes electrodos fabricados de manera independiente bajo el mismo protocolo, siendo un factor crítico para garantizar la confiabilidad y viabilidad comercial del dispositivo.

Objetivo

Evaluar la repetibilidad del método electroanalítico empleado que incluye el uso de electrodos serigrafados modificados con nanotubos de carbono de pared múltiple para la detección y cuantificación de Litio en agua.

Metodología

Electrodos de ion selectivo: Se utilizaron electrodos serigrafados (SPEs, *Screen-Printed Electrodes*) comerciales que integran en una sola pieza un electrodo de trabajo de carbono, un pseudoelectrodo de referencia de plata y un contraelectrodo de carbono.

Fase Selectiva: Mezcla polimérica constituida por Policloruro de Vinilo (PVC) de alto peso molecular (matriz), el Ionóforo de Litio específico, disueltos en tetrahidrofurano (THF) como solvente volátil [5].

Soluciones analíticas: Se prepararon siete soluciones de calibración de Cloruro de Litio mediante dilución seriada a partir de una solución madre concentrada. El rango de concentraciones abarcó siete órdenes de magnitud, desde la solución más diluida hasta la más concentrada de 1×10^{-1} M a 1×10^{-7} M.

Mediciones Potenciométricas: El registro de los datos analíticos se ejecutó empleando un potenciostato configurado en la modalidad de Potencial de Circuito Abierto (OCP) a corriente neta cero ($I = 0$). El equipo operó con una alta impedancia de entrada ($> 10^{12} \Omega$) para medir la diferencia de potencial sin drenar carga de la interfaz ni polarizar el sensor [6].

Cada una de las seis curvas de calibración se midieron de forma secuencial y descendente las siete soluciones de LiCl de concentración conocida. Para cada solución, se dejó caer una gota sobre el electrodo y se registró el potencial en milivoltios (mV) durante 5 minutos, luego se limpió el electrodo, se cambió la punta de la micropipeta y se pasó a la siguiente solución.

Resultados

En la **Fig. 1** se muestra un ejemplo de curva de calibración medida.

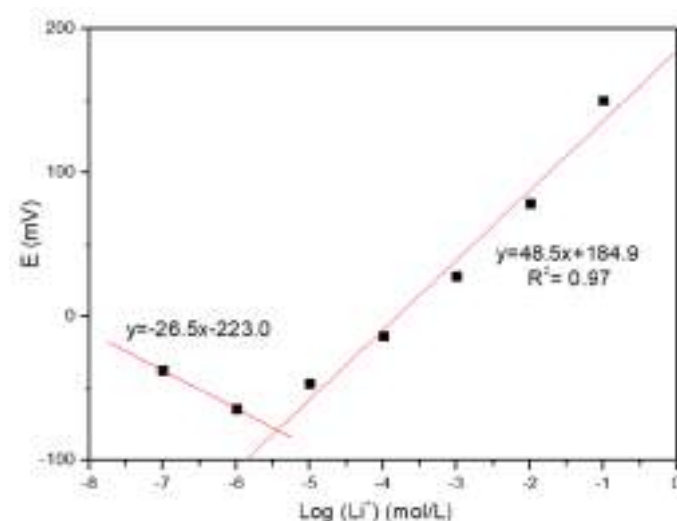


Fig. 1. Curva de calibración para la determinación de Litio en agua.

En la **Tabla 1** se muestran los valores de las concentraciones medidas de litio, tomando la concentración del punto intermedio de la curva de calibración de 1×10^{-4} M, es decir se prepararon seis soluciones a esa concentración y se llevó a cabo su medición.

Tabla 1. Concentración medida de Litio en agua.

Réplica	Concentración (M)
1	0.000105
2	0.000109
3	0.000110
4	0.000102
5	0.000103
6	0.000101

Discusión y Conclusiones

En la **Fig. 1** se puede observar que se el método potenciométrico propuesto para llevar a cabo la detección y cuantificación de litio en agua es adecuado debido a que se obtuvo un coeficiente de determinación representado por R^2 de 0.97.

La R^2 es un parámetro estadístico que indica qué tan bien los datos experimentales se ajustan al modelo de regresión, y por lo tanto que tan buena es la relación entre la señal potenciométrica y la concentración de litio.

En la **Tabla 1** se mostraron los valores de concentración de la seis réplicas del valor de concentración central de la curva de calibración que fue de 1×10^{-4} . Con estos datos se obtuvo un media de 1.05×10^{-4} M, una desviación estándar de 3.56×10^{-6} M y un coeficiente de variación de 3.39 %.

Los resultados anteriores nos permitieron concluir que el método electroanalítico propuesto para la detección y cuantificación de litio en agua tiene una repetibilidad adecuada lo cual se traduce en la capacidad del método para producir resultados consistentes cuando las mediciones se realizan bajo las mismas condiciones.

Agradecimientos

Los autores de la presente investigación agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro a través de los recursos FONFIVE por el apoyo brindado para la realización del presente proyecto. También los autores agradecen a la organización del Verano de la Ciencia UAQ por el apoyo brindado para la realización de la estancia de investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] T. Komatsu, M. Maeki, A. Ishida, H. Tani, y M. Tokeshi, «Paper-Based Device for the Facile Colorimetric Determination of Lithium Ions in Human Whole Blood», ACS Sens., vol. 5, n.o 5, pp. 1287-1294, may 2020, doi: 10.1021/acssensors.9b02218.
- [2] A. Winkelmann et al., «Determination of lithium in human serum by isotope dilution atomic absorption spectrometry», Anal. Bioanal. Chem., vol.

414, n.o 1, pp. 251-256, ene. 2022, doi: 10.1007/s00216-021-03636-6.

[3] M. N. Sweilam, J. R. Varcoe, y C. Crean, «Fabrication and Optimization of Fiber-Based Lithium Sensor: A Step toward Wearable Sensors for Lithium Drug Monitoring in Interstitial Fluid», ACS Sens., vol. 3, n.o 9, pp. 1802-1810, sep. 2018, doi: 10.1021/acssensors.8b00528.

[4] R. Thomas, Practical Guide to ICP-MS: A Tutorial for Beginners, Third Edition, 0 ed. CRC Press, 2013. doi: 10.1201/b14923.

[5] A. Rohiman, H. Setiyanto, V. Saraswaty, y M. B. Amran, «Review of analytical techniques for the determination of lithium: From conventional to modern technique», Moroc. J. Chem., vol. Vol. 11, p. Mor. J. Chem. 11 N°4 (2023) 979-1012 Pages, ago. 2023, doi: 10.48317/IMIST.PRSM/MORJCHEM-V11I04.40229.

[6] I. A. Vitale, G. Selvolini, y G. Marrazza, «Smart Sensor for Lithium Detection: An Environmental Application», Chemosensors, vol. 11, n.o 2, p. 77, ene. 2023, doi: 10.3390/chemosensors11020077.



Extracción de bioactivos de café para aerogeles cosméticos

Luna Montaña Ximena; Mendoza Díaz, Sandra Olimpia*

*Laboratorio de Micro y Nanoencapsulación, Facultad de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

El presente trabajo documenta las actividades del Verano de la Ciencia, cuyo objetivo general fue el desarrollo de bio-aerogeles con extracto de café usado (SCG) para una posible aplicación cosmetológica. Debido a la complejidad estructural de los residuos de café, el proyecto se dividió metodológicamente en una fase de capacitación y una fase de investigación principal. La capacitación abarcó el aislamiento de proteína con harina de amaranto, pruebas de impresión 3D y la formulación exitosa de aerogeles modelo utilizando proteína de chícharo y goma xantana. Una vez estandarizadas las técnicas, se procedió a la investigación central: el desengrasado de SCG mediante Soxhlet por 24 horas y la extracción de compuestos polifenólicos asistida por sonotrodo. Los extractos obtenidos se analizaron determinando su capacidad antioxidante mediante el método de Folin-Ciocalteu y el ensayo DPPH, y se realizó el proceso para el aislamiento de la proteína de café. Los resultados mostraron una alta concentración de fenoles (hasta 192.18 mg de ácido gálico/g de muestra), aunque el ensayo DPPH presentó variaciones analíticas. Se concluye que la fase de capacitación metodológica fue fundamental para aplicar correctamente las técnicas al café, demostrando el alto potencial antioxidante del SCG para su futura encapsulación en bio-aerogeles cosméticos.

Palabras clave: Aerogeles, Antioxidantes, Cosméticos Extracción, Proteína, Residuos de Café Usado.

Abstract

This work documents the activities of the Summer of Science, whose general objective was the development of bio-aerogels with spent coffee grounds (SCG) extract for a possible cosmetic application. Due to the structural complexity of coffee residues, the project was methodologically divided into a training phase and a main research phase. The training covered protein isolation with amaranth flour, 3D printing tests, and the successful formulation of model aerogels using pea protein and xanthan gum. Once the techniques were standardized, the main research proceeded: SCG was defatted using Soxhlet for 24 hours, and polyphenolic compounds were extracted using a sonotrode. The obtained extracts were analyzed determining their antioxidant capacity through the Folin-Ciocalteu method and the DPPH assay, and the process for coffee protein isolation was performed. The results showed a high concentration of phenols (up to 192.18 mg of gallic acid/g of sample), although the DPPH assay presented analytical variations. It is concluded that the methodological training phase was fundamental to correctly apply the techniques to coffee, demonstrating the high antioxidant potential of SCG for its future encapsulation in cosmetic bio-aerogels.

Keywords: Aerogels, Antioxidants, Cosmetics, Extraction, Protein, Spent Coffee Grounds.

Introducción

El café es una bebida ampliamente consumida en el mundo, su preparación tradicional es mediante la percolación de agua caliente a través de los granos molidos, dichos granos quedan como residuos en el papel filtro donde fueron depositados. Estos residuos son conocidos como pocillos de café usados (SCG), se representan un desecho importante a nivel mundial. Sin embargo, estos pocillos contienen una fuente importante de compuestos bioactivos útiles con aplicaciones en los

sectores: agrónomo, por su valor como materia orgánica; bioenergético, al poder transformar el café en biodiésel de segunda generación por transesterificación; alimenticio, como saborizantes; y cosmetológico, por sus propiedades antioxidantes (Zhao et al., 2024).

Los residuos de café requieren ser tratados por diferentes procesos para poder aprovechar cada uno de estos compuestos, en este estudio se hará un acercamiento a la extracción de compuestos fenólicos asistida por sonotrodo.

Objetivo

Desarrollar bio-aerogeles con extracto de café usado (SCG) para una posible aplicación cosmetológica.

Objetivos específicos:

- Realizar una capacitación metodológica enfocada en el aislamiento de proteínas (usando amaranto) y la formulación de aerogeles modelo (usando proteína de chícharo y goma xantana) para estandarizar las técnicas.
- Desgrasar la biomasa de los residuos de café usado mediante un sistema Soxhlet.
- Extraer los compuestos fenólicos del café desgrasado mediante cavitación asistida por sonotrodo.
- Cuantificar la capacidad antioxidante de los extractos de café a través de los ensayos de Folin-Ciocalteu y DPPH.
- Aplicar las técnicas aprendidas para realizar el aislamiento de la proteína intrínseca del café usado.

Metodología

I. Capacitación Metodológica

Para adquirir destreza en la técnica de precipitación isoelectrica, se empleó harina de amaranto. Inicialmente, se tamizó (malla 100) y se sometió a un proceso de desengrasado con hexano en un matraz Erlenmeyer, manteniendo agitación constante durante 24 horas con el matraz sellado. Tras evaporar el solvente y aplicar un segundo tamizado (malla 60), se disolvieron 100 g de la harina tratada en 1 L de agua desionizada. La solubilización de las proteínas se logró ajustando el medio a un pH de 10.00 ± 0.05 con NaOH (1M y 0.1M). Esta mezcla se centrifugó a 9000 g por 20 minutos a 4 °C para separar la fracción insoluble (rica en carbohidratos). El sobrenadante recuperado se acidificó hasta un pH de 4.00 ± 0.05 usando HCl

(1M y 0.1M) para inducir la precipitación proteica, la cual se separó mediante una centrifugación final a 9000 g por 20 minutos a 25 °C. .

Se llevaron a cabo pruebas de extrusión para comprender la reología de tintas comestibles y calibrar el equipo. Se preparó puré de papa hidratado (relación 0.75:1 con agua) extruido a 30 °C, y chocolate temperado a 42 °C. El protocolo de operación consistió en cargar la biotinta, purgar la jeringa extrusora para evitar espacios de aire, calibrar los ejes del equipo (émbolo y extrusor) y ajustar los parámetros de impresión (velocidad y resolución) de acuerdo a la geometría seleccionada. Se preparó un hidrogel base mezclando goma xantana y proteína de amaranto en proporción 1:3. Tras homogeneizar, el pH se ajustó a 10.00 ± 0.05 con NaOH y la mezcla reposó por 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se incorporaron 500 µL de Glucono Delta-Lactona (GDL) mediante inyecciones sucesivas de 100 µL en distintos puntos de la matriz, agitando de forma envolvente hasta lograr una distribución uniforme sin zonas traslúcidas. Finalmente, estos hidrogeles se sometieron a liofilización y se almacenaron en un desecador, logrando su transformación en criogeles/aerogeles.

II. Desgrasado del Café Usado

La biomasa de café se introdujo en cápsulas de papel filtro genérico y se procesó en dos equipos Soxhlet simultáneos. Se sometió a reflujo continuo con hexano durante 24 horas para extraer exhaustivamente la fase lipídica. Al finalizar, el solvente se separó y recuperó empleando un rotaevaporador.

III. Extracción de Compuestos Polifenólicos

En un vaso de precipitados, se pesó 1 g del SCG previamente desengrasado, al cual se le adicionaron 50 mL de una solución de extracción hidroalcohólica (agua desionizada y etanol absoluto en proporción 1:1). La disrupción celular se favoreció mediante el uso de un sonotrodo operando al 30% de amplitud por 5 minutos, manteniendo el recipiente en un baño de hielo para prevenir sobrecalentamientos. Posteriormente, se mantuvo en agitación magnética a temperatura ambiente durante 30 minutos y se centrifugó a 4000 g por 10 minutos. El sobrenadante se reservó, mientras que la fase sólida residual se secó en un deshidratador

Excalibur a 40 °C por 12 horas. Todo este proceso de extracción se realizó por triplicado; los sobrenadantes resultantes se combinaron, se filtraron a través de una membrana de nitrato de celulosa de 0.45 µm y se almacenaron a 4 °C. Aprovechando la fase líquida residual recuperada de las extracciones previas, se indujo la solubilización ajustando el pH a 10.00 ± 0.05. Tras un proceso de centrifugación (9000g, 4 °C, 20 minutos), el sobrenadante se acidificó hasta su punto isoelectrico (pH 4.00 ± 0.05) para propiciar la precipitación proteica. Una centrifugación final (8759 g, 25 °C, 20 minutos) permitió recolectar el sólido, el cual fue sometido a liofilización para obtener la proteína aislada de café.

IV. Determinación de Fenoles Totales

La concentración fenólica del extracto se evaluó preparando el reactivo de Folin comercial diluido de 2N a 1N, una solución de carbonato de sodio al 7.5% (utilizando agua grado HPLC) y una solución estándar in situ de ácido gálico (0.1 mg/mL). En 9 viales ámbar, se mezclaron secuencialmente el estándar de calibración (o muestra), agua y el reactivo de Folin, conforme a los volúmenes indicados en la **Tabla 1**. Tras 5 minutos de sonicación, se incorporó el carbonato de sodio y se dejó reaccionar en completa oscuridad durante 2 horas. El análisis final se efectuó transfiriendo 250 µL de cada vial a una placa ELISA, de acuerdo a la distribución detallada en la **Figura 1**, y se leyó la absorbancia a 760 nm.

Tabla 1. Guía para curva de calibración para Reactivo de Folin

No. Tubo	Solución de Ácido Gálico (µL)	Agua (µL)	Reactivo de Folin (µL)	Solución de Carbonato de Sodio (µL)
Blanco	0	250	125	625
1	10	240	125	625
2	20	230	125	625
3	30	220	125	625
4	40	210	125	625

5	50	200	125	625
6	60	190	125	625
7	70	180	125	625
8	80	170	125	625

Figura 1. Configuración de Pocillos Placa ELISA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bo	Bo	Bo	8	8	8						
B	1	1	1	8	M	M						
C	2	2	2	8	C	C						
D	3	3	3	M								
E	4	4	4	M								
F	5	5	5	M								
G	6	6	6	C								
H	7	7	7									

Nota: Bo, blanco; 1-8, curva de calibración (ver **Tabla 1**); M, muestra; y C, control.

Se hizo lectura de la placa en un espectrofotómetro con los siguientes parámetros: Autocalibrar, no; Auto Lectura, no; Prioridad, columna; Longitud de Onda, 760 nm.

V. Capacidad Antioxidante

Para medir la capacidad de neutralización de radicales libres, se preparó a oscuras una solución stock de Trolox a 1 mM (2.5 mg en 10 mL de metanol absoluto). A partir de este stock, se formularon las soluciones estándar indicadas en la **Tabla 2**. De manera simultánea, la solución reactiva de DPPH se preparó disolviendo 1.5 mg en una mezcla de 20.5 mL de metanol y 4.5 mL de agua. Tras sonicar por 5 minutos, la solución se protegió en refrigeración. Finalmente, los estándares y muestras se colocaron en una placa ELISA siguiendo el diseño de la **Figura 2** y se leyó la absorbancia a 520 nm.

Tabla 2. Soluciones Estándar de Trolox

Concentración de Solución Estándar de Trolox (μM)	Solución Stock (μL)	Metanol (μL)
50	50	950
100	100	900
200	200	800
300	300	700
400	400	600
500	500	500
600	600	400
700	700	300
800	800	200

Figura 2. Configuración Placa Elisa para DPPH

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bo	Bo	Bo									
B	C	C	C									
C	0.5	0.5	0.5	6	6	6						
D	1	1	1	7	7	7						
E	2	2	2	8	8	8						
F	3	3	3	M ₁	M ₁	M ₁						
G	4	4	4	M ₂	M ₂	M ₂						
H	5	5	5	M ₃	M ₃	M ₃						

Nota: Bo, blanco; C, control; 0.5-8, curva de calibración (ver Tabla 2); M, muestra (número de muestra indicada por el subíndice).

VI. Aislamiento de Proteína de Café

A partir de la fase líquida residual obtenida en las extracciones previas, se indujo la solubilización ajustando el medio a un pH de 10.00 ± 0.05 . Esta mezcla se centrifugó a 9000 g durante 20 minutos a 4 °C; la fase sólida se separó y almacenó para análisis futuros, mientras que el sobrenadante fue recuperado. A continuación, este sobrenadante se acidificó hasta alcanzar un pH de 4.00 ± 0.05 para propiciar la precipitación proteica, sometiéndolo a una segunda centrifugación a 8759 g por 20 minutos a 25 °C. El sólido precipitado se separó del nuevo

sobrenadante y fue liofilizado para obtener finalmente la proteína de café aislada.

VII. Impresión 3D

Se llevaron a cabo ensayos de extrusión para evaluar la impresión tridimensional de tintas comestibles. Se empleó puré de papa hidratado (en proporción 0.75:1 con agua) extruido a 30 °C, así como chocolate temperado a 42 °C. El protocolo consistió en la preparación y carga cuidadosa de la biotinta en la jeringa extrusora, asegurando la ausencia total de burbujas de aire. Posteriormente, se ensambló en el equipo, se calibraron los ejes del émbolo y el extrusor, y se configuraron los parámetros de velocidad y calidad de impresión en función de la figura seleccionada.

VIII. Preparación de Hidrogeles

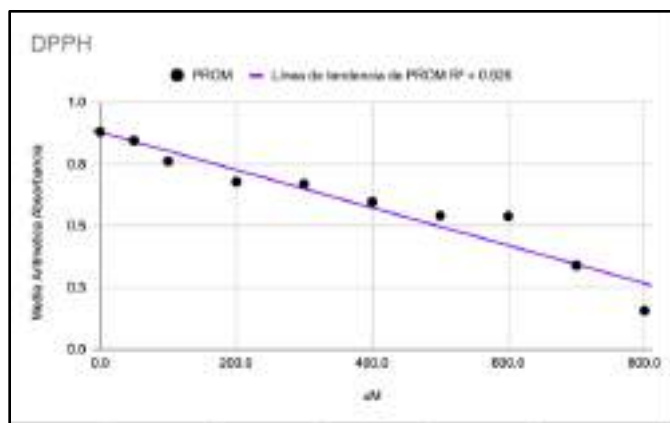
Para la creación de las matrices poliméricas, se preparó un hidrogel base mezclando goma xantana y proteína de amaranto utilizando una proporción de 1:3. La mezcla se homogeneizó, se ajustó a un pH de 10.00 ± 0.05 mediante la adición de NaOH y se dejó en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente. Transcurrido el periodo de reposo del hidrogel, se procedió a incorporar 500 μL de GDL. Esta adición se realizó de forma gradual en intervalos de 100 μL a través de tres puntos de inyección distintos, aplicando agitación hasta obtener una distribución completamente uniforme y eliminar cualquier zona traslúcida en la mezcla.

IX. Transformación de Hidrogeles en Criogeles

Finalmente, los hidrogeles consolidados se sometieron a un proceso de liofilización para extraer el agua. Los criogeles resultantes se trasladaron y almacenaron en el interior de un desecador para preservar su integridad estructural.

Resultados

Se obtuvieron del café desgrasado 32.3918 g y tras adicionar 1 g de este café al sonotrodo, se recuperaron ≈ 6.50 mL de compuestos fenólicos por cada 50 mL de solución, esto representa un 13% v/v cuando es comparado con la solución inicial. De la misma manera, se obtuvo la siguiente curva de calibración para Capacidad Antioxidante.



De Fenoles Totales, se obtuvo la siguiente curva de calibración.

En cuanto a la impresión 3D, se realizaron las siguientes figuras.



Y de los aerogeles se obtuvo lo siguiente:



Discusión y conclusiones

La complejidad intrínseca de la biomasa del café justificó plenamente la etapa de capacitación metodológica. Las proteínas del grano suelen polimerizarse con compuestos fenólicos mediante la reacción de Maillard, lo que dificulta significativamente su aislamiento directo. Al

estandarizar primero los principios de solubilización y liofilización en modelos más predecibles (amaranto y chícharo), se minimizaron los errores operativos durante el procesamiento real del SCG. En la fase de investigación principal, si bien la extracción hidroalcohólica asistida por sonotrodo demostró ser eficaz para recuperar polifenoles, su aplicación analítica presentó contratiempos. Durante la cuantificación inicial mediante el método de Folin-Ciocalteu, se observó que la alta proporción de etanol (1:1) en el solvente provocó la precipitación del carbonato de sodio, lo que impidió una lectura correcta en el espectrofotómetro. Solucionado este inconveniente técnico y adecuando el entorno de reacción, las concentraciones de equivalentes de ácido gálico detectadas confirmaron finalmente que los residuos desgrasados son una reserva bioactiva sumamente concentrada.

Conclusión: El proyecto logró sentar las bases tecnológicas para la formulación de bio-aerogeles cosméticos a partir de café usado. A pesar de los retos analíticos, como la incompatibilidad inicial del solvente etanol-agua con el carbonato en la prueba de Folin y la inestabilidad del ensayo DPPH, se validó el alto potencial antioxidante del SCG y se estandarizaron los protocolos de extracción y liofilización. La superación de estos obstáculos confirma la viabilidad de transformar este residuo agroindustrial en un ingrediente activo de alto valor para el desarrollo de innovaciones en cosmética circular.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente al Laboratorio de Micro y Nanoencapsulación, a la Facultad de Química y a la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindar sus instalaciones, equipos especializados y su continua asesoría, garantizando que tanto la fase formativa como la investigación principal del Verano de la Ciencia se desarrollaran con excelencia.

Referencias bibliográficas

Beaudor, M., Vauchel, P., Pradal, D., Aljawish, A., and Phalip, V., "Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method", *Chemical*

Engineering and Processing - Process Intensification, vol. 188, p. 109358, Jun. 2023.

Prior, R. L., Wu, X., and Schaich, K., "Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, pp. 4290-4302, 2005.

Valdés, A., Castro-Puyana, M., and Marina, M. L., "Isolation of proteins from spent coffee grounds. Polyphenol removal and peptide identification in the protein hydrolysates by RP-HPLC-ESI-Q-TOF", *Food Research International*, vol. 137, p. 109368, Nov. 2020.

Zhao, N., Liu, Z., Yu, T., and Yan, F., "Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries-A review", *Trends in Food Science & Technology*, vol. 143, p. 104312, Jan. 2024.

Evaluación de la precisión intermedia de un método para cuantificar Li

Victor Armando Dionisio Olamendi^{1*}, María Cristina Ávalos González¹, Carlos Hernández Rodríguez¹ y Adrián Sosa Domínguez^{1*}.

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, vdionisio03@alumnos.uaq.mx, adrian.sosa@uaq.mx

Resumen

En el presente proyecto de investigación en primer lugar se fabricó un electrodo selectivo de ión litio utilizando electrodos serigrafiados a los cuales se realizó una modificación con nanotubos de carbono de pared múltiple, lo anterior con el objetivo de mejorar la sensibilidad del electrodo en la detección y cuantificación de litio en muestras acuosas. Una vez desarrollado el electrodo de ión selectivo de litio se realizó la evaluación de la precisión intermedia del método electroanalítico potenciométrico empleado en la presente investigación.

La precisión intermedia se evalúa para conocer la capacidad del método electroanalítico para proporcionar resultados similares cuando se realizan mediciones dentro del mismo laboratorio, introduciendo variaciones normales en las condiciones del análisis. En el caso de este proyecto el parámetro que se modificó fue el analista y las mediciones se realizaron en diferentes días.

Para evaluar la precisión intermedia se realizaron seis réplicas de una muestra con una concentración de 1×10^{-4} M. Los resultados indicaron que el método electroanalítico propuesto es preciso evaluado a partir de la precisión intermedia mostrando un coeficiente de variación entre 2 % y 5 %. El estudio ANOVA indicó que el día y analista no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de Li^+ .

Palabras clave: electrodo selectivo de litio, precisión, precisión intermedia.

Abstract

In the present research project, a lithium ion-selective electrode was first fabricated using screen-printed electrodes, which were modified with multi-walled carbon nanotubes in order to improve the electrode sensitivity for the detection and quantification of lithium in aqueous samples. Once the lithium ion-selective electrode was developed, the intermediate precision of the potentiometric electroanalytical method used in this research was evaluated.

Intermediate precision was evaluated to determine the ability of the electroanalytical method to provide similar results when measurements are performed within the same laboratory while introducing normal variations in the analytical conditions. In this project, the parameters varied were the analyst and the measurement day.

To evaluate intermediate precision, six replicates of a sample with a concentration of 1×10^{-4} M were analyzed. The results indicated that the proposed electroanalytical method showed adequate precision based on the intermediate precision assessment, with a coefficient of variation ranging from 2% to 5%. The ANOVA results indicated that neither the measurement day nor the analyst had a statistically significant effect on the Li^+ concentration.

Keywords: lithium-selective electrode, precision, intermediate precision.

Introducción

El litio es un metal alcalino que tiene múltiples y beneficiosos usos: en el ámbito médico para tratar trastornos como la bipolaridad y la depresión, así como principalmente en componentes por el cual funcionan las baterías [1].

Entonces, se vuelve importante buscar una manera de cuantizar la cantidad de litio en sangre, y en una pila en su vida útil. Para ello se ha desarrollado una técnica electroquímica que permite, a través de un electrodo de ion selectivo, relacionar la cantidad de litio en solución en función del potencial medido[2].

El electrodo de ion selectivo está constituido por un electrodo serigrafiado, el cual es un electrodo de dimensiones pequeñas basado en carbono que tiene implementado un electrodo de trabajo, un contra electrodo de grafito y un pseudoelectrodo de referencia de plata [3]. En la **Fig. 1** se muestra el esquema de un electrodo serigrafiado como el utilizado en el proyecto.

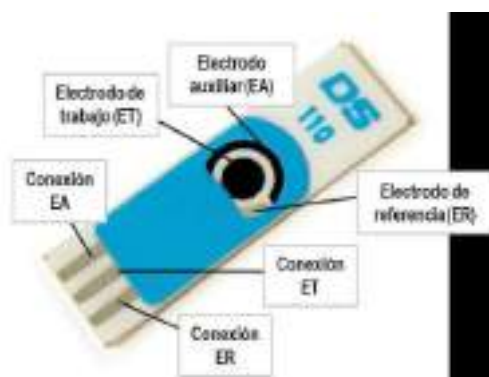


Fig. 1. Electrodo serigrafiado de carbono.

En el electrodo, sobre el ET (electrodo de trabajo) se depositó nanotubos de carbono de pared múltiple, que actúa como el “esqueleto” que inmoviliza y retiene los componentes químicos dentro de la membrana, la cual consta de 3 partes: el ionóforo, el plastificante y el aditivo lipofílico [4].

El ionóforo VI de litio, que es la membrana, es una molécula que tiene la capacidad de unirse de manera selectiva a iones litio (Li^+), separándolos de otros elementos, es aquí donde entra la parte selectiva puesto que sólo permite el paso de estos mismos hacia un sensor, el cual nos da una señal que podemos interpretar. El plastificante NPOE se utiliza para facilitar el trabajo con el material, al aumentar su manejabilidad [5].

El aditivo lipofílico (NaTPB) se disocia en el interior de la matriz de la membrana, disminuyendo la resistencia eléctrica y favoreciendo a que las mediciones del potencial salgan con menos ruido y más estables [6].

Al desarrollar el método electroanalítico, evaluar la precisión intermedia es esencial para comprobar que el voltaje realmente coincide con la concentración de litio conocida, y no de variaciones del montaje propio del electrodo, del potencióstato o de las condiciones experimentales. Así como conocer con certeza su

valor cuantitativo para aceptar o rechazar los valores propios obtenidos [7].

La Potenciometría es una técnica electroquímica que determina “la concentración de una especie química mediante la medición de un potencial cuando se llega a un equilibrio electroquímico establecido en la interfase electrodo-solución”. En el caso del litio, el potencial está relacionado a su actividad en la solución, y esto puede usarse para construir una curva de calibración [8].

Metodología

Preparación de soluciones patrón: Se prepararon una serie de soluciones de cloruro de litio de 0.05 M (solución madre) y se aplicó una dilución 1:10 seriadas hasta llegar a una concentración de 1×10^{-7} M con un total de 7 soluciones.

Medición del potencial: Se midieron cambios del potencial por segundo durante 300 s, se esperó a que el potencial se estabilizara lo que significa que llegue al equilibrio entre el litio en solución y el litio absorbido en la superficie. Se promediaron los valores de potencial de los últimos 60 s.

Se realizó seis veces la curva de calibración y se realizaron las mediciones de concentración del punto intermedio de la curva de calibración.

Resultados

En la **Fig. 2** se muestra la curva de calibración para la medición de litio correspondiente al analista A.

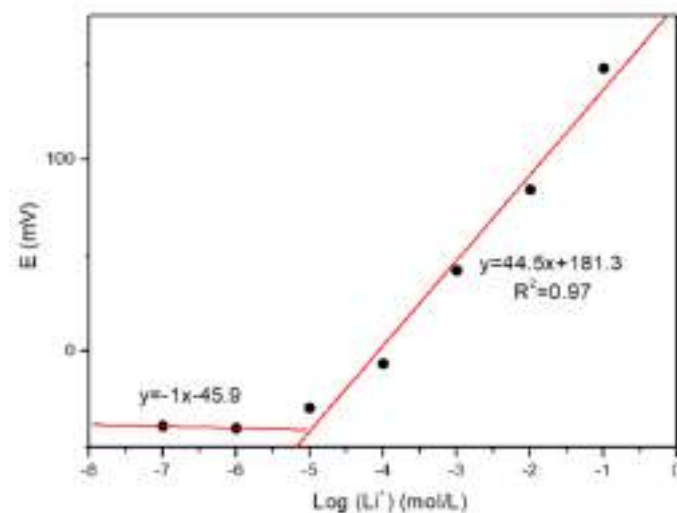


Fig. 2. Curva de calibración para la determinación de Litio en agua.

En la **Fig. 3** se muestra la curva de calibración para la medición de litio correspondiente al analista B.

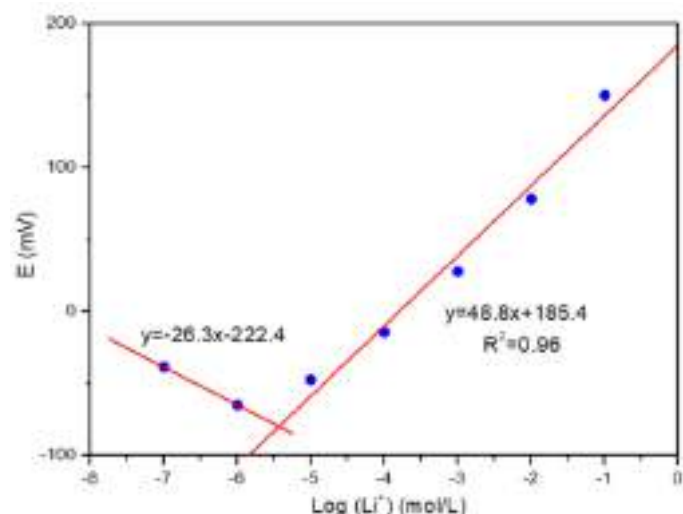


Fig. 3. Curva de calibración para la determinación de Litio en agua.

En la **Tabla 1** se muestran las concentraciones medidas de litio del analista A, tomando la concentración del punto intermedio de la curva de calibración de 1×10^{-4} M.

Tabla 1. Concentración medida de Litio en agua de analista A.

Réplica	Día 1	Día 2	Día 3
1	0.000105	0.000106	0.000101
2	0.000109	0.000108	0.000108
3	0.000110	0.000111	0.000106
4	0.000102	0.000100	0.000102
5	0.000103	0.000105	0.000106
6	0.000101	0.000102	0.000102

En la **Tabla 2** se muestran las concentraciones medidas de litio del analista B, tomando la concentración del punto intermedio de la curva de calibración de 1×10^{-4} M.

Tabla 2. Concentración medida de Litio en agua de analista B.

Réplica	Día 1	Día 2	Día 3
1	0.000104	0.000105	0.000101
2	0.000107	0.000109	0.000102
3	0.000104	0.000105	0.000105
4	0.000105	0.000102	0.000105
5	0.000101	0.000102	0.000104
6	0.000101	0.000101	0.000103

En la **Tabla 3** se muestra la media y el coeficiente de variación por analista y el global.

Tabla 3. Resultados por analista.

Analista	n	media	% CV
A	18	1.0483×10^{-4}	3.23
B	18	1.0367×10^{-4}	2.17
Total	36	1.0425×10^{-4}	2.76

En la **Tabla 4** se muestra la media y el coeficiente de variación por analista y por día.

Tabla 4. Resultados por día y analista.

Analista	Día	media	% CV
A	1	1.0500×10^{-4}	3.56
A	2	1.0533×10^{-4}	3.78
A	3	1.0417×10^{-4}	2.74
B	1	1.0367×10^{-4}	2.26
B	2	1.0400×10^{-4}	2.86
B	3	1.0333×10^{-4}	1.58

Se realizó un ANOVA de dos factores con interacción considerando Factor A: Analista, Factor B: Día, Interacción: Analista por Día y un nivel de significancia $\alpha=0.05$. Los resultados se muestran en la **Tabla 5**.

Fuente de variación	F	p
Analista	1.337	0.257
Día	0.282	0.756
Analista por Día	0.027	0.973

Discusión y Conclusiones

En la **Fig. 2** y **Fig. 3** se muestran las curvas de calibración realizadas por cada uno de los analistas respectivamente donde se puede observar que el coeficiente de determinación tuvo una variación indicando qué tan bien los datos experimentales se ajustaron al modelo de regresión.

La **Tabla 1** y la **Tabla 2** muestran las concentraciones medidas de litio por cada analista durante tres días diferentes mostrando poca variación entre las

determinaciones y entre los analistas lo cual podemos inferir que se trata de un método preciso.

En la **Tabla 3** se muestra un porcentaje de coeficiente de variación global de 2.76 % lo cual nos indica que el método electroanalítico propuesta para la medición de la concentración de litio es preciso.

En la **Tabla 4** se puede observar que los valores de las medias son muy cercanas entre sí y los coeficientes de variación se encuentran por debajo del 5 %, lo anterior nos indica que la precisión intermedia del método es adecuada.

De la **Tabla 5** se puede concluir que:

No existe diferencia estadísticamente significativa entre los analistas A y B.

No existe diferencia estadísticamente significativa entre los tres días.

No existe interacción estadísticamente significativa entre el analista y el día. Por lo tanto se pudo llevar a cabo la evaluación de la precisión intermedia del método electroanalítico.

Agradecimientos

Los autores de la presente proyecto de investigación agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro a través de los recursos FONFIVE por el apoyo brindado. También los autores agradecen a la organización del Verano de la Ciencia UAQ por el apoyo brindado para la realización de la estancia de investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] M. N. Sweilam, J. R. Varcoe, y C. Crean, «Fabrication and Optimization of Fiber-Based Lithium Sensor: A Step toward Wearable Sensors for Lithium Drug Monitoring in Interstitial Fluid», *ACS Sens.*, vol. 3, n.o 9, pp. 1802-1810, sep. 2018, doi: 10.1021/acssensors.8b00528.
- [2] T. Komatsu, M. Maeki, A. Ishida, H. Tani, y M. Tokeshi, «Paper-Based Device for the Facile Colorimetric Determination of Lithium Ions in Human Whole Blood», *ACS Sens.*, vol. 5, n.o 5, pp. 1287-1294, may 2020, doi: 10.1021/acssensors.9b02218.

- [3] A. Rohiman, H. Setiyanto, V. Saraswaty, y M. B. Amran, «Review of analytical techniques for the determination of lithium: From conventional to modern technique», *Moroc. J. Chem.*, vol. Vol. 11, p. Mor. J. Chem. 11 N°4 (2023) 979-1012 Pages, ago. 2023, doi: 10.48317/IMIST.PRSM/MORJCHEM-V11I04.40229.
- [4] I. A. Vitale, G. Selvolini, y G. Marrazza, «Smart Sensor for Lithium Detection: An Environmental Application», *Chemosensors*, vol. 11, n.o 2, p. 77, ene. 2023, doi: 10.3390/chemosensors11020077.
- [5] M. Molinara et al., «A Deep Learning Approach to Organic Pollutants Classification Using Voltammetry», *Sensors*, vol. 22, n.o 20, p. 8032, oct. 2022, doi: 10.3390/s22208032.
- [6] A. L. Suherman et al., «Electrochemical Detection and Quantification of Lithium Ions in Authentic Human Saliva Using LiMn 2 O 4 -Modified Electrodes», *ACS Sens.*, vol. 4, n.o 9, pp. 2497-2506, sep. 2019, doi: 10.1021/acssensors.9b01176.
- [7] F. Criscuolo, I. Taurino, S. Carrara, y G. D. Micheli, «A novel electrochemical sensor for non-invasive monitoring of lithium levels in mood disorders», presentado en 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, jul. 2018, pp. 3825-3828. doi: 10.1109/EMBC.2018.8513315.
- [8] Y. Umezawa, P. Bühlmann, K. Umezawa, K. Tohda, y S. Amemiya, «Potentiometric Selectivity Coefficients of Ion-Selective Electrodes. Part I. Inorganic Cations (Technical Report)», *Pure Appl. Chem.*, vol. 72, n.o 10, pp. 1851-2082, ene. 2000, doi: 10.1351/pac200072101851.

Política de dividendos y diversidad en consejos de administración

Marieli Moyado Lino.
mmoyado23@alumnos.uaq.mx

Beatriz Rosas Rodríguez.
beatriz.rosas@uaq.mx

Abstract

Women's participation in the corporate context has been a minority due to socio-cultural factors in our country and throughout history in general. However, many studies have confirmed that mixed-gender voting in decision-making carries intrinsic potential for enhancing corporate performance, as it is proven that both men and women possess distinct characteristics that improve a company's potential. Therefore, the objective of this research is to evaluate how women's participation on a board of directors positively affects a dividend payout policy. Fourteen companies listed on the BMV (Mexican Stock Exchange) under the "Consumer Staples" category was evaluated, and the proposed hypothesis was tested through the collection of various data points. The results were divided into two categories: companies with active and inactive dividend policies, for which comparative analyses were conducted to prove these effects. In conclusion, large companies have not prioritized mixed-gender decision-making, thereby missing out on major benefits that could boost their short- and long-term growth.

Keywords: women, dividend, board of directors, information asymmetry, liquidity, leverage, leadership, overconfidence.

Resumen

La participación de las mujeres en el contexto empresarial, ha sido una minoría debido a efectos

socio-culturales en nuestro país y en la historia en general. Sin embargo, diversos estudios han confirmado que el voto mixto en la toma de decisiones tiene un potencial intrínseco con la mejoría del potencial en el corporativo, esto porque se comprueba que tanto hombres como mujeres poseen características distintas que mejoran el potencial del corporativo. Por ello, el objetivo de esta investigación será evaluar cómo la participación de las mujeres en un consejo de administración tiene efectos positivos en una política de pago de dividendos. Fueron evaluadas 14 empresas que cotizan en la BMV de la categoría de “Consumo frecuente” en el cual, por medio de la recopilación de diversos datos, se evaluó la hipótesis planteada. Los resultados se dividieron en dos categorías: empresas con política activa e inactiva de dividendos, para las cuales se hicieron comparativos que comprueban los efectos. En conclusión, grandes empresas no han priorizado la toma de decisiones con presencia mixta perdiendo grandes efectos que podrían potenciar su crecimiento a corto y largo plazo.

Palabras clave: Mujeres, dividendo, consejo de administración, asimetría de la información, liquidez, apalancamiento, liderazgo, exceso de confianza.

Introducción

Para los mercados financieros, no funciona la premisa de evaluar por la intención del empresario, sino por las señales que éstos envían. La tendencia de los últimos años, ha demostrado que la política del pago de dividendos muestra la salud de una empresa y cuida del flujo de efectivo, ya que, una política inactiva podría afectar negativamente al accionista. En este artículo, se presenta la relación de un consejo de administración de género diverso con la política del pago de dividendos *sustentado en la “Teoría de la Agencia” y la “Teoría de la señalización”. (Ye et al., 2019)

En contexto, el pago de dividendos es un monto sobre las ganancias netas de una empresa que se destina a la retribución del accionista, mediante una política que estructura cuánto y cómo se pagará. El

pago de dividendos refuerza la confianza de la gerencia debido a diversos factores, que repercuten en el riesgo que conlleva la toma de decisiones. Por ejemplo: el género del presidente, la comunicación entre hombres y mujeres o incluso el estilo de liderazgo, entre otros. Esto permite conocer cómo la diversidad de la mesa directiva influye de forma directa en la transparencia que hay en la información, posicionando a las mujeres en un factor que mitiga los problemas y mejora las decisiones sobre el capital.

Los dividendos funcionan como señales que se envían al mercado en el que los gerentes cuentan con la información más precisa que el mercado en sí. En efecto, el pago de dividendos con una política activa, indica que los gerentes confían en la rentabilidad y flujo de efectivo en la empresa, que resulta en la revaloración del precio de la acción ante el mercado (Ye et al., 2019).

Existe una teoría encabezada por Michael Spence en 1973, que establece que dentro del mercado de trabajo existe una “señalización” como el acto en el cual, los miembros de un ambiente laboral a fin de destacar, tienden a simular tener amplio conocimiento sobre un tópico, por medio de la imitación u otros mecanismos para que la distinción de la información correcta no resulte clara (Spence, 1976). La teoría se centra en situaciones de asimetría de información que se entiende como “El atributo de individuos en un mercado que, por diseño o accidente, altera las creencias de otros individuos en el mercado o les transmiten información” (Spence, 1974)

Para determinar si el liderazgo femenino está influyendo en la toma de decisiones: la señalización, es utilizada en un ambiente de negocios con el fin de esclarecer información más detallada ante el mercado y que no sea posible analizarla de manera transparente. Esto argumenta, que el consejo cuenta con la solidez y confianza de financiar proyectos futuros, porque los líderes tienen mayor conocimiento del estado de la empresa que los demás. En cambio, si los *outsiders* no cuentan con el conocimiento pertinente de la organización, origina una *asimetría de la*

información, de manera que el mercado termina por infravalorar el precio por acción. A consecuencia de, se protege esta *asimetría de la información*, mediante una política activa de dividendos que proyecta una buena liquidez y solidez financiera. Es ahí donde se realza la credibilidad ante el mercado, que desencadena una nueva valoración del precio por acción, y revela el verdadero valor al inversionista.

En este sentido, la “Teoría de la agencia” muestra el problema del principal-agente en la cual, el agente toma decisiones en nombre de la parte principal en contextos de *información asimétrica*. Dentro del sector corporativo se origina cuando los administradores persiguen intereses propios ajenos al del accionista, estableciendo que existe un diferencial de información, por ello, se busca asegurar la lealtad del administrador, a cambio de una compensación justa. Asimismo, se demuestra que el pago de dividendos mitiga el conflicto de agencia entre gerentes y accionistas, ya que la reducción en la disponibilidad de flujo de caja libre limita a los gerentes administradores de invertir en proyectos con VAN (Valor Actual Neto) negativo o llamados también *de inversión marginal subóptima*, ósea que la asignación del recurso ofrece una rentabilidad menor a la esperada (Jensen y Meckling, 1976; Grossman y Hart, 1988; Jensen, 1986). Por lo tanto, las restricciones sobre los fondos internos mitigan el riesgo de sobreinversión en proyectos que sirven a los intereses de la gerencia y mejoran el valor para los accionistas. No obstante, la gerencia tiene conocimiento de su independencia y al no tener el control o supervisión de los involucrados, se tiende a compensar con sistematización burocrática y procesos de control jerárquicos que pueden distorsionar la toma de decisiones, o incluso, gozar de salarios excesivos y consumo de beneficios por parte de los internos (Ye et al., 2019; Abdullah., 2022)

Posterior a haber profundizado sobre la señalización y la asimetría de la información, es oportuno afirmar que dentro del consejo se originan *problemas de agencia*, comunes en la gobernanza corporativa. La gobernanza corporativa es un tema

que representa el origen de problemas en la toma de decisiones debido a el interés personal de cada uno de los miembros que lo conforman. Por naturaleza, las mujeres poseen la característica de tener menor aversión al riesgo, pero evitan grandes pérdidas, además de que tienden a desempeñar de mejor manera la resolución de problemas en equipo, por lo que sus habilidades de comunicación y gestión de equipos son excelentes. Las mujeres tienden a ver el mundo más cooperativo y no competitivo, por lo que mejora la visión altruista en la toma de decisiones y mitiga los deseos personales de los administradores. En cambio, los hombres toman mayores decisiones de riesgo, pero en contraste, la sobre confianza que llegan a presentar puede influir en tomar decisiones de inversión más agresivas, sobreestimación de sus capacidades o de la empresa y, por ende, menor disposición a “guardar” efectivo por medio de una política de dividendos. Los hombres a diferencia de las mujeres tienden a incumplir políticas, reglas o normas establecidas con tal de cumplir con sus expectativas, mientras que las mujeres son más alineadas a visiones de largo plazo y políticas confiables. (Peni, 2012)

Por otro lado, las diferencias de género en la administración implícito en la toma de decisiones, conlleva diversos estilos de liderazgo, aversión al riesgo, mejora de la comunicación y pensamiento ético (Peni, 2012; Abdullah, 2022). La presencia femenina en la toma de decisiones dentro del consejo de administración; incrementa las probabilidades de decisión respecto al pago de dividendos, alineándose con la “Teoría de la Agencia”, dada la devolución del efectivo excedente a los accionistas. Dicha decisión brinda mayor credibilidad, contrarrestando el *overconfidence* entendido como la confianza excesiva de la toma decisiones, particularmente en el género masculino (Peni., 2014). Al existir una variabilidad de opiniones con mujeres dentro del consejo, facilitará el retorno de inversión buscado. Este efecto fue observado en las variables de Q Tobin y ROA en las correlaciones, donde se muestra dicha relación directa (Peni, 2014), que tiene un efecto positivo para la toma de decisiones con un miembro femenino dentro del consejo de

administración, porque incrementa la probabilidad de la decisión del pago dividendos, así como de la distribución de efectivo. A pesar que las mujeres sean más reacias según las estadísticas al riesgo, tienen tendencias de mejor liderazgo, mayor sensibilidad y buena toma de decisiones orientados a la excelente comunicación para trabajos en equipo (Abdullah, 2016).

Metodología

H: La investigación plantea una hipótesis que dio evidencia suficiente de que la presencia de mujeres en el consejo de administración, promueve el pago de dividendos.

Dada la explicación concreta de la hipótesis, la totalidad de los datos fueron recopilados de los informes anuales de empresas de consumo frecuente en México, publicados en el sitio web oficial de la Comisión Nacional Bancaria y de Valores (CNBV) de los años 2020 al 2024, con claves de la Bolsa Mexicana y de Valores (BMV). Por otra parte, una vez creada la base datos se analizó y comprobó la hipótesis en el programa estadístico “Stata”.

Por medio del método de regresión logit, incluyendo la variable dependiente política de dividendos y variables independientes tales como: género del presidente en variables *Dummy*, porcentaje de mujeres en el consejo, porcentaje de independencia en el consejo, porcentajes de apalancamiento, liquidez, crecimiento y tangibilidad.

Para la muestra se analizaron 14 empresas de la categoría de Consumo frecuente, en las que se utilizaron 8 variables numéricas y porcentuales para cada una de las empresas por cada año en el lapso de tiempo mencionado (2020-2024), las cuales, fueron organizadas en Excel para realizar una base de datos previa a la de Stata.

En este sentido, para cada una de estas variables se realizó su cálculo. Primero, tenemos a las variables *Dummy* que representan si hubo política activa de dividendos, además de si se pagó a los accionistas (1) o no (0). Posteriormente, el tamaño que es el

número de miembros del consejo, el porcentaje de mujeres en el consejo evaluado del conteo los miembros femeninos en el consejo de administración, respecto al total de miembros del consejo; así como el porcentaje de independencia del consejo, como el porcentaje para aquellos miembros quienes no cuenten con otro papel dentro de la administración, respecto al total de miembros. Por otro lado, porcentaje de apalancamiento dado por la deuda total entre activos totales, liquidez resultada del activo corriente entre pasivo corriente, crecimiento dado de las ventas del año evaluado menos ventas del año anterior entre ventas del año anterior, y, por último, tangibilidad como activo fijo entre total de activo.

Ecuación 1:

$$\log \frac{\text{pagadero}}{1-\text{pagadero}} = \beta_0 + \beta_1 \text{tamaño} + \beta_2 \text{apalanc_porc} + \beta_3 \text{tangib_porc} + \beta_4 \text{crec_porc} + \beta_5 \text{liq_porc} + \beta_6 \text{ind_porc} + \beta_7 \text{mujeres_porc} + \beta_8 \text{año} + u$$

La variable Y es la probabilidad de pagar dividendos respecto a la de no pagar dividendos. Que es uno en caso afirmativo y cero en caso negativo. Las variables independientes representan el número de miembros, apalancamiento, tangibilidad, crecimiento, liquidez, independencia de los administradores, cantidad de mujeres en el consejo y, por último, analizando los años de referencia en el análisis que fueron 2020 y 2024

Resultados

Tabla 1.0 Comparativo de variables estadísticas para empresas que si pagan dividendos.

Variable	2020		2024	
	MEDIA	DESVIACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN
Tamaño	2.589758	0.3086268	6.621994	0.2650521
Apalancamiento	56	74.78116	32.8	28.54548
Tangibilidad	110.1	102.7937	43.8	23.83648
Crecimiento	20.2	28.55716	5.5	16.19499
Liquidez	133.2	65.0808	3778.6	10528.49
Pagadero	1	0	1	0
Porc. Independientes	45.9	25.56234	47.2	16.31496
Porc. Mujeres	16.2	7.656515	22.9	11.55133

Tabla 2 Comparativo de variables estadísticas para empresas que no pagan dividendos.

Variable	2020		2024	
	MEDIA	DESVIACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN
Tamaño	2.593623	0.1562312	2.644821	0.1753858
Apalancamiento	25.25	21.42234	32	21.46315
Tangibilidad	47.25	74.6609	58	12.49
Crecimiento	1.25	16.41899	6.5	10.47219
Liquidez	202	135.3785	145.75	90.04952
Pagadero	0	0	0	0
Porc. Independientes	52.25	22.02082	51.5	23.85372
Porc. Mujeres	10.75	8.732125	13.75	5.619905

Es notable el crecimiento asociado al consejo de administración con mayor porcentaje de mujeres para empresas que sí pagan contra las que no. Esto se refleja en la media y desviación estándar del porcentaje de mujeres y un efecto en la reducción del apalancamiento.

Específicamente, el porcentaje de mujeres en 2020 para las empresas que sí pagan dividendos fue de 16.2 contra 10.75 del mismo año para las que no pagaron dividendos, tuvieron efectos distintos según su política de pago de dividendos para el año 2024 con 22.9 para la política de sí pagan dividendos y 13.75 para la política que no paga dividendos, donde se muestra claramente que sí hubo relación donde hay mayor porcentaje de mujeres en la toma de decisiones. Por otro lado, el apalancamiento tuvo una disminución de 56 a 32.8 para la política activa de dividendos, mientras que la política inactiva, por el contrario, tuvo un aumento de 25.25 a 32.

Tabla 3. Resultados de regresión LOGIT, programa Stata. (CNBV, 2026).

Variable	Resultados regresión logit		P - value
	Coefficiente	Probabilidad	
Tamaño	-0.5612	0.5705	0.82
Apalancamiento	0.0270	1.0274	0.218
Tangibilidad	0.0021	1.0021	0.841
Crecimiento	0.0495	1.0508	0.049
Liquidez	0.0001	1.0001	0.027
Porc. Independientes	-0.0037	0.9962	0.875
Porc. Mujeres	0.1306	1.1395	0.034

Se tienen únicamente tres variables significativas al 5%:

- Crecimiento
- Liquidez
- Porcentaje de mujeres

Ésta tabla muestra el efecto de que, por cada unidad de crecimiento, las probabilidades de brindar pago de dividendos aumentan en un 5.08%. Además de

la liquidez que, aunque parezca de muy bajo porcentaje 0.0001%, las medidas de millones de pesos descritas en los reportes anuales por empresa, siguen representando grandes cantidades para estos corporativos. Por último, el porcentaje de mujeres en el consejo que representa un 13.95%, muestra que por cada unidad porcentual de presencia de mujeres en el consejo, aumenta un 14% la probabilidad de pago de dividendos. Las demás variables no tienen significancia estadísticamente relevante con el objetivo de esta investigación respecto a pagar o no pagar dividendos.

La evidencia en la estadística descriptiva como en la regresión múltiple, es consistente con la hipótesis: la representación femenina en el consejo es positiva y significativamente asociada con la probabilidad de pago de dividendos, incluso después de controlar por tamaño, apalancamiento, tangibilidad, crecimiento, liquidez, independencia del consejo y efectos de año 2020 contra 2024.

Por ende, los dividendos efectivamente tienen un efecto positivo en la confianza de los inversionistas, esto debido a que se presenta una mayor confianza en la información contable (como dividendos), es por ello, que la presencia de mujeres en el consejo eleva la probabilidad de brindar un pago de dividendos y con ello, elevar el prestigio de la empresa a los inversionistas interesados.

Conclusiones

Las mujeres a diferencia de los hombres, poseen una mejor visión en políticas de largo plazo, confiables y con menor aversión al riesgo. Su cooperatividad influye directamente en el trabajo en equipo, en sus grandes habilidades de gestión de equipos, y preferencia en la reinversión del flujo de efectivo del corporativo. Estas características, son muestra de que hay mayor probabilidad de que exista una política de dividendos, que ayude a reinvertir las ganancias en proyectos más estructurados con visión a largo plazo. En conclusión, la investigación muestra la relación directa entre el efecto de pagar y no pagar dividendos, además de ver una probabilidad más

alta cuando la presencia de mujeres en el consejo de administración es mayor.

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Contaduría y Administración por brindar espacios a los estudiantes que quieren comenzar en la investigación; especialmente a la Dra. Beatriz Rosas quien me brindó el espacio en este Verano de la Ciencia UAQ 2026. También agradezco a Mayela que estuvo para apoyarme durante mi investigación, a mi familia especialmente a mi mamá que siempre me abre puertas, a mi novio y mis amigos.

Referencias

Abdullah et al (2025). Dividend policy and firmvalue: evidence of financial firms from Borsa Istanbul under the IFRS adoption. *Journal Of Financial Reporting And Accounting*, 23(1), 350-370.

Comisión Nacional Bancaria y de Valores (2026). *Consulta de Información de las Emisoras*. <https://www.gob.mx/cnbv/acciones-y-programas/consulta-de-informacion-de-las-emisoras-stiv-2>

Peni, E. (2012). CEO and Chairperson characteristics and firm performance. *Springer Science+Business Media*. <https://doi.org/10.1007/s10997-012-9224-7>

Ye Et Al. (2025). Does board gender diversity increase dividend payouts? Analysis of global evidence. *Journal Of Corporate Finance*. <https://www.elsevier.com/locate/jcorpfin> 1-26

Nanoesferas proteína-polisacárido transportadoras de calcio en ratas OVX

Saúl Guzmán Rodríguez¹, Isela Rojas Molina², Alexa Janine Arredondo Villacaña³, Mariana Arredondo Soto⁴

¹ Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro 76017, Querétaro, México. Datos de contacto: sguzman31@alumnos.uaq.mx

² Laboratorio de Investigación Química y Farmacológica de Productos Naturales, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro 76017, Querétaro, México. Datos de contacto: jirojasmolina@gmail.com

³ Ingeniería en Biotecnología. Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro 76017, Querétaro, México. Datos de contacto: aarredondo18@alumnos.uaq.mx

⁴ Ingeniería en Biotecnología. Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Santiago de Querétaro 76017, Querétaro, México. Datos de contacto: marredondo13@alumnos.uaq.mx

Resumen

La osteoporosis asociada con la deficiencia de estrógenos se caracteriza por el deterioro de la microarquitectura ósea y un mayor riesgo de fractura. Los sistemas nanoestructurados proteína-polisacárido representan una alternativa potencial para mejorar el aprovechamiento del calcio. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de formulaciones de lactosuero combinadas con mucílago de *Opuntia ficus-indica* o xiloglucano de *Tamarindus indica* sobre la microarquitectura del fémur de ratas ovariectomizadas. La evaluación se realizó mediante microscopía electrónica de barrido y análisis histomorfométrico, determinando grosor cortical (Ct.Th), grosor trabecular (Tb.Th) y separación trabecular (Tb.Sp). La ovariectomía produjo adelgazamiento cortical y trabecular, aumento de Tb.Sp y pérdida de conectividad. Entre

los tratamientos, el sistema nanoestructurado lactosuero-mucílago-calcio (LMCC) mostró la mejor conservación global de la microarquitectura. En el sistema con xiloglucano, la mezcla física lactosuero-xiloglucano (LXMix) presentó mayor Ct.Th que la formulación nanoestructurada correspondiente (LXCC), lo que indica que la nanoestructuración no mejoró todos los parámetros evaluados. Se concluye que LMCC atenuó con mayor eficacia el deterioro óseo inducido por la deficiencia de estrógenos.

Palabras clave: osteoporosis, ovariectomía, microarquitectura ósea, morfohistometría, microscopía electrónica de barrido, nanoestructuras, calcio.

Summary

Estrogen deficiency-associated osteoporosis is characterized by deterioration of bone microarchitecture and an increased risk of fracture. Protein-polysaccharide nanostructured systems represent a potential strategy to improve calcium utilization. This study evaluated the effects of whey protein formulations combined with *Opuntia ficus-indica* mucilage or *Tamarindus indica* xyloglucan on femoral microarchitecture in ovariectomized rats. Scanning electron microscopy and histomorphometric analysis were used to determine cortical thickness (Ct.Th), trabecular thickness (Tb.Th), and trabecular separation (Tb.Sp). Ovariectomy induced cortical and trabecular thinning, increased Tb.Sp, and loss of trabecular connectivity. Among the treatments, the whey protein-mucilage-calcium nanostructured system (LMCC) showed the best overall preservation of femoral microarchitecture. In the xyloglucan system, the physical mixture (LXMix) showed greater Ct.Th than the corresponding nanostructured formulation (LXCC), indicating that nanostructuring did not improve all evaluated parameters. LMCC was the most effective formulation for attenuating estrogen deficiency-induced bone deterioration.

Keywords: osteoporosis; ovariectomy; bone microarchitecture; histomorphometry; scanning electron microscopy; nanostructures; calcium.

Introducción

El calcio es esencial para la estructura y resistencia del tejido óseo. Aproximadamente 99 % del calcio corporal se localiza en el esqueleto, principalmente en forma de hidroxapatita, donde participa en la mineralización y contribuye a la integridad mecánica del hueso [1].

Durante la menopausia, la disminución de estrógenos altera el equilibrio entre la formación y la resorción ósea. Esto favorece la pérdida de masa y el deterioro de la microarquitectura, características de la osteoporosis que incrementan la fragilidad y el riesgo de fractura [2].

Aunque la suplementación con calcio y vitamina D se utiliza para prevenir la pérdida ósea, el aprovechamiento del calcio proveniente de suplementos convencionales puede ser limitado. Además, algunos tratamientos farmacológicos se han asociado con efectos adversos. Por ello, existe interés en desarrollar sistemas que favorezcan el transporte y la utilización biológica de este mineral [3].

Los biopolímeros naturales son materiales de interés para obtener sistemas micro y nanoestructurados por su biodegradabilidad, biocompatibilidad y capacidad para proteger compuestos incorporados en su matriz [4]. Entre ellos se encuentran el mucílago de *Opuntia ficus-indica* y el xiloglucano de *Tamarindus indica*, que pueden combinarse con proteínas del lactosuero para formar sistemas transportadores de calcio.

La calidad del hueso no depende únicamente de su densidad mineral, sino también de su organización estructural. El grosor cortical (Ct.Th), el grosor trabecular (Tb.Th) y la separación trabecular (Tb.Sp) permiten identificar cambios asociados con la pérdida o preservación de la microarquitectura ósea [5]. La microscopía electrónica de barrido, complementada con el análisis histomorfométrico, proporciona información cualitativa y cuantitativa sobre estas características [6].

Objetivo

Evaluar el efecto de formulaciones de lactosuero combinadas con mucílago o xiloglucano, administradas como mezclas físicas o sistemas nanoestructurados transportadores de calcio, sobre la microarquitectura femoral de ratas ovariectomizadas.

Metodología

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizaron ratas hembra Wistar adultas sometidas a ovariectomía bilateral como modelo experimental de osteoporosis asociada con la deficiencia de estrógenos. El grupo SHAM fue sometido a una cirugía simulada y permaneció sin deficiencia estrogénica. El cuidado y manejo de los animales se realizó conforme a las especificaciones de la NOM-062-ZOO-1999 [7].

Los animales se distribuyeron en diez grupos experimentales: dieta control AIN-93M (Ctrl), citrato de calcio (CCa), mezcla física de lactosuero–xiloglucano (LXMix), sistema nanoestructurado de lactosuero–xiloglucano–calcio (LXCC), xiloglucano de *Tamarindus indica* (XLG), lactosuero (Whey), mezcla física de lactosuero–mucílago (LMMix), sistema nanoestructurado de lactosuero–mucílago–calcio (LMCC), mucílago de *Opuntia ficus-indica* (MOF) y grupo SHAM. Las estructuras proteína–polisacárido se obtuvieron mediante coacervación compleja y ultrasonificación. Las dietas experimentales se administraron durante 12 semanas y su contenido de calcio se ajustó a 5 g/kg de dieta. Las formulaciones incluyeron los biopolímeros individuales, sus mezclas físicas y los sistemas nanoestructurados correspondientes, con la finalidad de comparar el efecto de la organización estructural de sus componentes.

Preparación de las muestras óseas

Al finalizar el periodo experimental, los fémures fueron recuperados y acondicionados para el análisis de su microarquitectura. Las muestras se sometieron al pretratamiento requerido para

eliminar tejidos blandos, conservar la estructura ósea y obtener superficies adecuadas para su observación. Posteriormente, se prepararon las regiones cortical y trabecular del hueso femoral para su análisis mediante microscopía electrónica de barrido, de acuerdo con la metodología descrita por Hernández-Becerra et al. [8]

Microscopía electrónica de barrido y análisis histomorfométrico

El análisis histomorfométrico incluyó la medición del grosor cortical (Ct.Th), grosor trabecular (Tb.Th) y separación trabecular (Tb.Sp). Las imágenes empleadas para determinar Ct.Th y Tb.Sp se adquirieron a 50×, con una barra de escala de 500 µm. Las micrografías utilizadas para cuantificar Tb.Th se obtuvieron a 85×, con una barra de escala de 200 µm. Estos parámetros permitieron realizar una valoración cuantitativa de los cambios inducidos por la ovariectomía y del grado de conservación de la microarquitectura producido por cada tratamiento [8], [9].

Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar, considerando ocho muestras por grupo. Las diferencias entre los tratamientos se determinaron mediante análisis de varianza de una vía, seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando $p < 0.05$. Las letras distintas asignadas a las medias indicaron diferencia significativa entre los grupos experimentales.

Resultados y Discusión

Microarquitectura femoral: análisis por SEM e histomorfometría

La microscopía electrónica de barrido (SEM) mostró diferencias evidentes en la microarquitectura femoral de los grupos experimentales (Figura 1). En el grupo Ctrl, la

ovariectomía produjo adelgazamiento cortical y trabecular, mayor separación entre las trabéculas y pérdida de conectividad en comparación con el grupo SHAM. Estas observaciones cualitativas coincidieron con el análisis histomorfométrico (Figura 2), que mostró disminución del grosor cortical (Ct.Th) y del grosor trabecular (Tb.Th), así como incremento de la separación trabecular (Tb.Sp), confirmando el deterioro óseo asociado con la deficiencia de estrógenos.

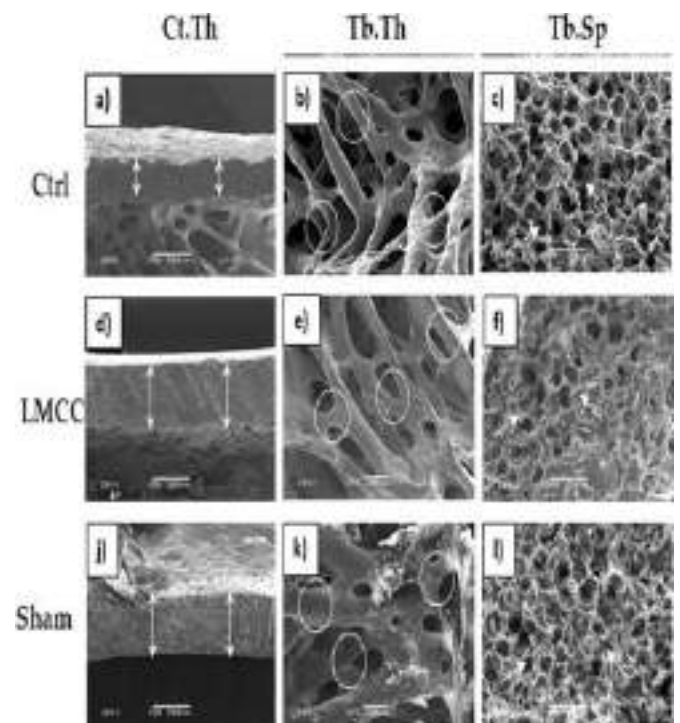


Figura 1. Micrografías representativas obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido del hueso femoral de los grupos Ctrl, LMCC y SHAM. Se muestran el grosor cortical (Ct.Th), grosor trabecular (Tb.Th) y separación trabecular (Tb.Sp). Las imágenes de Ct.Th y Tb.Sp se obtuvieron a 50×, y las de Tb.Th a 85×.

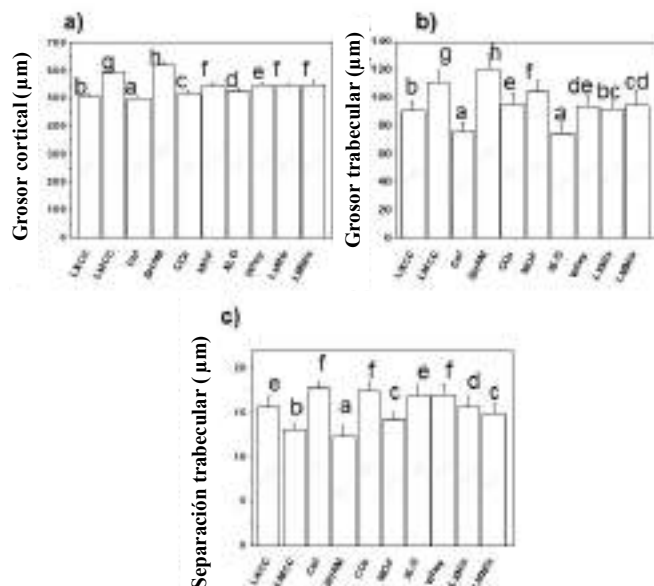


Figura 2. Evaluación histomorfométrica de la microarquitectura femoral de ratas ovariectomizadas: a) grosor cortical (Ct.Th), b) grosor trabecular (Tb.Th) y c) separación trabecular (Tb.Sp). Los datos se expresan como media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los grupos, de acuerdo con ANOVA de una vía y prueba de Tukey, $p < 0.05$.

Entre los tratamientos evaluados, LMCC presentó la mejor conservación global de la microarquitectura entre los grupos ovariectomizados. En las micrografías de SEM se observaron trabéculas más gruesas y continuas, menor separación entre ellas y mejor preservación del hueso cortical (Figura 1). Estos hallazgos fueron consistentes con los valores de Ct.Th, Tb.Th y Tb.Sp obtenidos mediante el análisis histomorfométrico (Figura 2). No obstante, las características del grupo LMCC permanecieron por debajo de las observadas en el grupo SHAM, lo que indica que el tratamiento atenuó, pero no revirtió completamente, el deterioro inducido por la ovariectomía.

La respuesta también dependió del tipo de polisacárido y de la forma de organización de la formulación. En el sistema con xiloglucano, LXMix presentó mayor Ct.Th que LXCC, como se observa en la Figura 2a, por lo que la nanoestructuración no produjo una ventaja uniforme en todos los parámetros histomorfométricos. Este resultado sugiere que la formación de nanoestructuras no garantiza por sí

misma una mayor eficacia biológica, sino que esta puede depender de las interacciones específicas entre la proteína, el polisacárido y el calcio [4].

La preservación de Ct.Th es relevante porque una reducción del grosor cortical incrementa la concentración de esfuerzos y la susceptibilidad del fémur a la falla estructural [11]. Asimismo, una mayor Tb.Th y una menor Tb.Sp reflejan una red trabecular mejor conservada, capaz de contribuir a la resistencia del tejido óseo.

Los tratamientos con ingredientes individuales mostraron una preservación parcial de la arquitectura cortical y trabecular, mientras que las mezclas físicas produjeron respuestas intermedias. En contraste, LMCC presentó la conservación estructural más consistente entre los animales ovariectomizados. Este efecto podría relacionarse con la organización de los componentes dentro de la matriz proteína-polisacárido, la cual puede favorecer su estabilidad, liberación y aprovechamiento biológico [4]. Sin embargo, los mecanismos involucrados no fueron evaluados directamente en este trabajo.

En conjunto, las imágenes de SEM y las gráficas histomorfométricas mostraron que la ovariectomía deterioró la microarquitectura femoral, mientras que los tratamientos atenuaron este efecto en distinta magnitud. LMCC fue la formulación con la mejor conservación global del hueso cortical y trabecular, mientras que la respuesta de LXMix frente a LXCC demuestra que el efecto de la nanoestructuración dependió del polisacárido y del parámetro evaluado.

Conclusiones

La ovariectomía provocó un deterioro significativo de la microarquitectura femoral, evidenciado por menor grosor cortical (Ct.Th) y trabecular (Tb.Th), así como mayor separación trabecular (Tb.Sp). El sistema nanoestructurado lactosuero-mucílago-calcio (LMCC) presentó la mejor conservación global del tejido cortical y trabecular entre los grupos ovariectomizados. Sin embargo, LXMix mostró mayor Ct.Th que LXCC, indicando que el

efecto de la nanoestructuración dependió del polisacárido y del parámetro evaluado.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo otorgado por el Fondo para el Fortalecimiento de la Investigación, Vinculación y Extensión (FONFIVE-UAQ-2024, Proyecto FQU202419), el cual permitió la realización de este trabajo de investigación. También se agradece al Comité Organizador del Programa Veranos de la Ciencia UAQ 2026, por el soporte económico concedido a los estudiantes Saúl Guzmán Rodríguez, Alexa Janine Arredondo Villacaña y Mariana Arredondo Soto durante su estancia de investigación en dicho programa.

Referencias bibliográficas

- [1] Ż. Ciosek, K. Kot, D. Kosik-Bogacka, N. Łanocha-Arendarczyk, and I. Rotter, "The effects of calcium, magnesium, phosphorus, fluoride, and lead on bone tissue," *Biomolecules*, vol. 11, no. 4, p. 506, Mar. 2021, doi: 10.3390/biom11040506.
- [2] R. Eastell et al., "Postmenopausal osteoporosis," *Nature Reviews Disease Primers*, vol. 2, no. 1, art. 16069, Sep. 2016, doi: 10.1038/nrdp.2016.69.
- [3] Y. Zhang et al., "Study on the calcium transport-promoting property and mechanism of the peptide-calcium complex DEENDQVK-Ca based on a Caco-2 monolayer model," *Foods*, vol. 14, no. 17, p. 3119, Sep. 2025, doi: 10.3390/foods14173119.
- [4] M. Sethunga, S. C. Rangani, I. Munaweera, and K. K. D. S. Ranaweera, "Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods," *Nanoscale Advances*, vol. 7, no. 24, pp. 7867–7890, Dec. 2025, doi: 10.1039/D5NA00751H.
- [5] J. H. Lee, H. J. Kim, and J. H. Yun, "Three-dimensional microstructure of human alveolar trabecular bone: a micro-computed tomography study," *Journal of Periodontal & Implant Science*, vol. 47, no. 1, pp. 20–29, Feb. 2017, doi: 10.5051/jpis.2017.47.1.20.
- [6] D. W. Dempster, E. Shane, W. Horbert, and R. Lindsay, "A simple method for correlative light and scanning electron microscopy of human iliac crest bone biopsies: qualitative observations in normal and osteoporotic subjects," *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 1, no. 1, pp. 15–21, Feb. 1986, doi: 10.1002/jbmr.5650010105.
- [7] Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, *Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), México, 1999. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203498/NOM-062-ZOO-1999_220801.pdf
- [8] E. Hernández-Becerra, E. Gutiérrez-Cortez, A. Del Real, A. Rojas-Molina, M. Rodríguez-García, E. Rubio, M. Quintero-García, and I. Rojas-Molina, "Bone mineral density, mechanical, microstructural properties and mineral content of the femur in growing rats fed with cactus *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (Cactaceae) cladodes as calcium source in diet," *Nutrients*, vol. 9, no. 2, p. 108, 2017, doi: 10.3390/nu9020108.
- [9] M. Quintero-García, E. Gutiérrez-Cortez, A. Rojas-Molina, M. Mendoza-Ávila, A. Del Real, E. Rubio, D. Jiménez-Mendoza, and I. Rojas-Molina, "Calcium bioavailability of *Opuntia ficus-indica* cladodes in an ovariectomized rat model of postmenopausal bone loss," *Nutrients*, vol. 12, no. 5, p. 1431, May 2020, doi: 10.3390/nu12051431.
- [10] X. Yao et al., "Aloe polysaccharide promotes osteogenesis potential of adipose-derived stromal cells via BMP-2/Smads and prevents ovariectomized-induced osteoporosis," *Molecular Biology Reports*, vol. 49, no. 12, pp. 11913–11924, Dec. 2022, doi: 10.1007/s11033-022-08003-x.
- [11] J. Yang et al., "Stress reduction through cortical bone thickening improves bone mechanical behavior in adult female Beclin-1+/- mice," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 12, art. 1357686, 2024, doi: 10.3389/fbioe.2024.1357686.



Valorización del suero lácteo mediante hidrólisis enzimática y fermentación.

Medrano Martínez Julieta, Castañeda Olvera María Danaé, Abadía García Lucía Guadalupe. Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Querétaro, Qro. México. Correo electrónico: jmedrano12@alumnos.uaq.mx, lucia.abadia@uaq.mx

Resumen

El suero lácteo dulce es un subproducto de la industria quesera cuya carga orgánica alta genera un importante problema ambiental cuando no se dispone correctamente. Este estudio tuvo como objetivo revalorizar el permeado de suero lácteo por medio de diferentes procesos para obtener un ingrediente con potencial funcional. Se empleó una hidrólisis enzimática con papaína, seguida de una ultrafiltración de 10 kDa y una fermentación con *L. plantarum* asistida por ultrasonido durante el tiempo 4. Se evaluó el crecimiento bacteriano, pH, acidez titulable, así como la actividad antioxidante (ABTS y DPPH) y la capacidad inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA). Los resultados mostraron que el tratamiento con ultrasonido favoreció la acidificación y la adaptación de la cepa. Se identificó una ventana para procesamiento entre las 4 y 6 horas de fermentación, donde se alcanzaron los mayores niveles de actividad antioxidante por ABTS (78.43%) e inhibición de la ECA (92.06%). La actividad por DPPH se incrementó progresivamente durante las 24 horas (13.65%). Concluyendo que la combinación de hidrólisis enzimática, ultrafiltrado y fermentación asistida por ultrasonido es una estrategia eficiente para transformar un residuo

industrial en un ingrediente funcional bioactivo con propiedades antioxidantes y antihipertensivas aplicable en la industria alimentaria.

Palabras clave: suero lácteo, papaína, ultrasonido, *Lactiplantibacillus plantarum*, péptidos bioactivos, capacidad antioxidante, inhibición de ECA.

Abstract

Sweet cheese whey is a dairy industry byproduct whose high organic load poses a significant environmental issue if improperly disposed of. This study aimed to valorize whey permeate through different processes to obtain a functional bioactive ingredient. Enzymatic hydrolysis with papain was performed, followed by 10 kDa ultrafiltration and ultrasound-assisted fermentation with *L. plantarum* at time point 4. Bacterial growth, pH, titratable acidity, antioxidant capacity (ABTS and DPPH), and angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory capacity were evaluated. The results showed that ultrasound treatment favored acidification and strain adaptation. An optimal processing window was identified between 4 and 6 hours of fermentation, reaching peak levels of ABTS antioxidant capacity (78.43%) and ACE inhibition (92.06%). DPPH activity steadily increased over 24 hours (13.65%). It is concluded that combining enzymatic hydrolysis, ultrafiltration, and ultrasound-assisted fermentation is an efficient strategy to transform an industrial waste into a bioactive functional ingredient with antioxidant and antihypertensive properties applicable in the food industry.

Keywords: cheese whey, papain, ultrasound, *L. plantarum*, bioactive peptides, antioxidant capacity, ACE inhibition.

Introducción

El suero de leche dulce es la fracción líquida obtenida durante la elaboración de quesos mediante la coagulación enzimática de la leche (Rysová et al., 2025). Este subproducto conserva nutrientes como lactosa, proteínas, vitaminas y minerales sin embargo, los grandes volúmenes generados y su elevada carga orgánica pueden representar un problema ambiental cuando no se dispone adecuadamente (Asaduzzaman et al.,

2021). Por ello, su valorización mediante procesos que permitan obtener productos de mayor valor agregado constituye una alternativa de interés para la industria láctea (Sánchez & Gómez, 2008; Asaduzzaman et al., 2021).

Las proteínas del suero, principalmente β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina, poseen alto valor nutricional y pueden actuar como precursoras de péptidos bioactivos (Brandelli et al., 2015). Estos péptidos pueden presentar propiedades antioxidantes, antihipertensivas, antimicrobianas e inmunomoduladoras (Chakrabarti et al., 2017; Sánchez & Gómez, 2008) y liberarse mediante hidrólisis enzimática (Sánchez & Vázquez, 2022; Gupta et al., 2024). La papaína, una proteasa de origen vegetal, permite fragmentar las proteínas y generar péptidos de menor tamaño con potencial actividad biológica (Sánchez & Vázquez, 2022). Posteriormente, la ultrafiltración permite separar y obtener fracciones enriquecidas en péptidos pequeños (Korhonen & Pihlanto, 2004).

Estos hidrolizados pueden utilizarse como sustrato para la fermentación con bacterias ácido-lácticas. *L. plantarum* resulta de interés por su capacidad para adaptarse a diferentes matrices y transformar sus componentes, pudiendo modificar los péptidos presentes y favorecer la generación de compuestos con propiedades funcionales.

Además, el ultrasonido puede emplearse para intensificar la fermentación. Bajo condiciones controladas, la cavitación generada por las ondas ultrasónicas puede aumentar temporalmente la permeabilidad de la membrana celular (sonoporación), favoreciendo el transporte de nutrientes (Nguyen et al., 2016; García-Mancilla et al., 2023). Esto podría facilitar el aprovechamiento de azúcares, aminoácidos y péptidos por *L. plantarum*, reducir su fase de adaptación y favorecer su actividad metabólica.

La integración de hidrólisis con papaína, ultrafiltración y fermentación asistida por ultrasonido representa así una estrategia para valorizar el suero y potenciar sus propiedades funcionales. Entre ellas destacan la actividad antioxidante, asociada con la neutralización de especies reactivas (Manzoor et al., 2022), y la inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), relacionada con el potencial

antihipertensivo de determinados péptidos (Manzoor et al., 2022). Por ello, este trabajo tuvo como objetivo evaluar ambas actividades en un hidrolizado de suero obtenido con papaína y posteriormente fermentado con *L. plantarum* mediante un proceso asistido por ultrasonido.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la actividad biológica del permeado de suero de leche hidrolizado con papaína y fermentado con *L. plantarum* por medio de la determinación de su actividad inhibidora de ECA y de su capacidad antioxidante.

Objetivos particulares

Determinar la actividad inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) del permeado de suero de leche hidrolizado con papaína y fermentado con *L. plantarum*.

Determinar la capacidad antioxidante del permeado de suero de leche hidrolizado con papaína y fermentado con *L. plantarum*.

Metodología

Obtención e hidrólisis enzimática del suero

El suero de leche dulce se obtuvo como subproducto de la elaboración de queso de leche bovina mediante coagulación enzimática y se conservó en congelación hasta su utilización. Previamente a la hidrólisis se determinó su contenido de proteína por el método de Bradford.

La hidrólisis enzimática del suero se realizó utilizando papaína (EC), a una temperatura de 55 ± 2 °C durante 60 min. Posteriormente, la enzima se inactivó mediante calentamiento a 95 °C durante 10 min y el hidrolizado obtenido se conservó en refrigeración.

Ultrafiltración del hidrolizado de suero

El suero hidrolizado se sometió a ultrafiltración mediante un sistema tangencial utilizando una membrana de 10 kDa de apertura, con el propósito de separar los péptidos de menor tamaño molecular generados en la hidrólisis enzimática. El proceso se realizó por

recirculación hasta obtener la fracción que posteriormente se utilizó como sustrato para la fermentación.

Fermentación con *L. plantarum*

El permeado se pasteurizó por calentamiento a 85°C por 2 minutos y se enfrió a temperatura ambiente para posteriormente inocularse con un cultivo previamente activado de *L. plantarum* este tratamiento se realizó por triplicado y se incubó a 37 °C. Se tomaron muestras a las 0, 2, 6, 12 y 24 h para evaluar los cambios ocurridos durante el proceso. Durante la fermentación se determinó el crecimiento de *L. plantarum*, pH y acidez titulable. El pH se midió mediante potenciometría y la acidez por titulación directa con NaOH 0.1 N.

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las propiedades funcionales del suero, se evaluó la capacidad antioxidante mediante los métodos ABTS (Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) y DPPH ((2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), cuantificando la reducción de los radicales por espectrofotometría.

Asimismo, se determinó la actividad inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) utilizando hipuril-histidil-leucina (HHL) como sustrato. Después de la reacción enzimática, el ácido hipúrico producido se extrajo y cuantificó espectrofotométricamente a 228 nm, y los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición de la ECA.

De esta manera, se comparó el efecto de la fermentación convencional y la fermentación asistida por ultrasonido sobre el crecimiento bacteriano y las propiedades antioxidantes y antihipertensivas potenciales del hidrolizado de suero.

Resultados

Actividad enzimática de la enzima Papaína.

La papaína (Enzyme Development Corporation) presentó una actividad proteolítica de 113.66 U/g, valor que permitió establecer la cantidad de enzima requerida para la hidrólisis de las

proteínas presentes suero lácteo. La hidrólisis se llevó a cabo utilizando una relación enzima de 1:50, con el propósito de favorecer la ruptura de las proteínas del suero y la liberación de péptidos de menor tamaño molecular. Posteriormente, el hidrolizado fue sometido a ultrafiltración con una membrana de corte molecular de 10 kDa, permitiendo separar las proteínas y péptidos de mayor tamaño y obtener un permeado enriquecido en fracciones peptídicas menores a 10 kDa. Esta estrategia resulta de interés debido a que la hidrólisis de proteínas como la β -lactoglobulina y la α -lactoalbúmina puede liberar secuencias peptídicas con actividades biológicas que permanecen encriptadas en las proteínas precursoras, entre ellas actividad antioxidante e inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA).

Fermentación del hidrolizado con *L. Plantarum*

Durante la fermentación del permeado hidrolizado con *L. plantarum*, asistida por ultrasonido, se observó una disminución progresiva del pH acompañada de un incremento de la acidez titulable durante las 24 h de fermentación (Figura 1). Al inicio del proceso (0 h), la muestra presentó un pH de 6.38 y una acidez titulable de 2.25 g/L de ácido láctico. La acidificación fue más evidente entre las 12 y 24 h, alcanzando al final de la fermentación un pH de 4.36 y una acidez de 4.32 g/L de ácido láctico. La disminución del pH y el incremento simultáneo de la acidez evidencian la actividad metabólica de *L. plantarum* y su capacidad para desarrollarse en el permeado obtenido a partir del suero lácteo. Este comportamiento indica que el sustrato proporciona nutrientes disponibles para mantener la actividad fermentativa de la bacteria durante el periodo evaluado. La aplicación de ultrasonido durante la fermentación podría haber contribuido al proceso mediante fenómenos de sonoporación transitoria, asociados con modificaciones reversibles de la permeabilidad de la membrana celular que pueden favorecer el transporte de nutrientes y metabolitos (García-Mancilla et al., 2023).

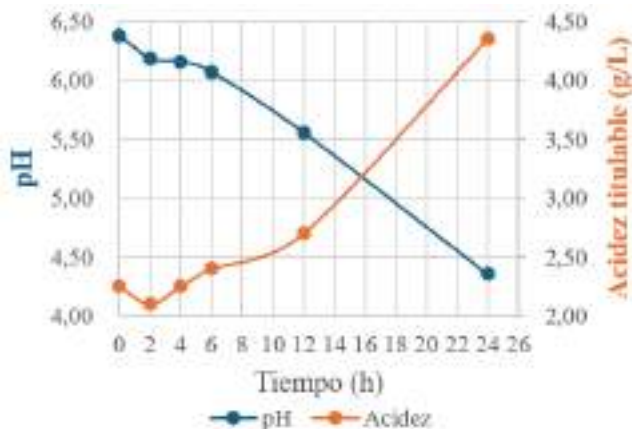


Figura 1. Cambios en el pH y la acidez titulable durante la fermentación del permeado de suero lácteo hidrolizado.

Actividad antioxidante y actividad inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA)

La capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH y ABTS se determinó utilizando curvas de calibración con Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid) como estándar antioxidante (**Figuras 2 y 3**, respectivamente). La capacidad antioxidante presentó comportamientos diferentes dependiendo del método empleado (**Tabla 2**), lo que puede relacionarse con las diferencias en los mecanismos de reacción y sensibilidad de los radicales ABTS y DPPH frente a los compuestos antioxidantes presentes en el hidrolizado fermentado.

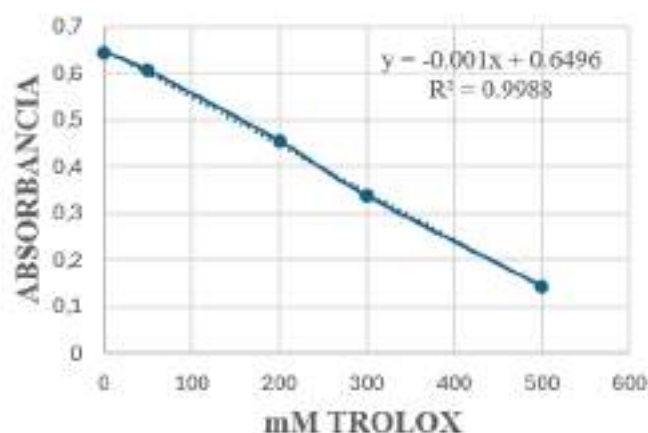


Figura 2. Curva de calibración para la determinación de capacidad antioxidante por el método ABTS utilizando Trolox como estándar ($R^2 = 0.9988$).

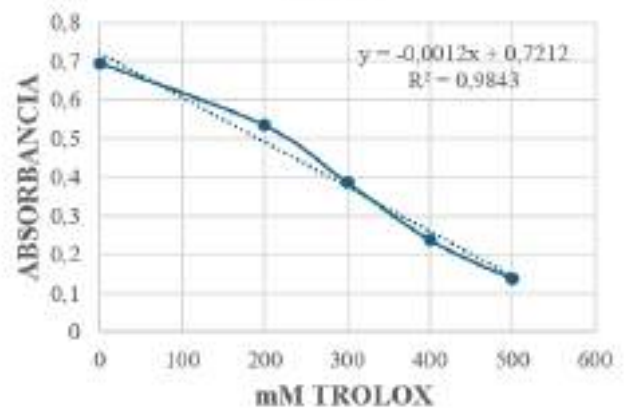


Figura 3. Curva de calibración para la determinación de capacidad antioxidante por el método DPPH utilizando Trolox como estándar ($R^2 = 0.9843$).

En el ensayo ABTS, la muestra presentó una elevada actividad desde el inicio de la fermentación, con 67.33 % de inhibición a las 0 h, alcanzando un máximo de 78.43 % a las 4 h. La elevada actividad observada antes de la fermentación sugiere que una proporción importante de los compuestos antioxidantes ya estaba presente después de la hidrólisis con papaína y la ultrafiltración. Por lo tanto, la proteólisis enzimática previa probablemente desempeñó un papel relevante en la liberación de péptidos con capacidad antioxidante. El incremento observado durante las primeras 4 h podría indicar una contribución adicional de la fermentación sobre las fracciones peptídicas inicialmente presentes. Sin embargo, dado que posteriormente no se observó un incremento sostenido, los resultados sugieren que prolongar la fermentación no necesariamente aumenta la actividad antioxidante determinada mediante ABTS.

El ensayo DPPH mostró un comportamiento progresivo, aumentando desde 0.03 % de inhibición a las 0 h hasta 13.65 % a las 24 h. Esta tendencia sugiere que durante la fermentación se produjeron modificaciones en la composición del permeado capaces de incrementar gradualmente su capacidad para neutralizar el radical DPPH. Una posible explicación es la actividad proteolítica asociada con *L. plantarum*, que puede modificar las fracciones peptídicas presentes y favorecer la generación de péptidos de menor tamaño o con secuencias y residuos aminoacídicos con actividad antioxidante. No obstante, la actividad antioxidante de un sistema fermentado no depende exclusivamente de los

péptidos, por lo que otros metabolitos generados durante la fermentación también podrían contribuir al comportamiento observado (Manzoor et al., 2022; Raveschot et al., 2020).

Las diferencias entre ABTS y DPPH no deben interpretarse como resultados contradictorios. Ambos métodos presentan diferentes mecanismos de reacción y afinidad por los compuestos antioxidantes. Por ello, los resultados sugieren que la hidrólisis y la fermentación modificaron de manera diferencial la composición de los compuestos capaces de reaccionar con cada radical.

Por otra parte, la inhibición de la ECA se mantuvo por encima del 73 % durante todo el periodo evaluado (Tabla 2). La muestra presentó una elevada actividad desde el tiempo inicial, con aproximadamente 90 % de inhibición a las 0 h, y alcanzó un máximo de 92.06 % a las 6 h de fermentación. Aunque posteriormente la actividad disminuyó, a las 24 h se mantuvo por encima del 73 %. La elevada inhibición observada desde las 0 h constituye un resultado relevante, ya que indica que la actividad inhibitoria de la ECA se generó principalmente durante las etapas previas a la fermentación. En particular, la hidrólisis con papaína pudo favorecer la liberación de péptidos bioactivos a partir de las proteínas del suero lácteo, mientras que la ultrafiltración permitió seleccionar una fracción peptídica con masa molecular inferior a 10 kDa.

El incremento adicional observado hasta las 6 h sugiere que la fermentación pudo modificar favorablemente esta fracción peptídica durante las primeras horas del proceso. En cambio, la disminución posterior podría relacionarse con una proteólisis adicional de algunos péptidos activos, generando fragmentos con menor capacidad inhibitoria. Este comportamiento pone de manifiesto que una hidrólisis más extensa no necesariamente se traduce en una mayor bioactividad, ya que ésta depende tanto del tamaño como de la secuencia específica de los péptidos generados (Sánchez & Vázquez, 2022).

Tiempo (h)	Concentración eq. de Trolox		% de inhibición		
	ABTS	DPPH	ABTS	DPPH	ECA
0	437,6	0,700	67,33%	0,03%	90,15%
2	436,6	0,702	67,18%	2,23%	89,68%
4	509,6	0,709	78,43%	1,25%	90,81%
6	486,6	0,686	74,88%	4,46%	92,06%
12	457,6	0,658	70,42%	8,36%	73,51%
24	484,6	0,620	74,58%	13,65%	78,84%

Tabla 2. Actividad antioxidante (ABTS, DPPH) e inhibición de la ECA durante la fermentación. ECA: Enzima Convertidora de Angiotensina; ABTS/DPPH: Ensayos de capacidad antioxidante expresados en equivalentes de Trolox y porcentaje de inhibición (%).

Discusión y conclusiones.

Los resultados demuestran el potencial del suero lácteo como materia prima para obtener ingredientes de mayor valor agregado mediante la combinación de hidrólisis con papaína, ultrafiltración (10 kDa) y fermentación con *L. plantarum* asistida por ultrasonido. La elevada actividad antioxidante e inhibición de la ECA observadas desde el inicio sugieren que la hidrólisis y la ultrafiltración fueron determinantes para liberar y seleccionar péptidos bioactivos de bajo peso molecular derivados principalmente de las proteínas del suero.

Las mayores respuestas se observaron entre las 4 y 6 h de fermentación, alcanzando 78.43 % de inhibición por ABTS (509.6 μ M Trolox) a las 4 h y 92.06 % de inhibición de la ECA a las 6 h. Este intervalo representa una ventana de procesamiento favorable, ya que permitiría conservar una elevada bioactividad y, al mismo tiempo, reducir el tiempo y potencialmente el consumo energético del proceso.

Por otra parte, el incremento progresivo de la actividad antioxidante determinada mediante DPPH durante las 24 h sugiere que la fermentación continuó modificando las fracciones peptídicas y otros compuestos presentes en el permeado. El ultrasonido pudo contribuir a favorecer la actividad metabólica de *L. plantarum* mediante cambios transitorios en la

permeabilidad celular; sin embargo, este mecanismo requiere estudios adicionales para su confirmación.

La integración de estas tecnologías constituye una alternativa prometedora para la valorización del suero lácteo y la obtención de ingredientes con potencial antioxidante y antihipertensivo, con posible aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales o suplementos.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por el apoyo brindado a través del programa de proyectos de verano y la beca otorgada. A la Dra. Lucía Guadalupe Abadía García, por su guía, conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto. A la tesista Danaé, por su apoyo y disposición durante el trabajo experimental, y al laboratorio Innovación y Desarrollo de Alimentos de la Facultad de Química, por proporcionar los recursos, equipos y espacios necesarios para la realización de este trabajo.

Referencias

- Asaduzzaman, M., Uddin, M. N., & Islam, M. R. (2021). Whey utilization: Sustainable uses and environmental approach. *Journal of Dairy Research*, 88(3), 245–252. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8284110/>
- Brandelli, A., Daroit, D. J., & Corrêa, A. P. F. (2015). Whey as a source of bioactive peptides. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(4), 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.04.013>
- García-Mancilla, A., López-Pérez, M., & Hernández-Mendoza, A. (2023). Ultrasound-assisted fermentation in dairy systems: Mechanisms and benefits. *Fermentation*, 9(4), 356. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040356>
- Gupta, A., Sharma, R., & Kumar, S. (2024). Enzymatic generation of bioactive peptides from whey proteins. *Biomolecules & Therapeutics*, 5(2), 30. <https://www.mdpi.com/2813-0464/5/2/30>
- Korhonen, H., & Pihlanto, A. (2004). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945–960. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.03.011>
- Manzoor, M., Singh, J., & Gani, A. (2022). Exploration of bioactive peptides derived from lactic acid bacteria fermentation. *Food Chemistry*, 385, 132689. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35584265/>
- Nguyen, T. M., Le, T. V., & Van Camp, J. (2016). Effects of power ultrasound on lactic acid fermentation and cell membrane permeability. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.020>
- Raveschot, C., Cudennec, B., Coutte, F., Flahaut, C., Fremont, M., Drider, D., & Dhulster, P. (2020). Production of bioactive peptides by lactic acid bacteria. *Heliyon*, 6(11), e05380. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05380>
- Sánchez, A., & Vázquez, A. (2022). Bioactive peptides: Synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1445. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8836030/>
- Sánchez, D., & Gómez, B. (2008). Propiedades biológicas de los péptidos derivados de las proteínas lácteas. *Nutrición Hospitalaria*, 23(5), 415–421. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112008000500002

Evaluación del potencial antagonista de un consorcio microbiano frente a fitopatógenos del jitomate

Montserrat Escamilla García, Universidad Autónoma de Querétaro, C.U. Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, Santiago de Querétaro 76010. Correo electrónico: monserrat.escamilla@uaq.edu.mx

María Guadalupe Martínez Medina, Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Querétaro, Qro, México. Correo electrónico: mmartinez431@alumnos.uaq.mx

Resumen

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es un cultivo de gran importancia económica cuya producción puede verse afectada por fitopatógenos como *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum gloeosporioides*. En este trabajo se evaluó in vitro el potencial antagonista de *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens*, de manera individual y en diferentes combinaciones microbianas. Las confrontaciones se realizaron mediante la técnica de sobre capa de agar suave y la actividad antagonista se estimó a partir del porcentaje de inhibición del crecimiento micelial, complementado con análisis digital de imágenes mediante ImageJ.

Frente a *F. oxysporum*, los tratamientos que incluyeron *T. virens* presentaron los mayores porcentajes de inhibición tanto en etapas tempranas como al final del periodo de evaluación, destacando T, BT, PT y BPT. En contraste, *B. cereus* Amazcala y *P. fluorescens* mostraron menor actividad antagonista directa bajo las condiciones del ensayo. En *C. gloeosporioides*, el crecimiento irregular y no homogéneo dificultó la cuantificación confiable de la inhibición mediante el método empleado.

Los resultados identifican a *T. virens* como el microorganismo con mayor actividad antagonista frente a *F. oxysporum* y sugieren que su incorporación en combinaciones microbianas puede ser de interés para estrategias de biocontrol. Sin embargo, se requieren análisis adicionales de compatibilidad, comparación estadística, evaluación en planta y validación de los mecanismos de interacción antes de confirmar un efecto sinérgico o su aplicación como bioestimulante microbiano.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, biocontrol, *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma virens*, consorcio microbiano, PGPM.

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is an economically important crop whose production can be affected by phytopathogens such as *Fusarium oxysporum* and *Colletotrichum gloeosporioides*. In this study, the in vitro antagonistic potential of *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala, and *Trichoderma virens* was evaluated individually and in different microbial combinations. Confrontation assays were performed using the soft agar overlay technique, and antagonistic activity was estimated through the percentage of mycelial growth inhibition, complemented by digital image analysis using ImageJ.

Against *F. oxysporum*, treatments containing *T. virens* showed the highest inhibition percentages both at early stages and at the end of the evaluation period, particularly T, BT, PT, and BPT. In contrast, *B. cereus* Amazcala and *P. fluorescens* showed lower direct antagonistic activity under the assay conditions. For *C. gloeosporioides*, irregular and non-homogeneous growth hindered reliable quantification of inhibition using the applied method.

These results identify *T. virens* as the microorganism with the greatest antagonistic activity against *F. oxysporum* and suggest that its incorporation into microbial combinations may be useful for biocontrol strategies. However, additional compatibility studies, statistical comparisons, plant assays, and validation of interaction mechanisms are required before confirming

synergistic effects or its application as a microbial biostimulant.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, biocontrol, *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma virens*, microbial consortium, PGPM.

Introducción

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es un cultivo de elevada importancia económica y alimentaria; sin embargo, su productividad puede verse comprometida por enfermedades causadas por fitopatógenos, entre ellos *Fusarium oxysporum*, asociado con marchitez vascular, y especies de *Colletotrichum*, responsables de antracnosis. El control convencional de estas enfermedades depende en gran medida de productos químicos, por lo que existe interés en alternativas biológicas que permitan reducir su uso y favorecer sistemas agrícolas más sostenibles. [1]

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal y los agentes de control biológico pueden actuar mediante diversos mecanismos, como competencia por nutrientes y espacio, producción de metabolitos antimicrobianos, solubilización de nutrientes e inducción de respuestas de defensa en la planta. Entre ellos, especies de *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Trichoderma* han mostrado potencial para su uso como bioinoculantes. En particular, *Trichoderma* spp. puede antagonizar hongos fitopatógenos mediante micoparasitismo, antibiosis, competencia y producción de enzimas degradadoras de pared celular. [2 y 3]

La combinación de microorganismos en consorcios puede integrar funciones complementarias; sin embargo, su eficacia depende de la compatibilidad entre los integrantes y no debe asumirse que una mezcla siempre será superior a una cepa individual. Por ello, en este trabajo se evaluó la actividad antagonista individual y combinada de *P. fluorescens*, *B. cereus* Amazcala y *T. virens* frente a *F. oxysporum* y *C. gloeosporioides*, como etapa preliminar para valorar su posible incorporación en un bioestimulante microbiano. [4]

Objetivos

Objetivo general.

Diseñar un bioestimulante a base de un consorcio microbiano encapsulado conformado por *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens* para su potencial aplicación como promotor de crecimiento vegetal.

Objetivos particulares.

Evaluar el efecto inhibitorio del consorcio microbiano frente a *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum gloeosporioides*.

Realizar pruebas de confrontación in vitro mediante la técnica de sobre capa de agar suave.

Cuantificar la actividad antagónica mediante análisis digital de imágenes utilizando ImageJ.

Metodología

Material biológico

Las cepas de *P. fluorescens*, *T. virens*, *F. oxysporum* y *C. gloeosporioides* fueron proporcionadas por el Laboratorio de Biotecnología de Alimentos de la Facultad de Química (UAQ). La cepa *B. cereus* Amazcala fue donada por el CIAB de la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala.

Se utilizaron caldo nutritivo (CN), agar nutritivo (AN), caldo papa dextrosa (PDB), agar papa dextrosa (PDA), agar bacteriológico, Tween 80 al 0.1%

Ácido indolacético como materiales para la activación y evaluación de los microorganismos.

Activación de microorganismos.

Las cepas bacterianas fueron activadas en CN a 37°C durante tres días, monitoreando su crecimiento mediante mediciones de densidad óptica a 600 nm. [5] Por su parte, *T. virens* fue cultivado en PDA hasta esporulación, recuperando las esporas mediante solución Tween 80 al 0.1% y cuantificándolas, utilizando una cámara de Neubauer [6]

Ensayos de confrontación.

Las pruebas de antagonismo se realizaron mediante la técnica de sobre capa de agar suave (soft agar overlay). Los microorganismos benéficos fueron incorporados a una matriz semisólida de PDA suplementada con agar bacteriológico al 0.8%, la cual fue colocada sobre placas base de agar solido PDA previamente preparadas. Los fitopatógenos fueron inoculados por picadura en el centro de cada placa y el proceso se realizó por quintuplicado.

En esta fase experimental, se evaluaron 7 tratamientos específicos, correspondientes a las cepas individuales y sus diversas combinaciones:

B (*Bacillus cereus* Amazcala), P (*Pseudomonas fluorescens*), T (*Trichoderma virens*), BP, BT, PT y el consorcio completo BPT. [7]

Análisis morfométrico

Las placas de confrontación fueron digitalizadas de manera periódica durante un periodo de 2 a 10 días y posteriormente procesadas mediante el software ImageJ 1.34. Para la validación cuantitativa de la inhibición, las imágenes se convirtieron a un formato de 8 bits, permitiendo

determinar variables morfológicas críticas asociadas al crecimiento micelial, tales como la circularidad, dimensión fractal y la longitud de hifas. Este análisis permitió evaluar con precisión el grado de restricción del desarrollo fúngico provocado por los diversos tratamientos del consorcio [8].

Análisis estadístico.

Los valores obtenidos se utilizaron para calcular la media aritmética y la desviación estándar de cada tratamiento. La actividad antagonista se expresó como porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (%ICM), calculado a partir de la diferencia entre el crecimiento del control y el crecimiento observado en presencia del microorganismo antagonista, de acuerdo con la ecuación:

$$\% ICM = \frac{C - T}{C} \times 100$$

donde C representa el diámetro de crecimiento del fitopatógeno en el control y T el diámetro de crecimiento en el tratamiento correspondiente.

Resultados

Las confrontaciones microbianas mostraron diferencias en la capacidad antagonista de los microorganismos evaluados frente a *Fusarium oxysporum*. Los tratamientos que incluyeron *Trichoderma virens* presentaron los mayores porcentajes de inhibición del crecimiento del fitopatógeno, evidenciando su efecto antagonista y su contribución dentro de los consorcios microbianos evaluados.

En el Cuadro 1 se muestran los datos obtenidos del porcentaje de inhibición de P, T y B ante *F. oxysporum*. A los dos días de confrontación se observó una respuesta inhibitoria temprana en los tratamientos que contenían *T. virens*, mientras que los tratamientos conformados únicamente por *Bacillus cereus* Amazcala o *Pseudomonas fluorescens* mostraron niveles de inhibición más bajos.

Cuadro1. % de inhibición de *Bacillus cereus* Amazcala, *Pseudomonas fluorescens*, y *Trichoderma virens* a los 2 días de inoculación.

Microorganismo	% Inhibición
B	50.90
P	3.46
T	84.83
BP	51.33
BT	85.14
PT	82.12
BPT	82.96

Donde B: *Bacillus cereus* Amazcala,
P: *Pseudomonas fluorescens*), T:
Trichoderma virens

Después de diez días de incubación, los consorcios BPT, PT y BT presentaron los mayores porcentajes de inhibición del crecimiento del fitopatógeno. Este comportamiento sugiere una posible contribución de *Trichoderma virens* a la actividad antagónica de las combinaciones microbianas evaluadas, particularmente en aquellas formulaciones en las que estuvo presente este microorganismo.

Las observaciones macroscópicas de las confrontaciones fueron consistentes con los resultados obtenidos mediante la evaluación del porcentaje de inhibición, evidenciando diferencias en la expansión del crecimiento micelial del fitopatógeno entre los tratamientos.

Los consorcios que incluyeron *T. virens* mostraron una menor expansión radial del micelio en comparación con los tratamientos que no incorporaron este microorganismo. Esta diferencia fue observable tanto a los 2 como a los 10 días de incubación, lo que indica que la presencia de *T. virens* estuvo asociada con una mayor restricción del desarrollo micelial del fitopatógeno durante el periodo de evaluación.

Este comportamiento coincide con los porcentajes de inhibición obtenidos y respalda el potencial de *T. virens* como componente clave dentro de los consorcios microbianos propuestos para el

desarrollo de un bioestimulante con capacidad de biocontrol en el cultivo de jitomate.

En la Figura 1 se muestran las confrontaciones de *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium oxysporum*

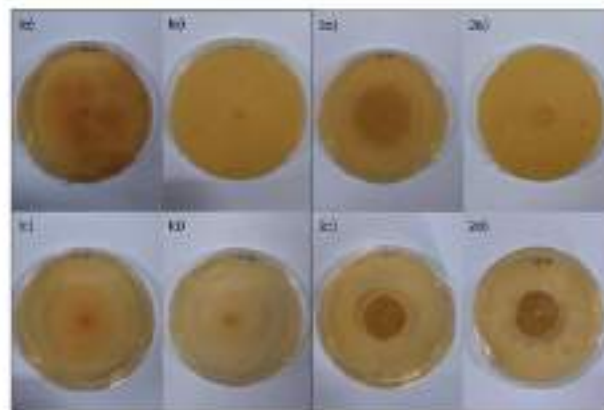


Figura 1. Confrontaciones: 1a) Control *Fusarium oxysporum*, 1b) *T. virens* vs *Fusarium oxysporum*, 1c) *P. fluorescens* vs *Fusarium oxysporum*, 1d) *B. cereus* vs *Fusarium oxysporum*. 2a) Control *Colletotrichum gloeosporioides*, 2b) *T. virens* vs *Colletotrichum gloeosporioides*, 2c) *P. fluorescens* vs *Colletotrichum gloeosporioides*, 2d) *B. cereus* vs *Colletotrichum gloeosporioides*.

En el caso de *Colletotrichum gloeosporioides*, el crecimiento se presentó de manera irregular y no homogénea sobre la superficie del medio de cultivo, lo que dificultó la medición precisa del crecimiento micelial y, por consiguiente, la cuantificación del porcentaje de inhibición.

Discusión y conclusión

Los tratamientos evaluados mostraron diferencias en su capacidad para restringir el crecimiento micelial de *Fusarium oxysporum*. La mayor actividad inhibitoria se registró en los tratamientos que contenían *Trichoderma virens*, tanto en la aplicación individual como en las combinaciones BT, PT y BPT. Este comportamiento es consistente con la reconocida capacidad antagonista de *Trichoderma* spp. frente a diversos hongos fitopatógenos. La actividad de estos agentes de biocontrol puede estar asociada con diferentes mecanismos, entre ellos la competencia por espacio y nutrientes, la producción de metabolitos secundarios con actividad antifúngica, la secreción de enzimas hidrolíticas y el micoparasitismo (Benítez et al., 2004; Harman et al., 2004; Contreras-Cornejo et al., 2023). En particular, *T. virens* ha sido descrito

como una especie con capacidad para producir metabolitos secundarios y compuestos antifúngicos que pueden contribuir a la inhibición del crecimiento de otros hongos (Mukherjee et al., 2012).

La inhibición observada desde las primeras etapas de incubación sugiere que la interacción entre *T. virens* y *F. oxysporum* fue establecida tempranamente bajo las condiciones *in vitro* evaluadas. No obstante, este resultado debe interpretarse con cautela, debido a que la reducción del crecimiento micelial por sí sola no permite determinar el mecanismo responsable de la interacción. En sistemas de confrontación directa, la inhibición puede resultar de la combinación de competencia por recursos, antibiosis y, cuando ocurre contacto entre las hifas, procesos asociados con el micoparasitismo y la actividad de enzimas degradadoras de la pared celular (Harman et al., 2004; Mukherjee et al., 2012). Por tanto, los resultados obtenidos son compatibles con la actividad antagonista de *T. virens*, aunque la participación específica de cada mecanismo requeriría ser corroborada mediante ensayos complementarios.

En contraste, *Bacillus cereus* Amazcala y *Pseudomonas fluorescens* presentaron una menor capacidad de inhibición directa del crecimiento de *F. oxysporum* bajo las condiciones experimentales establecidas. Sin embargo, esta respuesta no necesariamente implica una menor importancia biológica o biotecnológica de estos microorganismos. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden ejercer efectos benéficos mediante mecanismos que no necesariamente se manifiestan como una marcada inhibición del crecimiento del patógeno en condiciones *in vitro*. Entre estos mecanismos se encuentran la producción de fitohormonas, sideróforos, enzimas y metabolitos antimicrobianos, así como la solubilización de fosfatos y la modulación de las respuestas de defensa de la planta (Kumar et al., 2023; Sahu et al., 2022). En particular, diferentes cepas de *B. cereus* han mostrado características asociadas con la promoción del crecimiento vegetal, incluyendo producción de ácido indol-3-acético, sideróforos y capacidad de solubilización de fósforo (Kumar et al., 2023).

De manera similar, *P. fluorescens* constituye un grupo ampliamente estudiado de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal debido a su

capacidad para producir sideróforos, solubilizar nutrientes, sintetizar metabolitos antimicrobianos y activar mecanismos de defensa inducida en las plantas (Sahu et al., 2022). Por consiguiente, la menor inhibición directa observada en este estudio no debe interpretarse exclusivamente como una menor capacidad de biocontrol, particularmente debido a que el ensayo realizado permitió evaluar principalmente el antagonismo directo entre los microorganismos y el fitopatógeno, pero no otros mecanismos de interacción que podrían expresarse durante la asociación con la planta.

La incorporación de *B. cereus* Amazcala y *P. fluorescens* en los consorcios podría, por tanto, representar una estrategia para integrar funciones biológicas complementarias a las ejercidas por *T. virens*. Mientras que *T. virens* mostró una respuesta inhibitoria directa más evidente frente a *F. oxysporum*, las bacterias podrían contribuir potencialmente mediante mecanismos relacionados con la disponibilidad de nutrientes, la colonización de la rizosfera, la producción de compuestos promotores del crecimiento y la activación de respuestas defensivas en la planta. Sin embargo, con base exclusivamente en los resultados obtenidos en el presente ensayo, no es posible establecer la existencia de un efecto sinérgico entre los integrantes de los consorcios. Para demostrar sinergia sería necesario comparar estadísticamente el efecto de cada microorganismo individual con el de las combinaciones correspondientes y determinar si la respuesta observada en el consorcio excede la esperada a partir de los efectos individuales.

En el caso de *Colletotrichum gloeosporioides*, el patrón de crecimiento irregular observado durante el ensayo representó una limitación para la estimación precisa del porcentaje de inhibición mediante el análisis de imágenes. La ausencia de un crecimiento radial uniforme dificulta la delimitación objetiva del frente micelial y puede introducir variabilidad en las mediciones realizadas mediante herramientas basadas en la distancia o el diámetro de la colonia. En este contexto, el análisis del área total de la colonia constituye una alternativa potencialmente más apropiada para caracterizar el crecimiento de colonias con morfología irregular. Asimismo, podrían incorporarse variables como el área micelial acumulada, la biomasa seca o húmeda y la tasa de crecimiento a lo largo del tiempo, dependiendo de las características del sistema experimental.

En conjunto, los ensayos *in vitro* evidenciaron que *T. virens* presentó la mayor actividad antagonista frente a *F. oxysporum*, tanto en su aplicación individual como en los tratamientos BT, PT y BPT. La respuesta observada respalda el potencial de *T. virens* como agente de biocontrol frente a este fitopatógeno y coincide con la capacidad antagonista previamente descrita para especies de *Trichoderma*. Por su parte, la menor inhibición directa registrada para *B. cereus* Amazcala y *P. fluorescens* no excluye su posible contribución dentro de un sistema de consorcio, debido a que sus funciones potenciales pueden manifestarse principalmente a través de mecanismos de promoción del crecimiento vegetal, adquisición de nutrientes o inducción de respuestas de defensa.

No obstante, los resultados deben considerarse como evidencia preliminar del potencial de las combinaciones microbianas evaluadas. La determinación de una ventaja funcional de los consorcios respecto a *T. virens* aplicado individualmente requiere estudios adicionales que incluyan análisis estadísticos comparativos, evaluación de la compatibilidad y estabilidad de los microorganismos en las formulaciones, caracterización de sus mecanismos de interacción y, particularmente, ensayos *in vivo* bajo condiciones controladas y de producción. Estos estudios permitirían determinar si la combinación de los microorganismos genera un efecto aditivo o sinérgico y si dicho comportamiento se traduce en una mayor supresión de la enfermedad y en un mejor desempeño agronómico de las plantas.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro y al Programa Verano de la Ciencia 2026 por la oportunidad de realizar este proyecto. A la Dra. Monserrat Escamilla García y al Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Química por su orientación y apoyo durante el desarrollo de la investigación. Al Dr. José Ángel Granados Arvizu por su gran apoyo y accesibilidad

Referencias bibliográficas

- [1] A. Y. Bandara and S. Kang, "Trichoderma application methods differentially affect the tomato growth, rhizomicrobiome, and rhizosphere soil suppressiveness against *Fusarium oxysporum*," *Frontiers in Microbiology*, vol. 15, Art. no. 1366690, 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1366690.
- [2] T. Benítez, A. M. Rincón, M. C. Limón, and A. C. Codón, "Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains," *International Microbiology*, vol. 7, no. 4, pp. 249–260, 2004.
- [3] P. Guzmán-Guzmán, A. Kumar, S. de los Santos-Villalobos, F. I. Parra-Cota, M. del C. Orozco-Mosqueda, A. E. Fadji, S. Hyder, O. O. Babalola, and G. Santoyo, "Trichoderma species: Our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review," *Plants*, vol. 12, no. 3, Art. no. 432, 2023, doi: 10.3390/plants12030432.
- [4] G. E. Harman, C. R. Howell, A. Viterbo, I. Chet, and M. Lorito, "Trichoderma species—Opportunistic, avirulent plant symbionts," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 2, no. 1, pp. 43–56, 2004, doi: 10.1038/nrmicro797.
- [5] I. Kulkova, J. Dobrzyński, P. Kowalczyk, G. Belżeczki, and K. Kramkowski, "Plant growth promotion using *Bacillus cereus*," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 11, Art. no. 9759, 2023, doi: 10.3390/ijms24119759.
- [6] M. Mukherjee, P. K. Mukherjee, B. A. Horwitz, C. Zachow, G. Berg, and S. Zeilinger, "Trichoderma–plant–pathogen interactions: Advances in genetics of biological control," *Indian Journal of Microbiology*, vol. 52, no. 4, pp. 522–529, 2012, doi: 10.1007/s12088-012-0308-5.
- [7] F. Satognon and V. Akuku, "Mechanisms of *Pseudomonas* spp. as plant growth promoting rhizobacteria: plant nutrition and biocontrol," *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 119, no. 7, Jun. 2026, doi: 10.1007/s10482-026-02352-4.
- [8] Santoyo, G., Rojas-Sánchez, B., Hernández-Salmerón, J., Hernández-León, R., Rojas-Solis, D., Moreno-Hagelsieb, G., & Del Carmen Orozco-Mosqueda, M. (2025). Outstanding biocontrol and plant growth promotion traits of *Pseudomonas fluorescens* UM270 and other plant-associated *Pseudomonas*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 138, 102672. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2025.102672>
- [9] P. Dutta *et al.*, "Molecular interaction between plants and *Trichoderma* species against soil-borne plant pathogens," *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, Art. no. 1145715, 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1145715.
- [10] A. M. Timofeeva, M. R. Galyamova, and S. E. Sedykh, "Plant growth-promoting bacteria of soil: Designing of consortia beneficial for crop production," *Microorganisms*, vol. 11, no. 12, Art. no. 2864, 2023, doi: 10.3390/microorganisms11122864.
- [11] G. Nickles, I. Ludwikowski, J. W. Bok, and N. P. Keller, "Comprehensive guide to extracting and expressing fungal secondary metabolites with *Aspergillus fumigatus* as a case study," *Current Protocols*, vol. 1, no. 12, Art. no. e321, 2021, doi: 10.1002/cpz1.321.
- [12] S. L. Weaver, L. Zhu, S. Ravishankar, M. Clark, and D. A. Baltrus, "Interspecies killing activity of *Pseudomonas syringae* tailocins," *Microbiology*, vol. 168, no. 11, 2022, doi: 10.1099/mic.0.001258.
- [13] B. H. Camacho-Díaz, A. Jiménez-Aparicio, J. J. Chanona-Pérez, G. Calderón-Domínguez, L. Alamilla-Beltrán, H. Hernández-Sánchez, and G. F. Gutiérrez-López, "Morphological characterization of the growing front of *Rhizopus oligosporus* in solid media," *Journal of Food Engineering*, vol. 101, no. 3, pp. 309–317, 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010..



Hidrogel de garbanzo y jamaica agotada para impresión 3D

Díaz Cano, C. A.; Mendoza Díaz, S. O.^{a, b} y
González Galeana, C.^{a, c}

^a Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química. ^b
smendoza@uaq.mx ^c cgonzalez121@alumnos.uaq.mx

Resumen

La valorización de residuos agroindustriales es una estrategia clave dentro de la economía circular. En este trabajo se desarrolló y caracterizó de forma preliminar un hidrogel de base alimentaria a partir de harina desgrasada de garbanzo (fuente proteica) y cáliz de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) agotado, con el fin de explorar su aplicación como tinta para impresión 3D por extrusión. Las harinas se desengrasaron por extracción Soxhlet con hexano y la proteína se recuperó mediante precipitación en el punto isoeléctrico. Los extractos se evaluaron en su contenido de fenoles totales (Folin-Ciocalteu) y capacidad antioxidante (DPPH). El hidrogel se formuló con goma xantana en medio alcalino (pH 10) y aislado proteico comercial de chícharo como sistema modelo, induciendo la gelificación por acidificación lenta con glucono- δ -lactona (GDL) hasta pH ≈ 4 ; tras congelación y liofilización se obtuvieron estructuras porosas (aerogeles). Como prueba de concepto se verificó la viabilidad de la impresión por extrusión con tintas alimentarias modelo. Los extractos mostraron actividad antioxidante apreciable y se obtuvieron matrices estables, lo que respalda el potencial de estos residuos como insumos para materiales alimentarios funcionales. Se identifican como áreas de mejora la cuantificación dentro del intervalo de calibración y la incorporación directa de las harinas en la tinta imprimible.

Palabras clave: valorización de residuos, hidrogel, garbanzo, jamaica, impresión 3D, antioxidantes.

Abstract

The valorization of agro-industrial residues is a key strategy within the circular economy. In this work, a food-based hydrogel was preliminarily developed and characterized from defatted chickpea flour (protein source) and spent roselle (*Hibiscus sabdariffa*) calyx, aiming to explore its application as an ink for extrusion 3D printing. Flours were defatted by Soxhlet extraction with hexane and protein was recovered by isoelectric-point precipitation. Extracts were evaluated for total phenolic content (Folin-Ciocalteu) and antioxidant capacity (DPPH). The hydrogel was formulated with xanthan gum under alkaline conditions (pH 10) and commercial pea protein isolate as a model system; gelation was induced by slow acidification with glucono- δ -lactone (GDL) to pH ≈ 4 , and porous structures (aerogels) were obtained after freezing and lyophilization. As a proof of concept, the feasibility of extrusion printing was verified using model food inks. Extracts showed appreciable antioxidant activity and stable matrices were obtained, supporting the potential of these residues as inputs for functional food materials. Quantification within the calibration range and the direct incorporation of the flours into the printable ink are identified as areas for improvement.

Keywords: waste valorization, hydrogel, chickpea, roselle, 3D printing, antioxidants.

Introducción

La economía circular busca reducir el desperdicio de alimentos y biorecursos mediante el aprovechamiento de subproductos que suelen tratarse como desecho, empleando procesos de bajo impacto energético [1]. Muchos residuos agroindustriales conservan moléculas de alto valor —proteínas y compuestos fenólicos con actividad antioxidante— cuya recuperación permite obtener ingredientes funcionales [1], [2]. El garbanzo constituye una fuente proteica vegetal accesible, mientras que el cáliz de jamaica agotado, remanente tras la



extracción de sus pigmentos, mantiene compuestos de interés.

Los hidrogeles son redes tridimensionales capaces de retener grandes cantidades de agua y de estructurarse en geometrías definidas [7]. Estas propiedades los hacen candidatos como tintas para la impresión 3D de alimentos por extrusión, donde se requiere un material con la reología adecuada para fluir a través de una boquilla y mantener su forma tras el depósito [6], [7]. En este sentido, se han reportado geles autosoportados formulados con proteínas de chícharo y garbanzo estructuradas con goma xantana [6].

En este contexto, el presente trabajo propone aprovechar harina desgrasada de garbanzo, como aporte proteico, junto con cáliz de jamaica agotado, para formular un hidrogel de base alimentaria con potencial aplicación como tinta imprimible por extrusión, evaluando de manera preliminar sus extractos y la formación de la matriz.

Objetivos

General. Desarrollar y caracterizar de forma preliminar un hidrogel alimentario a partir de harina desgrasada de garbanzo y cáliz de jamaica agotado para su potencial aplicación como tinta en impresión 3D por extrusión.

Específicos. a) Desengrasar las harinas y extraer la fracción proteica por punto isoelectrico; b) evaluar el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante de los extractos; c) formular el hidrogel y obtener estructuras porosas (aerogeles); d) verificar la viabilidad de la impresión por extrusión.

Metodología

Preparación y desengrasado. Las harinas se tamizaron con malla y se desengrasaron por extracción Soxhlet con hexano (relación aproximada 1:10 p/v; punto de ebullición ~69 °C) durante 24 h. El disolvente se recuperó en rotavapor (60 °C, 360 mbar).

Extracción de proteína. La harina desgrasada se dispersó en agua; la proteína se solubilizó a pH 9 (30 min de agitación) y se precipitó en el punto isoelectrico a pH 4 (30 min). La suspensión se centrifugó a 9000 g, 4

°C, 20 min, recuperándose el precipitado proteico y descartando el sobrenadante.

Extracto de jamaica. El cáliz agotado se sometió a extracción acuosa a 100 °C durante 10 min (100 g/L).

Fenoles y capacidad antioxidante. El contenido de fenoles totales se determinó por Folin-Ciocalteu con curva de ácido gálico (lectura a 760 nm) y la capacidad antioxidante por el ensayo de DPPH con Trolox como referencia (lectura a 520 nm, cinética a 30 y 60 min), en lector de placas [3].

Formulación del hidrogel. Se dispersaron 0.15 g de goma xantana en 5 mL de agua desionizada hasta homogeneizar; la mezcla se ajustó a pH 10 con NaOH (descontando el volumen añadido del agua total) y se dejó reposar 24 h. Por separado, se dispersaron 0.15 g de aislado proteico comercial de chícharo (*Pisum sativum*) en 4.5 mL de agua con agitación constante durante 2 h; este aislado se empleó como sistema modelo para establecer la formulación. Se tomaron 500 µL de la dispersión y se adicionaron 35 µL de D-(+)-glucono-δ-lactona (GDL, grado para síntesis), aforando a un volumen final de 10 mL. La GDL induce la gelificación por acidificación lenta [4], [8], verificándose un pH final cercano a 4. Las muestras se congelaron a -5 °C durante 18 h y se liofilizaron durante 48 h, obteniéndose las estructuras porosas (aerogeles).

Impresión 3D (prueba de concepto). Se evaluó la viabilidad de la extrusión empleando tintas alimentarias modelo, con el fin de establecer el sistema de impresión.

Resultados

El contenido de fenoles totales se estimó con la curva de calibración de ácido gálico ($y = 0.0219x - 0.0107$; $R^2 = 0.9962$). Las absorbancias de todas las muestras superaron el último punto de la curva (32 µg/mL), por lo que los valores de la Tabla 1 son indicativos y requieren dilución adicional para su cuantificación definitiva.



Tabla 1. Fenoles totales estimados en los extractos.
*Valores fuera del intervalo de calibración (indicativos).

Muestra	Abs. (760 nm)	Fenoles (μg EAG/mL)*
A1	1.031	47.6
A2	0.901	41.6
A3	1.024	47.2
B1	1.735	79.7
B2	1.324	60.9
B3	1.230	56.6
C1	1.158	53.4
C2	1.707	78.4
C3	1.224	56.4

La capacidad antioxidante por DPPH se expresó como porcentaje de inhibición del radical respecto al control. Los niveles 1, 2 y 3 corresponden a concentraciones decrecientes de cada extracto (no a repeticiones), observándose la relación dosis-respuesta esperada (Tabla 2). La inhibición aumentó ligeramente entre los 30 y 60 min.

Tabla 2. Inhibición del radical DPPH (%) de los extractos a 30 y 60 min.

Muestra	% Inh. 30 min	% Inh. 60 min
A1	80.7	88.3
A2	52.8	60.2
A3	12.6	14.1
B1	72.8	88.2
B2	38.4	43.3
B3	10.1	10.9
C1	86.4	90.6
C2	56.6	61.1
C3	14.2	15.2

Tras la liofilización se obtuvieron discos porosos y homogéneos (Fig. 1), estables al manejo, lo que confirma que la acidificación con GDL indujo la formación de una matriz tridimensional estable.



Fig. 1. Estructuras porosas (aerogeles) obtenidas tras el secado del hidrogel.

En la prueba de extrusión con tintas modelo se lograron trazos y geometrías definidas (Fig. 2), lo que demuestra la viabilidad del sistema de impresión por extrusión sobre el cual se busca incorporar las harinas de residuos.



Fig. 2. Prueba de concepto de impresión por extrusión con tintas alimentarias modelo.

Discusión y conclusiones

Los extractos presentaron actividad antioxidante apreciable, consistente con la presencia de compuestos fenólicos reportada para residuos agroindustriales [1], [2]. La formación de aerogeles estables se atribuye a la gelificación ácida inducida por la GDL, cuya hidrólisis libera ácido glucónico y desciende gradualmente el pH hasta valores próximos al punto isoeléctrico de la proteína (pH 4.0–6.0 para chícharo), reduciendo la repulsión electrostática y favoreciendo su agregación [4], [5], [8]; la liofilización preservó la estructura porosa. La goma xantana actuó como agente estructurante, y la impresión por extrusión resultó viable con tintas modelo, estableciendo la base para incorporar las harinas desarrolladas.

Entre las limitaciones, la cuantificación de fenoles quedó fuera del intervalo de calibración, por lo que se requiere diluir las muestras; el hidrogel se formuló con aislado proteico comercial de chícharo como sistema modelo, por lo que la sustitución por la proteína de garbanzo extraída constituye el siguiente paso; además, la tinta imprimible aún no incorpora directamente las harinas de



garbanzo y jamaica. Como perspectivas se plantea optimizar la formulación, cuantificar dentro de rango, evaluar la capacidad absorbente y retentiva de los aerogeles e imprimir directamente el hidrogel desarrollado.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Micro y Nano Encapsulación, a la Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz, al Dr. Adolfo, a la Dra. Minerva Ramos Gómez y al M. en C. Claudio González Galeana, y a los estudiantes David Angél, Yuliz y Sharone por su apoyo y asesoría durante la estancia.

Referencias

- [1] M. Beaudor, P. Vauchel, D. Pradal, A. Aljawish y V. Phalip, "Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method," *Chem. Eng. Process.*, vol. 188, art. 109358, 2023.
- [2] A. Valdés, M. Castro-Puyana y M. L. Marina, "Isolation of proteins from spent coffee grounds. Polyphenol removal and peptide identification in the protein hydrolysates by RP-HPLC-ESI-Q-TOF," *Food Res. Int.*, vol. 137, art. 109368, 2020.
- [3] R. L. Prior, X. Wu y K. Schaich, "Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, pp. 4290–4302, 2005.
- [4] Y. Wan, Y. Li y S. Guo, "Characteristics of soy protein isolate gel induced by glucono- δ -lactone: Effects of the protein concentration during preheating," *Food Hydrocoll.*, vol. 113, art. 106525, 2021.
- [5] A. C. Alting et al., "Acid-induced cold gelation of globular proteins: Effects of protein aggregate characteristics and disulfide bonding on rheological properties," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 52, pp. 623–631, 2004.
- [6] W. Kim, Y. Wang y C. Selomulya, "Dense mesostructured plant protein gels: Rheology, printability and texture of extrusion-based 3D-printed self-supporting soft gels formulated with pea and chickpea proteins," *Foods*, vol. 15, art. 2394, 2026.
- [7] Y. Chen, M. Zhang y B. Bhandari, "3D printing of gels based on xanthan/konjac gums," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 63, art. 102397, 2020.
- [8] Y. Xu et al., "Influence of chitosan and glucono- δ -lactone on the gel properties, microstructural and textural modification of pea-based tofu-type product," *Processes*, vol. 10, art. 1639, 2022.

Consortio microbiano para el biocontrol de fitopatógenos en jitomate

Kimberly Quintero Mora

Universidad Autónoma de Querétaro

Verano de la Ciencia 2026

Asesora: Dra. Monserrath Escamilla García

kquintero20@alumnos.uaq.mx |

monserrat.escamilla@uaq.edu.mx

Resumen

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) constituye uno de los cultivos agrícolas de mayor importancia económica en México; sin embargo, su producción se ve afectada por diversos fitopatógenos que provocan pérdidas significativas en el rendimiento. En este trabajo se evaluó el potencial de un consorcio microbiano integrado por *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens* como agente de biocontrol frente a *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum gloeosporioides*. Para ello, se realizaron pruebas de confrontación *in vitro* mediante la técnica de sobrecapa de agar suave (*soft agar overlay*), evaluando tratamientos individuales y combinados por quintuplicado. La actividad antagónica fue cuantificada mediante análisis morfométrico digital utilizando el software ImageJ. Los resultados preliminares indicaron mayores porcentajes de inhibición en aquellos tratamientos que incluyeron a *T. virens*, destacando los consorcios BPT, PT y BT. Los hallazgos sugieren que el uso de microorganismos benéficos representa una alternativa sostenible para el control de enfermedades en el cultivo de jitomate, con potencial aplicación en el desarrollo de bioestimulantes microbianos encapsulados.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, biocontrol, PGPM, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Trichoderma virens*, bioestimulante microbiano.

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most economically important agricultural crops in Mexico; however, its production is affected by various phytopathogens that cause significant yield losses. In this study, the potential of a microbial consortium composed of *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala, and *Trichoderma virens* was evaluated as a biocontrol agent against *Fusarium oxysporum* and *Colletotrichum gloeosporioides*. For this purpose, *in vitro* confrontation assays were performed using the soft agar overlay technique, evaluating individual and combined treatments in quintuplicate. Antagonistic activity was quantified through digital morphometric analysis using ImageJ software. Preliminary results showed higher inhibition percentages in treatments that included *T. virens*, particularly in the BPT, PT, and BT consortia. These findings suggest that the use of beneficial microorganisms represents a sustainable alternative for disease management in tomato cultivation, with potential application in the development of encapsulated microbial biostimulants.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, biocontrol, PGPM, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Trichoderma virens*, microbial biostimulant.

Introducción

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) representa uno de los cultivos de mayor relevancia económica y nutricional en México, país que se posiciona como el principal exportador mundial de esta hortaliza. Para el año 2030, se proyecta una producción nacional de

aproximadamente 7.56 millones de toneladas. Además de su valor comercial, es una fuente esencial de vitaminas y compuestos bioactivos como el β -caroteno y el licopeno, los cuales poseen propiedades antioxidantes que contribuyen a la prevención de enfermedades degenerativas en humanos [1].

A pesar de su relevancia, la productividad de este cultivo se enfrenta a desafíos críticos, principalmente la baja disponibilidad de nutrientes y la incidencia de más de 200 plagas y enfermedades que pueden reducir los rendimientos hasta en un 70% [6]. Entre los fitopatógenos más devastadores se encuentran los hongos *Fusarium oxysporum*, causante de la marchitez vascular, y *Colletotrichum gloeosporioides*, responsable de la antracnosis. Tradicionalmente, se ha recurrido al uso excesivo de fertilizantes químicos y pesticidas, lo que ha derivado en la degradación de la calidad del suelo, aumento de la salinidad, contaminación de mantos freáticos y riesgos significativos para la salud [3]. Adicionalmente, estos insumos incrementan los costos de producción, superando los \$36,000 por cada 1000 m² [8].

Ante este panorama, los microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM) surgen como una alternativa sostenible capaz de optimizar la fisiología del cultivo mediante la movilización de nutrientes y la inducción de respuestas de defensa basadas en la hormesis vegetal. Cepas como *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens* han demostrado capacidad para sintetizar fitohormonas, solubilizar fósforo y ejercer actividad antimicrobiana. Considerando el potencial de estos microorganismos, el presente trabajo se enfoca en evaluar la eficacia antagónica de este consorcio microbiano frente a los fitopatógenos mencionados. A través de la implementación de pruebas de confrontación *in vitro* mediante la técnica de sobrecapa de agar suave (*soft agar overlay*), se busca

determinar la capacidad de estas cepas y sus materiales extracelulares para inhibir el crecimiento fúngico. Esta evaluación es un paso fundamental para validar el potencial de biocontrol del consorcio, sentando las bases para el diseño de un bioestimulante que no solo promueva el crecimiento, sino que también actúe como una barrera biológica efectiva y sostenible.

Objetivos

Objetivo general:

Diseñar un bioestimulante a base de un consorcio microbiano encapsulado conformado por *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens* para su potencial aplicación como promotor de crecimiento vegetal.

Objetivos específicos:

1. Evaluar el efecto inhibitorio del consorcio microbiano frente a *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum gloeosporioides*.
2. Realizar pruebas de confrontación *in vitro* mediante la técnica de sobrecapa de agar suave.
3. Cuantificar la actividad antagónica mediante análisis digital de imágenes utilizando ImageJ.

Metodología

1. Material biológico

Las cepas de *P. fluorescens*, *T. virens*, *F. oxysporum* y *C. gloeosporioides* fueron proporcionadas por el Laboratorio de Biotecnología de Alimentos de la Facultad de Química (UAQ). La cepa *B. cereus* Amazcala fue donada por el CIAB de la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala.

Se utilizaron caldo nutritivo (CN), agar nutritivo (AN), caldo papa dextrosa (PDB), agar papa dextrosa (PDA), agar bacteriológico, Tween 80 al 0.1 % y

ácido indolacético como materiales para la activación y evaluación de los microorganismos

2. Activación de microorganismos

Las cepas bacterianas fueron activadas en CN a 37 °C durante tres días, monitoreando su crecimiento mediante mediciones de densidad óptica a 600 nm. [4]. Por su parte, *T. virens* fue cultivado en PDA hasta esporulación, recuperando las esporas mediante solución Tween 80 al 0.1% y cuantificándolas, utilizando una cámara de Neubauer [7].

3. Ensayos de confrontación

Las pruebas de antagonismo se realizaron mediante la técnica de sobrecapa de agar suave (*soft agar overlay*). Los microorganismos benéficos fueron incorporados a una matriz semisólida de PDA suplementada con agar bacteriológico al 0.8%, la cual fue colocada sobre placas base de agar sólido PDA previamente preparadas. Los fitopatógenos fueron inoculados por picadura en el centro de cada placa y el proceso se realizó por quintuplicado para mejorar la confiabilidad y reproducibilidad de las mediciones.

En esta fase experimental, se evaluaron 7 tratamientos específicos, correspondientes a las cepas individuales y sus diversas combinaciones: B (*Bacillus cereus* Amazcala), P (*Pseudomonas fluorescens*), T (*Trichoderma virens*), BP, BT, PT y el consorcio completo BPT [10].

4. Análisis morfométrico

Las placas de confrontación fueron digitalizadas de manera periódica durante un periodo de 2 a 10 días y posteriormente procesadas mediante el software ImageJ 1.34. Para la validación cuantitativa de la inhibición, las imágenes se convirtieron a un formato de 8 bits, permitiendo determinar variables morfológicas críticas asociadas al crecimiento micelial, tales como la circularidad, dimensión fractal

y la longitud de hifas. Este análisis permitió evaluar con precisión el grado de restricción del desarrollo fúngico provocado por los diversos tratamientos del consorcio [5].

5. Análisis estadístico

Los valores obtenidos se utilizaron para calcular la media aritmética y la desviación estándar de cada tratamiento. La actividad antagonista se expresó como porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (%ICM), calculado a partir de la diferencia entre el crecimiento del control y el crecimiento observado en presencia del microorganismo antagonista, de acuerdo con la ecuación:

$$\% ICM = \frac{C - T}{C} \times 100$$

donde C representa el diámetro de crecimiento del fitopatógeno en el control y T el diámetro de crecimiento en el tratamiento correspondiente.

Resultados

Las confrontaciones microbianas mostraron diferencias en la capacidad antagonista de los microorganismos evaluados frente a *Fusarium oxysporum*. Los tratamientos que incluyeron *Trichoderma virens* presentaron los mayores porcentajes de inhibición del crecimiento del fitopatógeno, evidenciando su efecto antagonista y su contribución dentro de los consorcios microbianos evaluados.

A los dos días de confrontación se observó una respuesta inhibitoria temprana en los tratamientos que contenían *T. virens*, mientras que los tratamientos conformados únicamente por *Bacillus cereus* Amazcala o *Pseudomonas fluorescens* mostraron niveles de inhibición más bajos.

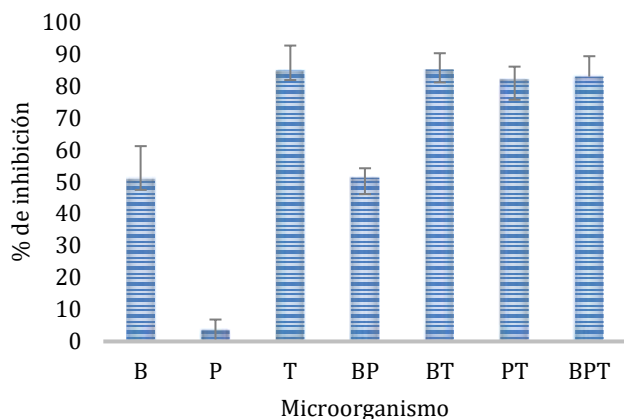


Fig. 1 Porcentaje de inhibición del crecimiento de *Fusarium oxysporum* a los 2 días de confrontación.

Después de diez días de incubación, los consorcios BPT, PT y BT mantuvieron los mayores porcentajes de inhibición, lo que sugiere un efecto favorable de la incorporación de *T. virens* en las combinaciones microbianas evaluadas.

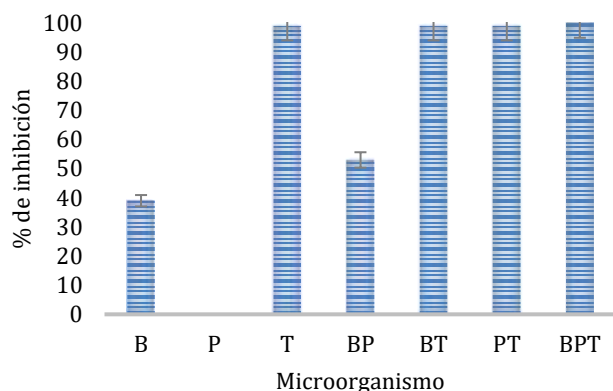


Fig. 2 Porcentaje de inhibición del crecimiento de *Fusarium oxysporum* a los 10 días de confrontación.

Las observaciones visuales de las confrontaciones permitieron corroborar las diferencias en el crecimiento micelial del fitopatógeno entre los tratamientos evaluados. Los tratamientos que incluyeron *Trichoderma virens* mostraron una menor expansión del micelio en comparación con aquellos que no contenían este microorganismo, tanto a los 2 como a los 10 días de incubación. Este

comportamiento coincide con los porcentajes de inhibición obtenidos y respalda el potencial de *T. virens* como componente clave dentro de los consorcios microbianos propuestos para el desarrollo de un bioestimulante con capacidad de biocontrol en el cultivo de jitomate.

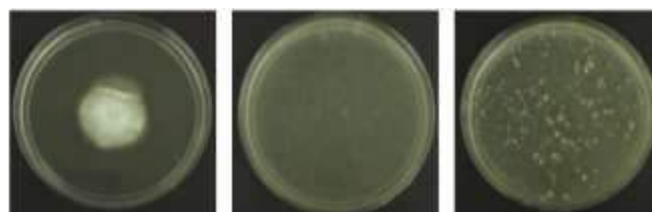


Fig. 3

a)

b)

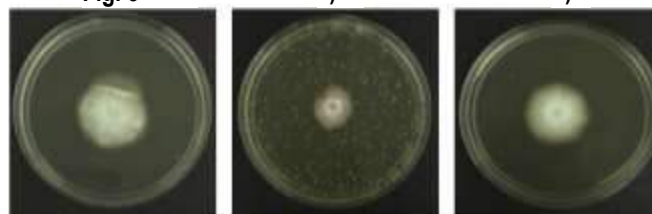


Fig. 4

c)

d)



Fig. 5

a)

b)



Fig. 6

c)

d)

Fig. 3 y 4. Confrontaciones microbianas a los 2 días de incubación. (a) BT, (b) BPT, (c) B, (d) P

Fig. 5 y 6. Confrontaciones microbianas a los 10 días de incubación. (a) BT, (b) BPT, (c) B, (d) P

En el caso de *Colletotrichum gloeosporioides*, el crecimiento se presentó de manera irregular y no homogénea sobre la superficie del medio de cultivo, lo que dificultó la medición precisa del crecimiento

micelial y, por consiguiente, la cuantificación del porcentaje de inhibición.

Discusión y conclusión

Los resultados obtenidos confirman que *Trichoderma virens* fue el componente determinante de la actividad antagonista del consorcio frente a *Fusarium oxysporum*, ya que su presencia se asoció consistentemente con los mayores porcentajes de inhibición del crecimiento micelial. Este comportamiento es congruente con los mecanismos de acción ampliamente descritos para especies del género *Trichoderma*, que combinan micoparasitismo directo, competencia por espacio y nutrientes, y producción de metabolitos antifúngicos (enzimas líticas y compuestos volátiles), lo que explicaría tanto la rapidez de la respuesta inhibitoria observada a los dos días como su persistencia hasta el día diez de confrontación.

En contraste, los tratamientos individuales con *Bacillus cereus* Amazcala o *Pseudomonas fluorescens* mostraron una capacidad antagonista menor. Esto no necesariamente indica un menor potencial como PGPM, sino que sugiere que su contribución principal podría estar más orientada a la promoción del crecimiento vegetal (solubilización de fósforo, síntesis de fitohormonas) que a la inhibición directa por confrontación en placa. Su efecto podría potenciarse al integrarse con *T. virens* dentro de los consorcios BT, PT y BPT, aunque, dado que no se realizaron pruebas estadísticas de comparación entre tratamientos, esta posible sinergia debe interpretarse como una tendencia observada y no como un efecto sinérgico estadísticamente confirmado.

Por otro lado, la imposibilidad de cuantificar con precisión el porcentaje de inhibición en *Colletotrichum gloeosporioides* representa una limitante metodológica relevante. El crecimiento irregular y no homogéneo de este fitopatógeno sobre

el medio de cultivo dificultó la delimitación morfométrica mediante ImageJ, lo cual sugiere la necesidad de ajustar el enfoque analítico.

En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de *T. virens*, en combinación con *B. cereus* Amazcala y *P. fluorescens*, como base para el desarrollo de un bioestimulante microbiano con actividad de biocontrol, consistente con la búsqueda de alternativas sostenibles frente al uso excesivo de agroquímicos en el cultivo de jitomate.

En conclusión, los resultados obtenidos evidencian que *Trichoderma virens* es el microorganismo con mayor capacidad antagonista dentro del consorcio evaluado, siendo un componente clave en los tratamientos BPT, PT y BT, los cuales presentaron los porcentajes de inhibición más altos frente a *Fusarium oxysporum* tanto a los 2 como a los 10 días de confrontación. Estos hallazgos validan, de manera preliminar, el potencial biocontrolador del consorcio microbiano compuesto por *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* Amazcala y *Trichoderma virens*, y sientan las bases metodológicas para el diseño de un bioestimulante microbiano encapsulado con doble función: promoción del crecimiento vegetal y protección biológica frente a fitopatógenos [2].

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro y al Programa Verano de la Ciencia 2026 por la oportunidad de realizar este proyecto. A la Dra. Monserrath Escamilla García y al Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Química por su orientación y apoyo durante el desarrollo de la investigación. A la tesista Ilse Arteaga Rodríguez y a todo el equipo de trabajo por su colaboración y enseñanza, así como a los compañeros del programa por las experiencias compartidas a lo largo de la estancia.

Referencias

- [1] M. Y. Ali, A. A. I. Sina, S. S. Khandker, E. H. Neesa, M. M. Tanvir, M. S. Kabir, M. Khalil y M. I. Gan, “Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Tomatoes and Their Impact on Human Health and Disease: A Review,” *Foods*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [2] M. Ali, J. Cybulska, M. Frąc y A. Zdunek, “Application of Polysaccharides for the Encapsulation of Beneficial Microorganisms for Agricultural Purposes: A Review,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 244, 2023.
- [3] P. Ataei, H. Karimi, C. A. Klöckner, S. M. M. Sadeghi y M. A. Mahmoudi, “The Promotion of Biofertilizer Application on Farms: Farmers’ Intentional Processes,” *Environmental Technology & Innovation*, vol. 28, 2022.
- [4] F. Breidt y A. Anthony, “Microtiter Plate Microbial Growth Measurements,” *protocols.io*, 2024.
- [5] B. H. C. Díaz, A. J. Aparicio, J. J. Chanona-Pérez, G. F. Gutiérrez-López y J. M. Velázquez-del Valle, “Morphological Characterization of the Growing Front of *Rhizopus oligosporus* in Solid Media,” *Journal of Food Engineering*, vol. 101, no. 3, pp. 309-317, 2010.
- [6] M. Miranda Arámbula y R. Reyes Chilpa, “Potencial de plantas productoras de aleloquímicos con aplicación plaguicida en cultivos de jitomate en el estado de Tlaxcala,” Repositorio UNAM, 2021.
- [7] G. Nickles, I. Ludwikoski, J. W. Bok y N. P. Keller, “Comprehensive Guide to Extracting and Expressing Fungal Secondary Metabolites: *Aspergillus fumigatus* as a Case Study,” *Current Protocols*, vol. 1, no. 12, 2021.
- [8] R. Ramírez Ruiz, “Diseño de una estrategia de gestión de la innovación en la producción de jitomate en invernadero en Amacuitlapilco, Jonacatepec, Mor.,” Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, 2021.
- [10] S. L. Weaver, L. Zhu, S. Ravishankar, D. A. Pierson y M. M. Sundin, “Interspecies Killing Activity of *Pseudomonas syringae* Tailocins,” *Microbiology*, vol. 168, no. 11, 2022.

Suero lácteo: de subproducto a fuente de fibra prebiótica mediante ultrasonido

Ramírez Arteaga Daniela, Herrera Miguel Arturo, Abadía García Lucía Guadalupe
Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química

lucia.abadia@uaq.com

dramirez126@alumnos.uaq.mx

Resumen

El presente trabajo aborda la valorización del suero lácteo ácido, subproducto de la industria del yogurt griego, para la producción de galactooligosacáridos (GOS) mediante síntesis enzimática asistida por ultrasonido, bajo un enfoque de bioeconomía circular. El objetivo consistió en el acondicionamiento y caracterización del suero para su uso como sustrato en la reacción de transgalactosilación. La metodología incluyó la elaboración de yogurt griego, seguida de una caracterización fisicoquímica y un pretratamiento exhaustivo para la remoción de proteínas mediante ultrafiltración (5,000 Da) y de calcio mediante ajuste de pH a 7.2 y tratamiento térmico.

Los resultados mostraron un suero inicial con un pH promedio de 4.44, 5.66 g/L de proteína y 37.4 g/L de azúcares reductores. Tras el pretratamiento, se lograron recuperar 2,143 mL de permeado de suero estandarizado, con el cual se iniciaron las reacciones de síntesis utilizando una sonda de ultrasonido (20 kHz) y β -galactosidasa de *K. lactis*.

Palabras clave: Suero lácteo ácido, galactooligosacáridos, ultrasonido, ultrafiltración.

Abstract

This work addresses the valorization of acid whey, a byproduct of the Greek yogurt industry, for the production of galactooligosaccharides (GOS) via ultrasound-assisted enzymatic synthesis under a circular bioeconomy approach. The objective was to condition and characterize the whey as a substrate for the transgalactosylation reaction. The

methodology involved Greek yogurt production followed by physicochemical characterization and an exhaustive pretreatment for protein removal via ultrafiltration (5,000 Da) and calcium removal through pH adjustment to 7.2 and heat treatment.

Results showed an initial whey with an average pH of 4.44, 5.66 g/L of protein, and 37.4 g/L of reducing sugars. Following pretreatment, 2,143 mL of standardized whey permeate were recovered, which was then used to initiate synthesis reactions using an ultrasound probe (20 kHz) and *K. lactis* β -galactosidase.

Keywords: Acid whey, galactooligosaccharides, ultrasound, ultrafiltration.

Introducción

La industria láctea ha experimentado un crecimiento significativo debido a la demanda de alimentos que promueven la salud, destacando el yogurt griego por su alto contenido proteico. Sin embargo, su producción genera grandes volúmenes de suero lácteo ácido como subproducto; se estima que por cada kilogramo de yogurt griego se obtienen aproximadamente 2 kg de este residuo. El descarte del suero ácido representa un grave desafío ambiental debido a su bajo pH y su alta demanda bioquímica de oxígeno, lo que lo hace inviable para su eliminación directa en el ambiente sin un tratamiento previo. Las estrategias actuales, como su uso en dietas animales o fertilizantes, enfrentan limitaciones críticas como la saturación de suelos y la intolerancia a la lactosa en animales adultos.

Ante esta problemática, surge la necesidad de valorizar este subproducto bajo los principios de la bioeconomía circular, transformando sus componentes en ingredientes de alto valor agregado. La lactosa presente en el suero puede ser convertida en galactooligosacáridos mediante una reacción enzimática de transgalactosilación catalizada por la enzima β -galactosidasa. Los GOS son carbohidratos no digeribles reconocidos como prebióticos que estimulan selectivamente el crecimiento de la microbiota intestinal benéfica. Para mejorar la eficiencia de esta síntesis, el uso de ultrasonido de alta intensidad se presenta como una tecnología emergente capaz de incrementar la actividad enzimática y los rendimientos de producción.

El propósito de esta investigación es desarrollar un yogurt griego simbiótico mediante la incorporación de los GOS producidos a partir del suero ácido, utilizando además la cepa probiótica *Lactiplantibacillus plantarum*. Esta bacteria es valorada por su adaptabilidad y su capacidad para producir metabolitos bioactivos como los ácidos lactatos, los cuales poseen propiedades antimicrobianas e inmunomoduladoras. La importancia de este trabajo radica en que no solo propone una solución sostenible para un residuo industrial, sino que también aborda el vacío de conocimiento sobre las interacciones metabólicas entre prebióticos y probióticos en matrices lácteas complejas.

Objetivo

Desarrollar un yogurt griego simbiótico mediante la optimización y caracterización estructural de galactooligosacáridos (GOS) obtenidos de suero lácteo ácido a través de síntesis enzimática asistida por ultrasonido desde el acondicionamiento del sustrato y la caracterización de la fibra producida, hasta la evaluación de la interacción simbiótica con *Lactiplantibacillus plantarum* y la validación de la calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial del producto final durante su almacenamiento.

Metodología

Elaboración de yogurt griego

Se utilizó un volumen total de 6,520 mL de leche pasteurizada descremada comercial. La base láctea fue sometida a un tratamiento térmico de 85 °C durante 5 min, seguido de un enfriamiento hasta alcanzar los 45 °C.

En este punto, se realizó la inoculación con cultivos lácteos comerciales (*Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) conforme a las especificaciones del fabricante. La mezcla se incubó por un periodo de 5 horas hasta que el producto alcanzó un pH aproximado de 4.4, momento en el cual se trasladó a refrigeración para detener la fermentación.

Para la obtención del yogurt concentrado y el suero lácteo ácido, el yogurt fue drenado mediante filtración con tela de manta. Al finalizar esta etapa, se cuantificó un rendimiento de 2,920 mL de yogurt griego y la generación de 3,600 mL de suero lácteo ácido como subproducto. El suero recolectado se almacenó en congelación para su

posterior caracterización y uso en la síntesis de GOS.

Caracterización de suero lácteo ácido

La caracterización fisicoquímica se realizó por triplicado para establecer la línea base del sustrato previo a su procesamiento. El pH se determinó siguiendo el método potenciométrico establecido en la norma NMX-F-317-NORMEX-2013, utilizando un potenciómetro calibrado con soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10. Los resultados mostraron un valor promedio de 4.44. La acidez titulable se cuantificó mediante titulación alcalimétrica conforme a la NOM-243-SSA1-2010, obteniendo un promedio de 0.55% expresado como ácido láctico.

Para la determinación de proteínas totales, se empleó el método de Bradford, basado en la unión de colorante a proteínas. Se construyó una curva de calibración utilizando albúmina de suero bovino como estándar, determinando una concentración proteica promedio de 5.66 g/L. Finalmente, el contenido de azúcares reductores (lactosa) se midió mediante la técnica del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS). A partir de una curva de calibración, se estableció una concentración promedio de 37.4 g/L de lactosa disponible para la reacción. Adicionalmente, el análisis de sólidos totales y humedad arrojó valores promedio de 6.35% y 93.65%, respectivamente.

Ultrafiltración de suero lácteo

El pretratamiento del suero comenzó con la remoción de caseínas residuales mediante un proceso de centrifugación a 10,000 rpm durante 30 min a 4 °C. Posteriormente, se llevó a cabo la ultrafiltración utilizando una unidad de separación de membrana en placa GE modelo SEPA CF equipada con una membrana de polietilensulfona (PES) con un corte de 5,000 Da.



Imagen 1. Unidad de ultrafiltración tangencial

El sistema operó a una presión controlada menor a 2 bar para recuperar el permeado libre de proteínas. De un volumen total de suero, se sometieron a este proceso 2,360 mL, logrando recuperar satisfactoriamente 2,143 mL de permeado de suero. Para prevenir la inactivación de la enzima β -galactosidasa en etapas posteriores, se procedió a la remoción de calcio. El pH del permeado se ajustó a 7.2 con NaOH 0.1 N y se sometió a un tratamiento térmico de 80 °C por 30 min para inducir la precipitación del mineral. El precipitado se eliminó mediante centrifugación a 6,000 rpm por 30 min y filtración por gravedad. Finalmente, el medio se estandarizó ajustando el pH a 6.5 y se elevó la concentración de lactosa al 27% mediante la adición de lactosa pura. Previo a la síntesis asistida por ultrasonido, el permeado se calentó a 90 °C para asegurar la solubilidad de la lactosa y se enfrió a 40 °C para la adición enzimática.

Síntesis de Galactooligosacáridos

La síntesis enzimática de GOS se llevó a cabo utilizando como sustrato el permeado de suero lácteo estandarizado a una concentración de lactosa del 27 % y un pH de 6.5. La reacción se realizó en un volumen de 150 mL empleando la enzima β -galactosidasa de *K. lactis* con una actividad enzimática de 6 U/mL.

El proceso fue asistido mediante un sonicador de sonda de alta intensidad de 500W y 20 kHz equipado con una punta de titanio de 13 mm de diámetro. La temperatura de reacción se mantuvo constante a 40 °C mediante un termobañó, y el ultrasonido se aplicó con un ciclo de pulsos 3 s de encendido por 27 s de apagado. Para la optimización del rendimiento, se siguió un diseño de superficie de respuesta central compuesto evaluando tres niveles de amplitud ultrasónica 20, 30 y 40 % y tiempos de sonicación de 90, 120 y 150 minutos.

Durante la cinética de reacción, se recolectaron alícuotas de 2 mL por triplicado en intervalos de tiempo de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min. Inmediatamente después del muestreo, la actividad enzimática se detuvo mediante inactivación térmica a 100 °C durante 5 min en baño de agua en ebullición. Las muestras preparadas se almacenaron en congelación para su posterior cuantificación de GOS y azúcares residuales

mediante Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC).

Resultados

A partir de un volumen inicial de 6,520 mL de leche, se obtuvo un rendimiento de 2,920 mL de yogurt griego y un excedente de 3,600 mL de suero lácteo ácido. Tras el proceso de pretratamiento, se sometieron 2,360 mL de suero a ultrafiltración, logrando recuperar satisfactoriamente 2,143 mL de permeado de suero estandarizado, el cual sirvió como base para las reacciones de síntesis enzimática.

La caracterización del suero se realizó por duplicado para asegurar la homogeneidad del sustrato. Los análisis fisicoquímicos arrojaron un pH promedio de 4.44 y una acidez titulable del 0.55%. Los resultados detallados de la composición se presentan en la Tabla 1.

Rendimiento (%)	55.21
pH	4.445
Acidez titulable (%)	0.5525
Proteínas (g/L)	5.665
Azúcares reductores (g/L)	37.4
Sólidos totales (%)	6.35
Humedad (%)	93.65

Tabla 1. Caracterización de suero lácteo ácido

En cuanto a la composición nutricional del suero ácido, se determinó una concentración promedio de proteína de 5.66 g/L mediante el método de Bradford y una concentración de azúcares reductores (lactosa) de 37.4 g/L mediante la técnica de DNS.

Los resultados de composición se validaron mediante el análisis de regresión de las curvas de calibración (figuras 1 y 2). La curva de Bradford para la determinación de proteínas mostró una ecuación de la recta $y = 0.3813x + 0.0018$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9958$. Por su parte, la curva de DNS para el análisis de

lactosa presentó la ecuación $y = 0.3545x - 0.0309$ con un $R^2 = 0.9945$

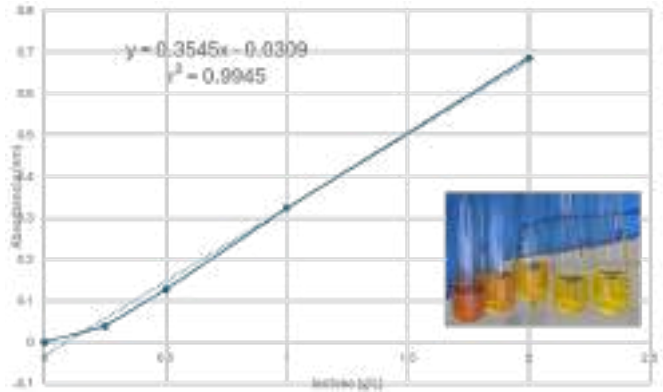


Figura 1.Determinación de azúcares reductores por método DNS

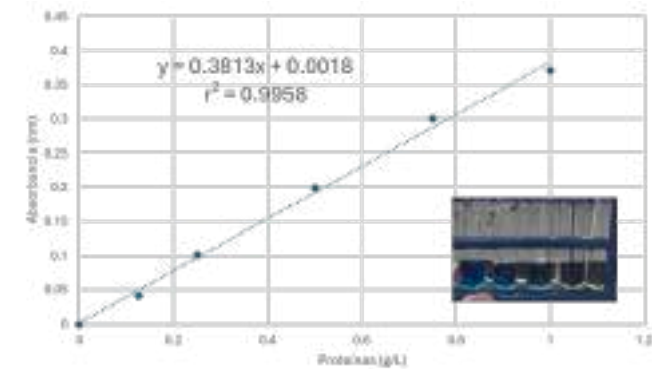


Figura 2. Determinación de proteínas por método de Bradford

Posteriormente se validó la actividad de la β -galactosidasa comercial mediante la hidrólisis de *o*-nitrofenil- β -D-galactopiranosido (*o*-NPG). Para la cuantificación del *o*-nitrofenol (*o*-NP) liberado empleando una curva de calibración lineal (figura 3) que presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9958$.

Los ensayos experimentales por triplicado mostraron una concentración promedio de 1.96 mM de *o*-NP, lo que corresponde a una actividad total de 0.324 U bajo las condiciones de incubación de 40 °C por 10 min. Se determinó que los con 100 μ L de enzima empleada se logró una conversión del sustrato del 95.2% y se estableció una dosificación de enzima de 6 U/mL para el volumen de reacción de 150 mL en los experimentos de síntesis asistida por ultrasonido. Para este cálculo, se utilizó un valor conservador de 2080 U/g basado en la actividad especificada por el fabricante (≥ 2600 U/g).

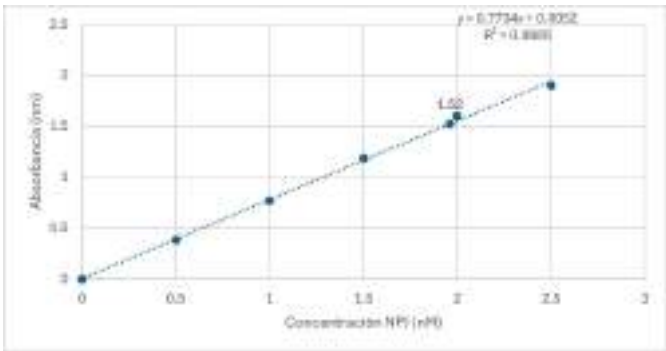


Figura 3. Curva de calibración de la actividad de la galactosidasa

Absorbancia (nm)	1.52
O-NP (mM)	1.96
O-NP (μ M)	3.236
Unidades enzimáticas (U)	0.32
Actividad enzimática (U/mL)	3.24
Conversión del sustrato (%)	95.2

Tabla 2. Determinación actividad enzimática b-galactosida

Discusión

Los resultados obtenidos permitieron confirmar que el subproducto generado durante la elaboración de yogurt griego corresponde a un suero lácteo ácido con características adecuadas para su aprovechamiento como materia prima en procesos de síntesis enzimática. A partir de 6,520 mL de leche se obtuvieron 2,920 mL de yogurt y 3,600 mL de suero, con un rendimiento de 55.21 %. El volumen generado evidencia la importancia de buscar alternativas para valorizar este subproducto, debido a su contenido de compuestos de interés, principalmente lactosa y proteínas. El suero presentó un pH de 4.45 y una acidez titulable de 0.55 %, características relacionadas con la acidificación empleada durante la elaboración del yogurt. Además, presentó 37.4 g/L de azúcares reductores, 5.66 g/L de proteínas y 6.35 % de sólidos totales, lo que confirma la presencia de componentes aprovechables. En particular, la concentración de lactosa representa una fuente importante de sustrato para procesos de transformación enzimática orientados a la producción de galactooligosacáridos (GOS). Por otra parte, el contenido de proteínas hizo necesario acondicionar el suero antes de la síntesis para

disminuir posibles interferencias durante la reacción.

El pretratamiento y la ultrafiltración permitieron obtener un sustrato más adecuado para los ensayos enzimáticos. De los 2,360 mL de suero procesados se recuperaron 2,143 mL de permeado, correspondiente a una recuperación de 90.8 %, lo que demuestra una recuperación elevada del sustrato y permite disponer de una fracción con menor cantidad de componentes de mayor tamaño molecular, principalmente proteínas.

La confiabilidad de la caracterización se respaldó mediante las curvas de calibración de Bradford y DNS ($R^2=0.9958$), indicando una elevada linealidad en el intervalo analizado. Asimismo, la actividad de la β -galactosidasa fue evaluada mediante la hidrólisis de o-NPG. Se obtuvo una concentración promedio de 1.96 mM de o-nitrofenol, equivalente a una actividad de 0.324 U bajo las condiciones de 40 °C durante 10 minutos. La conversión del sustrato fue de 95.2 %, por lo que se estableció una dosificación de 6 U/mL para las reacciones de síntesis en un volumen de 150 mL, utilizando un valor conservador de 2,080 U/g basado en la actividad indicada por el fabricante ($\geq 2,600$ U/g).

La elevada conversión obtenida demuestra que la enzima presentó una actividad adecuada bajo las condiciones evaluadas; sin embargo, debe considerarse que el o-NPG no es lactosa, por lo que este resultado no representa directamente la conversión de lactosa ni permite asegurar el rendimiento de GOS. No obstante, el ensayo permitió comprobar la actividad de la enzima y establecer una dosificación experimental para las etapas posteriores.

En conjunto, la caracterización, el pretratamiento y la ultrafiltración permitieron obtener un suero con características adecuadas para su utilización como sustrato enzimático. Finalmente, el aprovechamiento de los 3,600 mL de suero generados a partir de 6,520 mL de leche representa una alternativa para transformar un subproducto de la industria láctea en una materia prima de mayor valor. Su utilización para la síntesis de GOS contribuye al aprovechamiento integral de la leche, a la reducción de residuos y al enfoque de economía circular planteado en el proyecto.

Conclusión

Este proyecto demostró la viabilidad del aprovechamiento del suero lácteo ácido como sustrato para procesos de síntesis enzimática de compuestos de mayor valor agregado. Su caracterización y acondicionamiento mediante ultrafiltración permitieron obtener un permeado adecuado para las etapas posteriores, con una recuperación del 90.8 % de la materia prima.

La evaluación de la β -galactosidasa confirmó su actividad, alcanzando una conversión de 95.2 % de o-NPG, lo que permitió establecer una dosificación inicial de 6 U/mL para los ensayos de síntesis asistida por ultrasonido.

Estos resultados establecen las bases experimentales para la síntesis y cuantificación de galactooligosacáridos (GOS). La continuidad del proyecto permitirá determinar el potencial prebiótico del producto obtenido y su aplicación en el desarrollo de un yogurt griego funcional, contribuyendo simultáneamente a la valorización del suero lácteo y a un modelo de economía circular en la industria láctea.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro que mediante la Secretaría de Investigación y Posgrado me permitió participar en este proyecto a través del programa “25° Verano de la Ciencia UAQ 2026”. De igual manera, un agradecimiento a la Dra. Lucía Guadalupe Abadía García y al alumno de la maestría en ciencia y tecnología de alimentos Arturo Herrera Miguel por haberme brindado los recursos y la confianza para participar y aprender de su proyecto e investigaciones.

Referencias bibliográficas

M. M. Bradford, “A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding”, *Analytical Biochemistry*, Vol. 72, Issue 1, pp. 248-254, 1976.

L. H. Castrejón, “Efecto del ultrasonido en la producción y rendimiento de galactooligosacáridos a partir de suero ácido de yogurt griego y de una solución de lactosa utilizando la β -galactosidasa de *Kluyveromyces lactis* libre e inmovilizada”, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Qro., México, 2023.

A. Córdova, P. Henríquez, H. Nuñez, et al., “Recent advances in the application of enzyme processing

assisted by ultrasound in agri-foods: a review”, *Catalysts*, Vol. 12, No. 1, 107, 2022.

A. Córdova, C. Astudillo-Castro, P. Henriquez, et al., “Ultrasound-assisted enzymatic synthesis of galacto-oligosaccharides using native whey with two commercial β -galactosidases: *Aspergillus oryzae* and *Kluyveromyces var. lactis*”, *Food Chemistry*, Vol. 426, 136526, 2023.

F. González-Cataño, L. Tovar-Castro, E. Castaño-Tostado, et al., “Improvement of covalent immobilization procedure of β -galactosidase from *Kluyveromyces lactis* for galactooligosaccharides production: Modeling and kinetic study”, *Biotechnology Progress*, Vol. 33, No. 6, pp. 1568–1578, Nov. 2017..

G. L. Miller, “Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar”, *Analytical Chemistry*, Vol. 31, pp. 426-428, 1959.

R. K. Robinson, J. A. Lucey, and A. Y. Tamime, “Manufacture of yoghurt”, en *Fermented milks*, pp. 53–75, 2006.

Secretaría de Economía, “Alimentos - Determinación de pH en Alimentos y Bebidas No Alcohólicas - Método Potenciométrico”, NMX-F-317-NORMEX-2013, México, 2013.

Secretaría de Economía, “Yogurt-Denominación, especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas, información comercial y métodos de prueba”, Norma Oficial Mexicana NOM-181-SCFI-2010, Diario Oficial de la Federación, 2010.

Secretaría de Salud, “Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba”, NOM-243-SSA1-2010, Diario Oficial de la Federación, 2010