

ESTUDIOS

Crio-concentración de *berries* ricos en antocianinas: innovación funcional para la prevención de la diabetes en Centroamérica¹

Carlos Daniel Fuentes España²

Resumen. El estudio analiza el potencial de la crioconcentración como estrategia tecnológica para valorizar *berries* centroamericanos ricos en antocianinas, particularmente *Rubus spp.*, en el desarrollo de alimentos funcionales con efecto antidiabético. Mediante una simulación computacional basada en modelos matemáticos de optimización (SQP) en MATLAB®, se proyectó el comportamiento fisicoquímico y textural de geles alimentarios enriquecidos con crioconcentrados, utilizando datos experimentales de referencia del fruto maqui (*Aristotelia chilensis*). Los resultados evidencian incrementos en sólidos solubles, estabilidad estructural y capacidad inhibitoria de enzimas digestivas asociadas a la glucosa, demostrando la factibilidad de transferir el modelo al contexto centroamericano. El trabajo propone una ruta de innovación agroalimentaria orientada al fortalecimiento de la seguridad nutricional, el valor agregado rural y la integración económica regional bajo los pilares de sostenibilidad, salud pública y cooperación científica del SICA.

Palabra clave: *Crioconcentración; antocianinas; alimentos funcionales; Rubus spp.; modelo de simulación; integración regional; SICA; Centroamérica.*

Fecha de recepción: 5 de abril de 2026.

Fecha de admisión definitiva: 24 de abril de 2026.

¹ El artículo fue revisado por los evaluadores del Call for Paper 2025 organizado por SICA, SIECA y BCIE, obteniendo el segundo lugar del Certamen. En el siguiente link se explica el procedimiento del concurso: <https://www.sieca.int/call-for-papers-2025/>

² Banco Centroamericano de Integración Económica, carlosdanielfuentespana@gmail.com,

Cryo-concentration of berries rich in anthocyanins: functional innovation for the prevention of diabetes in Central America

Abstract: This study analyzes the potential of freeze concentration as a technological strategy to enhance the value of Central American berries rich in anthocyanins, particularly *Rubus spp.*, for developing functional foods with antidiabetic effects. A computational simulation based on mathematical optimization models (SQP) implemented in MATLAB® was conducted to project the physicochemical and textural behavior of hydrocolloid gels enriched with cryoconcentrates, using experimental reference data from maqui (*Aristotelia chilensis*). The results showed increases in soluble solids, structural stability, and inhibitory activity of digestive enzymes related to glucose metabolism, demonstrating the feasibility of transferring the model to the Central American context. The research proposes an agro-food innovation pathway aimed at strengthening nutritional security, rural value-added chains, and regional economic integration under the SICA pillars of sustainability, public health, and scientific cooperation.

Keywords: *Freeze concentration, anthocyanins, functional foods, Rubus spp., simulation model, Central America, regional integration, SICA.*

Cryoconcentration de baies riches en anthocyanes : une innovation fonctionnelle pour la prévention du diabète en Amérique centrale

Résumé : Cette étude analyse le potentiel de la cryoconcentration en tant que stratégie technologique visant à valoriser les baies d'Amérique centrale riches en anthocyanes, en particulier les espèces *Rubus*, dans le cadre du développement d'aliments fonctionnels à effet antidiabétique. À l'aide d'une simulation informatique basée sur des modèles mathématiques d'optimisation (SQP) dans MATLAB®, le comportement physico-chimique et textural de gels alimentaires enrichis en cryoconcentrés a été modélisé, en utilisant des données expérimentales de référence issues du fruit maqui (*Aristotelia chilensis*). Les résultats mettent en évidence une augmentation des solides solubles, de la stabilité structurelle et de la capacité inhibitrice des enzymes digestives associées au glucose, démontrant ainsi la faisabilité d'un transposé du modèle au contexte centraméricain. Ce travail propose une voie d'innovation agroalimentaire visant à renforcer la sécurité nutritionnelle, la valeur ajoutée rurale et l'intégration économique régionale, en s'appuyant sur les piliers de la durabilité, de la santé publique et de la coopération scientifique du SICA.

Mots clés : *Cryoconcentration, anthocyanes, aliments fonctionnels, Rubus spp., modèle de simulation, intégration régionale, SICA, Amérique centrale.*

I. Introducción

La prevalencia creciente de enfermedades metabólicas no transmisibles, como la diabetes tipo II y las dislipidemias, constituye uno de los principales desafíos de salud pública en la región del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). Alrededor del 10 % de la población adulta presenta diagnóstico de diabetes o

prediabetes, situación asociada a hábitos alimentarios poco saludables y a la limitada disponibilidad de alimentos funcionales desarrollados localmente. En este contexto, la innovación tecnológica en el sector agroalimentario se posiciona como una herramienta clave para fortalecer la integración social, económica y sanitaria de la región. La criocentración se presenta como una alternativa tecnológica emergente para aumentar el valor agregado de frutas ricas en antocianinas, mejorando su estabilidad y potencial funcional. En América Central, especies del género *Rubus spp.* (moras nativas) poseen una composición fenólica comparable a la del maqui (*Aristotelia chilensis*), reconocido por su alto contenido de delfinidinas con efecto hipoglucemiante.

Sin embargo, su aprovechamiento industrial es limitado por la falta de innovación tecnológica y de mecanismos de transferencia de conocimiento. Este estudio propone un modelo de simulación matemática basado en optimización (SQP) para evaluar el comportamiento de criocentrados aplicados en geles alimentarios, como herramienta para diseñar alimentos funcionales adaptados a la realidad productiva regional. La investigación busca aportar evidencia científica y tecnológica que fortalezca la seguridad nutricional, la competitividad rural y la integración económica centroamericana, en coherencia con los pilares de sostenibilidad y salud pública promovidos por el SICA.

2. Marco Teórico

En América del Sur, el fruto maqui (*Aristotelia chilensis*), rico en delfinidinas, ha mostrado resultados promisorios en la formulación de geles y alimentos funcionales con efecto antidiabético. Este berry ha despertado interés en las industrias alimentaria y farmacéutica por sus propiedades funcionales, que incluyen efectos antiglicémicos, antioxidantes, cardioprotectores y antidepresivos (Vega-Galvez et al., 2021). La criocentración es una tecnología emergente que permite obtener concentrados naturales ricos en compuestos bioactivos, preservando la calidad sensorial y funcional de los jugos frutales (Bastías-Montes et al., 2019). Este proceso, basado en la separación del hielo durante la congelación controlada, concentra sólidos solubles, ácidos orgánicos, polifenoles y antocianinas sin recurrir a altas temperaturas, evitando la degradación de antioxidantes sensibles (Guerra-Valle et al., 2021; Orellana-Palma, Petzold, Andana, et al., 2017; Orellana-Palma, Petzold, Guerra-Valle, et al., 2017; Vidal-San Martín et al., 2021; Zielinski et al., 2019). En consecuencia, en comparación con las tecnologías de concentración tradicionales como la evaporación, la criocentración reduce los costos de energía al evitar la interfaz vapor/líquido (Cochachin-Carrera et al., 2023). El verdadero potencial de esta tecnología radica en su transferencia

hacia la región centroamericana, donde existen berries y frutas pigmentadas con perfiles fitoquímicos similares, tales como la mora (*Rubus spp.*), la frambuesa (*Rubus idaeus*), la zarzamora, el arándano (*Vaccinium spp.*), la fresa (*Fragaria ananassa*), la pitahaya (*Hylocereus spp.*) y el nance (*Byrsonima crassifolia*). Los hidrocoloides son polímeros muy utilizados en la industria alimentaria por sus propiedades gelificantes, texturizantes y rápida digestibilidad. Los hidrogeles comerciales suelen contener un alto contenido calórico debido al uso de edulcorantes tradicionales como la sacarosa, algunos investigadores han propuesto edulcorantes bajos en calorías como el sorbitol, la isomaltosa y la stevia como opciones viables para dietas hipocalóricas enfocadas a la prevención de enfermedades cardiovasculares como la diabetes mellitus.

3. Materiales y métodos

3.1. Simulación de resultados a partir de modelos matemáticos

Se desarrolló una simulación computacional para validar los efectos de la crioconcentración y la incorporación de crioconcentrados en hidrocoloides, sin realizar nuevos ensayos experimentales. El modelo se implementó en MATLAB® mediante un algoritmo de Programación Cuadrática Secuencial (SQP) y ecuaciones de segundo orden ajustadas por regresión no lineal a partir de datos experimentales previos del fruto maqui (*Aristotelia chilensis*) (Bastías-Montes et al., 2020; Fredes & Robert, 2018). Esta simulación permitió proyectar el comportamiento de variables fisicoquímicas y texturales (°Brix, pH, acidez titulable, cohesión, elasticidad y gomosidad), así como la bioactividad enzimática (inhibición de α -glucosidasa y α -amilasa), garantizando la validez del modelo por coherencia matemática y su aplicabilidad a matrices frutales centroamericanas como la mora (*Rubus spp.*) y la frambuesa (*Rubus idaeus*).

3.2. Proceso de crioconcentración

La técnica de crioconcentración de Petzold et al. (2015) se modificó ligeramente. Tubos de centrifuga de plástico de cincuenta mililitros que contenían 45 ml de jugo se aislaron con espuma de poliestireno y se congelaron mediante propagación axial frontal en un congelador estático (modelo 280, M&S Consul, Brasil) a -20 ° C durante un mínimo de 12 horas (Figura 1.).

3.3. Preparación de geles

Los crioconcentrados se incorporaron en gelatina (3 %) y agar-agar (1 %) según Casas et al. (2022) y Sobaszek et al. (2020), utilizando concentraciones de maqui del 10 % y 20 %. Se elaboraron controles con geles comerciales sin pigmento y con sustitución de sólidos solubles equivalentes ($\approx 11,2$ °Brix). Las muestras se mantuvieron a 4 °C hasta su caracterización. (Figura 2).

FIGURA 1. Procedimiento general para la crioconcentración asistida por centrifugación en el ciclo del jugo de maqui

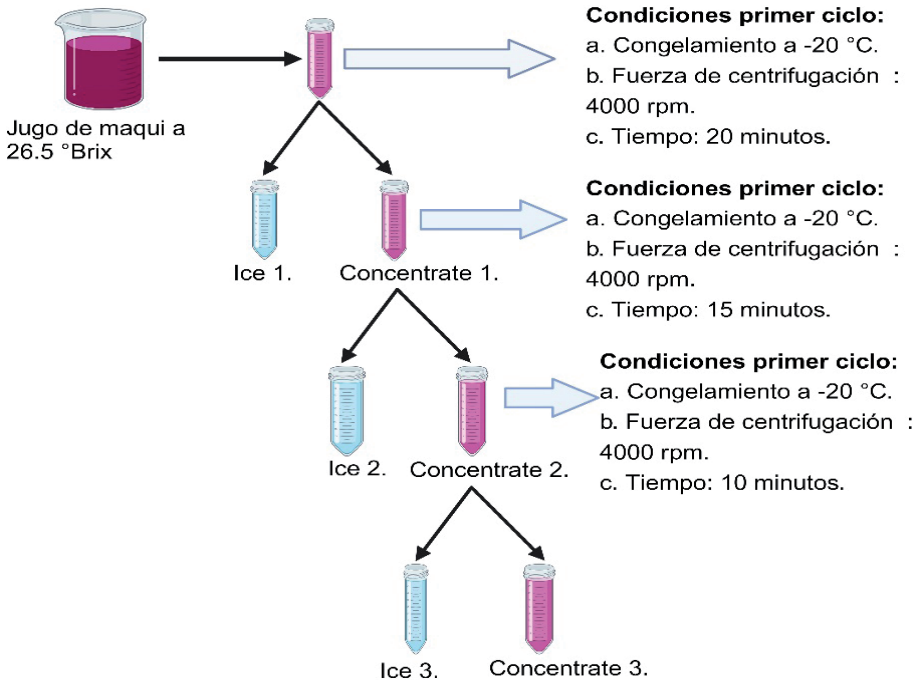
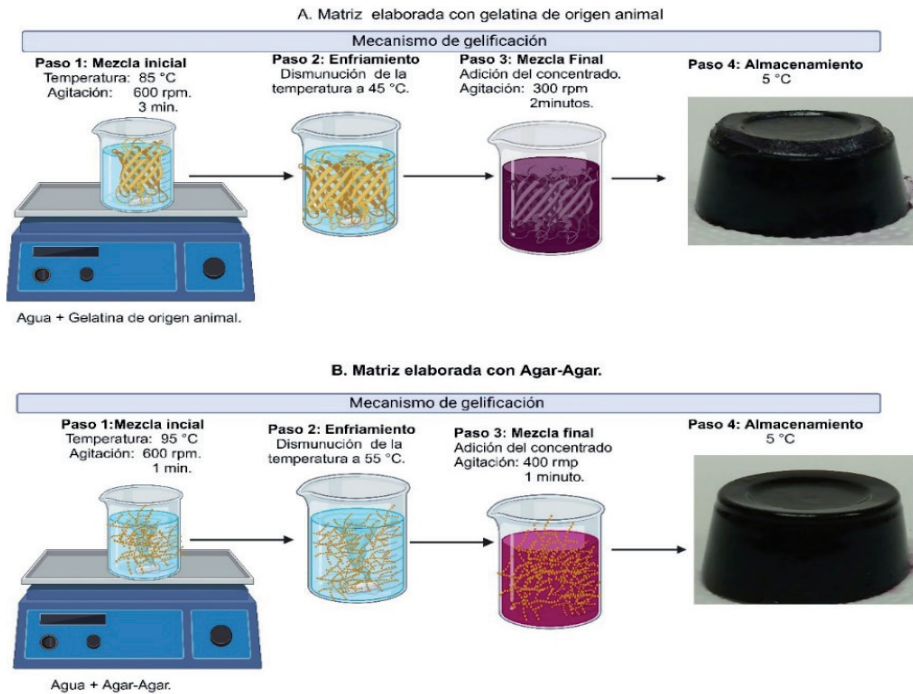


FIGURA 2. Procedimiento general para la preparación de hidrocoloides con gelatina de origen animal y Agar-Agar



3.3. Modelo de optimización

Se aplicó un algoritmo de **programación cuadrática secuencial (SQP)** desarrollado en MATLAB, basado en los principios de Powell (1978), para optimizar simultáneamente las propiedades texturales y el contenido de polifenoles totales de los geles. (Li et al., 2022) (Ansary & Panda, 2020).

3.4. Análisis estadístico

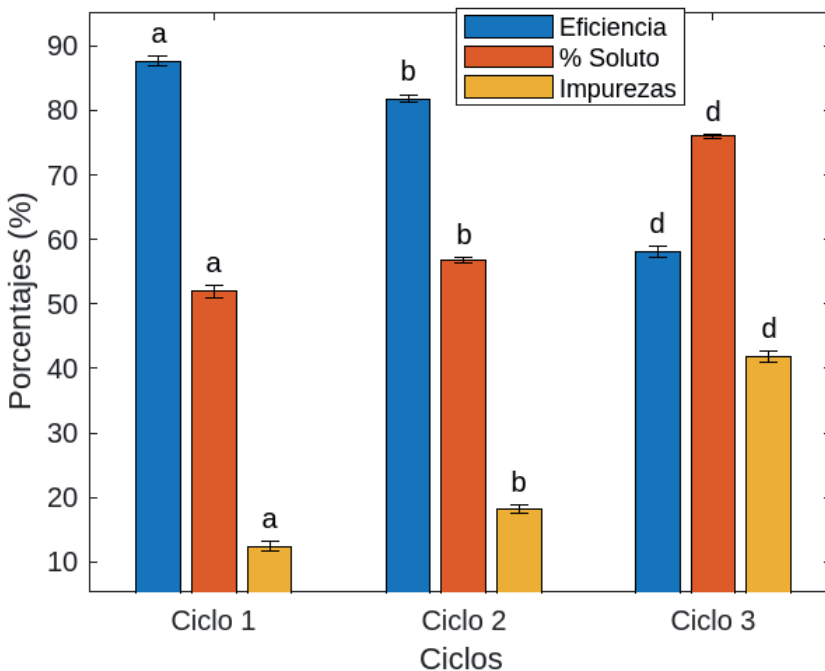
Los resultados se expresaron como promedio \pm desviación estándar. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y prueba LSD ($p < 0.05$). Los modelos de ajuste y optimización se validaron en MATLAB. Los ensayos reológicos se realizaron con siete réplicas y los restantes por triplicado.

4. Resultados y discusión

4.1. Parámetros de proceso

El proceso de crioconcentración del jugo de maqui se evaluó en tres ciclos de centrifugación el Gráfico 1. Se muestran los parámetros del proceso evaluados (eficiencia, concentrado e impurezas), la eficiencia disminuyó a medida que avanzaba cada ciclo de concentración, sin embargo se produjo una alta disminución en el tercer ciclo. Esta disminución se atribuye al aumento de la viscosidad debido al aumento de la concentración de sólidos solubles en cada ciclo (38,5, 49,5 y 56,1 para los ciclos 1, 2 y 3, respectivamente; ver Tabla 1).

GRÁFICO 1. Parámetros del proceso de crio concentración en tres ciclos (% de eficiencia, concentrado e impurezas) después de cada ciclo de centrifugación



Las letras sobre barras del mismo color indican diferencias significativas según la prueba de LSD.

Este parámetro se correlaciona con el porcentaje de concentrado obtenido en cada ciclo: una mayor eficiencia da como resultado un hielo más separado, lo que lleva a un menor porcentaje de concentrado pero con una mayor concentración de sólidos solubles (SS); este comportamiento también fue reportado por Bastias et al. aquellos que reportaron una disminución en la eficiencia de 99% a 93% al llegar al tercer ciclo al concentrar un extracto acuoso de maqui (16.2 °Brix), en contraste con este estudio para el tercer ciclo, se reportan eficiencias menores de 87.64%, 81.83% y 58.13% para los ciclos 1, 2 y 3 respectivamente, producto de no usar filtración.

4.2. Propiedades químicas de los concentrados

En la Tabla 1 se muestran las propiedades químicas del jugo inicial y los concentrados de los ciclos 1, 2 y 3. Un aumento gradual en los valores de sólidos solubles, acidez titulable, contenido total de polifenoles y antocianinas totales, así como una disminución del pH a medida que aumentan los ciclos de concentración, se ha reportado un comportamiento similar al aplicar esta técnica para concentrar jugo de naranja, granada, extractos de té, café y otros. El aumento de sólidos solubles es indicativo de la efectividad del proceso en la concentración de los componentes solubles del maqui, (Almeida et al., 2023; Meneses et al., 2021; Moreno et al., 2014; Orellana-Palma, Petzold, Andana, et al., 2017; Vásquez-Castillo et al., 2024) adicionalmente, el aumento de la acidez titulable se puede correlacionar con el efecto de la concentración de ácidos orgánicos, especialmente en el maqui para alto contenido de ácidos orgánicos este aumento es proporcional a la disminución del pH en cada concentrado. (García-Milla et al., 2024; Quispe-Fuentes et al., 2018).

TABLA 1. Propiedades químicas del zumo inicial y concentrados de los ciclos 1, 2 y 3

Muestra	SS °Brix	pH	Acidez titulable (mg MAE /kg MF)	TPC (mg GAE/ kg MF)	TAC (mg c3g/ kg MF)
Jugo inicial	26,5± 0,01 ^a	3,61± 0,05 ^a	1,8425 ± 0,31 ^a	13950 ± 342.6 ^a	3863 ± 220.8 ^a
CMC1	38,5± 0,01, ^b	3,55± 0,09 ^b	3,0485 ± 0,43 ^b	24259 ± 523,6 ^b	6759 ± 405.3 ^b
CMC2	49,5 ± 0,02 ^c	3,49± 0,4 ^c	4.1875 ± 0.23 ^c	37854 ± 1233 ^c	11927 ± 342.9 ^c
CMC3	56,1 ± 0,00 ^d	3.44± 0.05 ^d	4,7235 ± 0,23 ^d	52956 ± 1293 ^d	15175 ± 99.8 ^d

Los datos se presentan como medias ± desviación estándar. Diferentes letras en las mismas columnas indican diferencias significativas para la prueba de comparación de medias de LSD con $p < 0,05$. SS: sólidos solubles, TPC: contenido total de polifenoles, TAC: contenido total de antocianinas, MAE: equivalente de ácido málico.

4.3. Caracterización de hidrocoloides

4.3.1. Análisis del perfil de textura

Los resultados del análisis del perfil de textura para muestras de gelatina animal (3%) y agar-agar (1%) se presentan en las Tablas 2 y 3. En los hidrocoloides de gelatina animal, se observó que a medida que aumentaba la concentración de SS en cada concentrado aumentaba significativamente en dureza se observó: 5, 5.9, 23% y 27% para el jugo inicial, ciclo 1, 2 y 3 respectivamente. Esta disminución se correlacionó con variaciones en el pH, la muestra control con pH 5.2 tuvo el mayor valor de dureza, posteriormente el pH de los hidrocoloides presentó una reducción de 4.13 a 3.93. Sin embargo, también estos valores se correlacionaron con un aumento significativo en los valores de cohesión (11.3, 13.5, 20 y 21.3 %), y elasticidad (1.12, 3, 5.37 y 7.36), variables directamente correlacionadas con la gomosidad ya que un aumento en el valor de estas variables es proporcional al aumento de las mismas, estudios previos han reportado la capacidad de la gelatina animal para formar geles estables en condiciones de pH ácido.

TABLA 2. Análisis del perfil de textura de hidrocoloides con gelatina de origen animal

Tipo de concentrado	% Concentrado	Dureza (g)	Elasticidad	Cohesión	Gomosidad (g)
Inicial	10	231 ± 54,0 ^a	0,54 ± 0,03 ^a	0,50 ± 0,03 ^a	63,6 ± 20 ^a
	20	753 ± 26,6 ^{b,c}	0,91 ± 0,02 ^b	0,79 ± 0,02 ^b	579 ± 46.1 ^b
Ciclo 1	10	178 ± 52,2 ^{c,a}	0,28 ± 0,08 ^c	0,26 ± 0,01 ^c	12± 5,6 ^c
	20	764 ± 44,2 ^{d,b}	0,87 ± 0,01 ^d	0,74 ± 0,03 días	559 ± 39.2 ^b
Ciclo 2	10	121 ± 14,4 ^{e,c}	0.08 ± 0.02 ^e	0,08 ± 0,01 ^e	11± 3,2 ^c
	20	606 ± 53,8 ^{f,d}	0.93 ± 0.05 ^f	0.88 ± 0.02 ^f	544 ± 41,3 ^d
Ciclo 3	10	103 ± 35,3 ^{g,e}	0,25 ± 0,02 ^g	0,24 ± 0,03 ^g	88 ± 7,9 ^a
	20	575 ± 18.6 ^{h,f}	0.87 ± 0.03 ^{h,d}	0,74 ± 0,04 ⁱ	425 ± 47.9 ^d
Muestra de control 11,2 Brix		791 ± 15,2 ^{i,a}	0.88 ± 0.02 ^{h,d}	0.70 ± 0.02 ^h	557 ±11.8 ^a
Muestra de control 5,2 Brix		327 ± 12.4 ⁱ	0,92 ± 0,04 ^{i,f}	0.77 ± 0.06 ⁱ	253 ± 29.5 ^e

Los datos se presentan con medias ± su desviación estándar. Diferentes letras en las mismas columnas indican diferencias significativas para la prueba de comparación de medias LSD.

Casas-Forero et al. sobre la incorporación de crioconcentrados de arándano en gelatina animal, al incorporar concentrado al 20% con una formulación similar (gelatina al 3%) no se reportaron diferencias significativas para los tratamientos con respecto al testigo con sacarosa en los parámetros de dureza, cohesión, elasticidad, gomosidad y resiliencia, indicando que el jugo de arándano no mejora sino que mantiene las propiedades texturales deseadas con respecto al testigo; en contraste con este estudio, se reportan mejoras en los parámetros de cohesión y elasticidad, por lo que la capacidad de los crioconcentrados de maqui para modificar estos parámetros con respecto a otras bayas es diferente (Renaldi et al., 2022)(Casas-Forero et al., 2021).

En hidrocoloideos agar-agar (Tabla 3.) se modificaron los parámetros de dureza, elasticidad y gomosidad, las variables de adhesividad, cohesión y resiliencia mostraron menor correlación con el modelo de optimización, ya que estos parámetros dependen del tipo de hidrocoloide y no están influenciados por el tipo de concentrado y el porcentaje del mismo utilizado en la formulación; se encontró una notable disminución de la dureza para las formulaciones con los concentrados del ciclo 1, 2 y 3 (5,13, 47,3 y 48,4% para los ciclos 1, 2 y 3 respectivamente), sin diferencias significativas respecto al jugo inicial.(Park et al., 2020; Rezaee et al., 2022).

TABLA 3. Análisis del perfil de textura de hidrocoloideos con Agar-Agar al 1%

Tipo de concentrar	% Concentrar	Dureza (g)	Srinpiginess	Cohesión	Gomosidad (g)
Inicial	10	4624 ± 140 ^a	0,6 ± 0,04 ^a	0,13 ± 0,01 ^a	604 ± 11 ^a
	20	4602 ± 165 ^a	0,6 ± 0,02 ^a	0,12 ± 0,01 ^a	553 ± 41 ^b
Ciclo 1	10	3664 ± 89 ^b	0,7 ± 0,03 ^b	0,12 ± 0,02 ^{b,a}	433 ± 20 ^c
	20	4345 ± 165 ^c	0,7 ± 0,05 ^b	0,19 ± 0,01 ^c	822 ± 18 ^d
Ciclo 2	10	1952 ± 98 ^d	0,6 ± 0,08 ^a	0,13 ± 0,01 ^a	260 ± 133 ^e
	20	2389 ± 133 ^e	0,7 ± 0,03 ^b	0,17 ± 0,01 ^d	396 ± 43 ^f
Ciclo 3	10	3551 ± 166 ^{f,b,i}	0,7 ± 0,01 ^b	0,14 ± 0,02 ^e	498 ± 143 ^{f,c,g,h}
	20	2483 ± 46 ^{g,e}	0,7 ± 0,02 ^b	0,14 ± 0,01 ^e	339 ± 22 ^{e,g}
Muestra de control 11,2 Brix		4580 ± 120 ^{h,a,b}	0,7 ± 0,12 ^b	0,13 ± 0,02 ^a	587 ± 47 ^{a,b,h}
Muestra de control 5,2 Brix		3852 ± 66 ^{f,i}	0,6 ± 0,17 ^a	0,28 ± 0,26 ^f	882 ± 91 ^d

Los datos se presentan con medias ± su desviación estándar. Diferentes letras en las mismas columnas indican diferencias significativas para la prueba de comparación de medias LSD.

4.3.2. Hidrocoloides óptimos

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los hidrocoloides optimizados en función de los parámetros de Textura y Polifenoles Totales. Para optimizar el gel de origen animal, se tomó un gel comercial y se solicitó el código de una función objetivo para incorporar el gel comercial como un tratamiento más, e identificar los puntos más óptimos de todos los parámetros, este algoritmo permite una normalización de variables; Un proceso mediante el cual los valores de diferentes variables se ajustan a una escala común, asegurando que todas las variables contribuyan por igual a la solución y que las diferencias en las magnitudes de las variables no dominen el resultado final. Para la optimización del Agar Agar debido a las alteraciones que mostraron las muestras con respecto al testigo (incorporación de sacarosa en lugar de concentrado de maqui), se tomó como punto óptimo esta muestra control, y la función objetivo del código fue minimizar las alteraciones en los parámetros texturales, y maximizar el contenido de polifenoles totales. (Ansary & Panda, 2020; Li et al., 2022).

TABLA 4. Características de los hidrogeles optimizados por el método de Programación Cuadrática Secuencial

Parámetro	Gelatina animal	Gelatina
Dureza (g)	606.32	4624.37
Elasticidad	0.92	0.63197
Cohesión	0.88	0.142
Gomosidad (g)	544.32	661.672
Resiliencia	0.65	N/A
TPC (mg equi. AG/kg.)	7510	2654

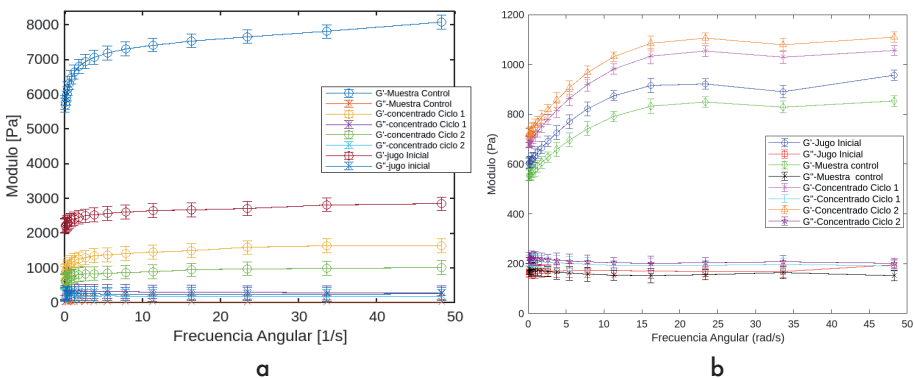
Los tratamientos óptimos fueron los siguientes: Gelatina animal: 20% concentrado de gelatina del ciclo 2 y 3% y para Agar Agar: 20% del jugo inicial y 1% Agar Agar, estos resultados confirman que los hidrocoloides de gelatina animal presentaron resultados más prometedores ya que permitió maximizar el contenido total de polifenoles del ciclo 2, sin alterar los parámetros texturales en comparación con el Agar Agar que solo permitió maximizar el contenido de polifenoles del jugo inicial. El contenido total de polifenoles maximizado en la gelatina animal fue de 7510 mg por kg de gel, por lo que un hidrogel en una presentación de 100 g estaría aportando 751

mg equivalentes al ácido gálico, por lo que el consumo de 100 o 200 gramos de este hidocoloide proporciona la ingesta diaria recomendada de polifenoles totales recomendados por los estudios más recientes que varían en un rango de 800 mg -1500 mg diarios dependiendo de la , el hidrogel optimizado con (Čorković et al., 2022; Noronha et al., 2024; Zamora-Ros et al., 2016; Zhang et al., 2023) agar-agar (escribirlo de manera uniforme en el texto) en una presentación de 100 g estaría aportando 265 mg de polifenoles totales.

4.3.3. Parámetros reológicos

Se realizó un análisis reológico en las mejores formulaciones obtenidas a través del modelo de optimización (concentrado al 20% hasta el ciclo 2) y los resultados se muestran en el Gráfico 2. El módulo de almacenamiento (G') fue consistentemente más alto que el módulo de pérdida (G''), lo que indica que en todas las muestras predomina el comportamiento similar al sólido típico de los hidocoloides utilizados para la formación de gel, tampoco se encontraron diferencias significativas en el módulo viscoso. En los hidocoloides animales a base de gelatina (Figura 2-a), la muestra control presentó una disminución significativa del módulo (G') con respecto a las muestras con crioconcentrados (Herrera-Lavados et al., 2023; Larrea-Wachtendorff et al., 2020).

GRÁFICO 2. Parámetros viscoelásticos G' (módulo de almacenamiento) y G'' (módulo de pérdida) de hidogeles formulados con a) agar-agar y b) gelatina animal



Los resultados se presentan como medias \pm desviación estándar. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de LSD con $p < 0,05$ en los puntos medios (8-16).

El proceso de gelificación más lento de la gelatina animal permite una incorporación más homogénea del concentrado de maqui, lo que indica que la criocentración permite obtener concentrados con efectos positivos sobre las propiedades reológicas del hidrocoloide de gelatina animal, mejorando así el módulo elástico de las muestras; este fenómeno puede explicarse por el hecho de que los criocentrados de maqui tienen un alto contenido de polifenoles, incluyendo antocianinas que pueden contribuir a la interacción entre los componentes de la matriz (agua, gelatina animal y concentrados) en la formación de enlaces de hidrógeno, este es el principal mecanismo de la gelatina animal para la retención de agua, además de la presencia de la fuerza de van der Waals. (Casas-Forero et al., 2021; Charlton et al., 2002)(Chen et al., 2019; Gallery et al., 2024) Por lo tanto, la ausencia de compuestos bioactivos en la muestra de control es la principal causa de la disminución del módulo G' . (Casas-Forero et al., 2021).

En los hidrogeles con agar-agar, el módulo de almacenamiento disminuyó con ciclos de concentración crecientes, similar a la reducción observada en el valor de dureza obtenido en el análisis de textura; esta disminución en el módulo G' se puede atribuir principalmente a la dificultad de los criocentrados para incorporarse al hidrocoloide, en primer lugar porque el agar-agar es insoluble a temperaturas frías y en el mecanismo de gelificación utilizado los concentrados se incorporan al final del proceso provocando una disminución de la temperatura de hidratación del hidrocoloide (100 °C a 80 °C), el mecanismo de gelificación del agar-agar consiste en el libre movimiento de las moléculas de agarosa, amilopectina, agua y azúcar presentes en la matriz cuando alcanzan su punto de ebullición (>100°C) formando enlaces de hidrógeno.

4.4. Actividad de la alfa-glucosidasa

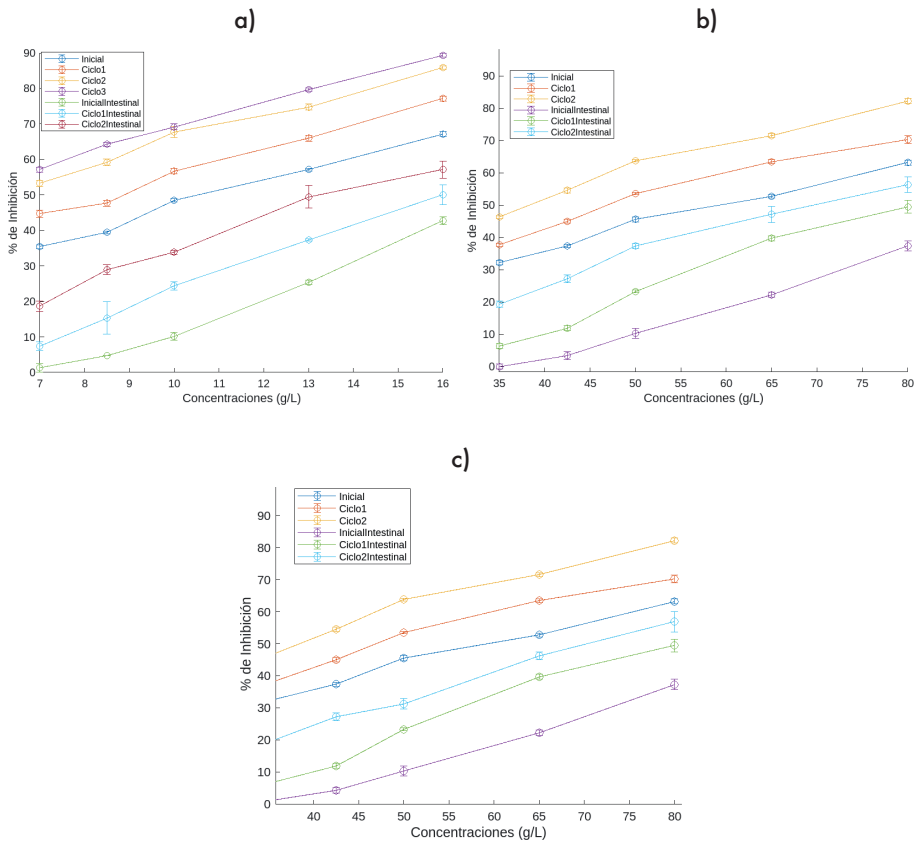
4.4.1. Inhibición

El Grafico 3 muestra la actividad de la α -glucosidasa a diferentes concentraciones de sólidos solubles de concentrados de maqui (a) e hidrocoloides (b y c) con concentrado al 20% hasta el ciclo 2. Todas las muestras mostraron un comportamiento similar, a medida que aumentaba la concentración el % de inhibición aumentaba de la misma manera que los concentrados de ciclos más avanzados mostraban un aumento en el % de inhibición, lo que indica que el efecto de la criocentración de antocianinas

por esta técnica, que son las principales responsables de este efecto. (Alvarado et al., 2016; Davinelli et al., 2015; Promyos et al., 2020; Rojo et al., 2012; Vega-Galvez et al., 2021) Asimismo, este mismo efecto se mantuvo al momento de incorporar los criocentratos a los hidrocoloides, adicionalmente todas las muestras mostraron una disminución significativa en el tracto intestinal, esta disminución se puede atribuir a la baja bioaccesibilidad reportada para las antocianinas debido a los cambios en el pH de la fase gástrica a la intestinal (Lin et al., 2023; Wahyuningsih et al., 2017).

Un comportamiento similar fue reportado por Burgos-Edwards et al. (Burgos-Edwards et al., 2017) evaluando el efecto de las condiciones gástricas simuladas de extractos liofilizados de frutos de *Ribes magellanicum* y *R. punctatum*, donde la muestra después de la digestión presentó un aumento significativo en la inhibición de la α -glucosidasa correlacionada con la baja bioaccesibilidad de las antocianinas reportadas en su investigación que presentó una disminución de 82.6 y 80.1% respectivamente, similar a nuestro estudio. Orqueda et al. (Orqueda et al., 2017) reportaron que al final de la digestión simulada la actividad inhibitoria de un extracto de fruto de *S. betaceum* hacia la α -glucosidasa se perdió en un 58,2 %, Promyos et al. (Promyos et al., 2020) reportaron que las delfinidinas eran inhibidores más potentes de la α -glucosidasa en comparación con la malvidina; por lo tanto, el alto contenido de delfinidinas en el maqui en comparación con otras bayas puede explicar su mayor efecto inhibidor que se traduce en un mayor potencial antidiabético. Por lo tanto, las condiciones digestivas simuladas disminuyen la inhibición de la α -glucosidasa en el tracto intestinal, sin embargo esta disminución puede no ser significativa si la ingesta de compuestos antocianinas de maqui es alta (200-520 mg diarios) de acuerdo con las dosis diarias recomendadas por estudios que respaldan el efecto antidiabético del maqui y las antocianinas en general (Pinto et al., 2022; Rojo et al., 2012; Yang et al., 2021).

GRAFICO 4. Inhibición de la actividad de la alfa-glucosidasa (%) a diferentes concentraciones de a) Concentrados de maqui, b) hidrocoloides con gelatina animal, c) hidrocoloides con agar-agar, antes y después de condiciones digestivas simuladas



Los datos se presentan como medias \pm desviación estándar.

En la Tabla 5 se muestran los valores de IC50, expresados como la cantidad de sólidos solubles de maqui necesarios para inhibir el 50% de la actividad de la enzima α -glucosidasa, revela diferencias significativas entre el jugo inicial, los concentrados de maqui y los hidrocoloides formulados con gelatina animal y agar-agar. El jugo inicial presentó una IC50 de $2,92 \pm 0,01$ g/L antes de la digestión, aumentando a $4,80 \pm 0,02$

g/L en la fase intestinal, con un aumento de $84,93 \pm 0,01\%$, comportamiento similar es reportado por Burgos-Edwards et al. y Orqueda et al. (Burgos-Edwards et al., 2017) (Orqueda et al., 2017) al evaluar el efecto de la digestión simulada en frutas ricas en antocianinas.

TABLA 5. IC50 expresado como la cantidad de sólidos solubles (g de concentrado/L) de maqui presentes en el jugo inicial, crioconcentrados de maqui, gelatina animal e hidrocoloides de agar-agar formulados con 20% de concentrado; necesarios para inhibir el 50% de la enzima

Muestra	Fase		% de aumento
	Antes- D. V	Después- D. V	
Jugo inicial	$2,92 \pm 0,11^a$	$6,3 \pm 0,02^a$	$83,93 \pm 0,11^a$
Ciclo 1	$2,88 \pm 0,14^a$	$6,24 \pm 0,01^a$	$82,36 \pm 0,13^a$
Ciclo 2	$2,82 \pm 0,13^a$	$6,14 \pm 0,09^a$	$81,25 \pm 0,12^a$
Jugo inicial de gelatina	$3,19 \pm 0,1^b$	$5,03 \pm 0,12^b$	$57,68 \pm 0,04^a$
Ciclo de gelatina 1	$3,77 \pm 0,16^c$	$6,03 \pm 0,09^c$	$59,95 \pm 0,03^c$
Ciclo de gelatina 2	$3,64 \pm 0,15^c$	$6,10 \pm 0,05^c$	$69,44 \pm 0,08^c$
Agar-Agar-inicial Jugo	$3,16 \pm 0,18^d$	$6,37 \pm 0,01^d$	$76,94 \pm 0,03^c$
Agar-Agar-Ciclo 1	$3,69 \pm 0,01^e$	$6,51 \pm 0,09^e$	$78,95 \pm 0,07^e$
Agar-Agar-Ciclo 2	$3,60 \pm 0,18^e$	$6,60 \pm 0,05^e$	$79,22 \pm 0,09^e$

Los datos se representan como medias \pm desviación estándar, diferentes letras en la misma columna presentan diferencias significativas para la prueba de LSD con $p < 0,05$. D.V = Digestión *in vitro*.

Este estudio revela que los hidrocoloides permiten mejorar el efecto inhibitorio de los concentrados de maqui, ya que los concentrados mostraron un aumento en la IC50, lo que indica una mayor concentración de sólidos solubles necesarios para inhibir la enzima después de la digestión en comparación con los hidrogeles. Adicionalmente, los concentrados de los ciclos 1 y 2 presentaron un mayor aumento en comparación con el jugo inicial, esto puede indicar que posiblemente en la fracción de hielo también retuvieron monómeros responsables de la inhibición de la α -glucosidasa, debido a varios factores como la polimerización y el peso molecular de las antocianinas del maqui, especialmente las delphinidinas que generalmente tienen un peso molecular más alto que las cianidinas (303.25 g/mol y 287.25 g/mol. respectivamente), lo que

puede dificultar la separación de estos compuestos de la fracción de hielo (Overall et al., 2017) (Ugolnikova & Chernyavskaya, 2021).

La diabetes mellitus es un trastorno del metabolismo de los carbohidratos causado por la disminución de la producción de insulina o el aumento de la resistencia a la insulina, los alimentos enriquecidos con antocianinas presentan una nueva oportunidad para que la industria alimentaria ofrezca productos dirigidos a personas propensas a estas enfermedades, ya que reducir la hiperglucemia postprandial es una buena estrategia para la diabetes en sus primeras etapas, esto se logra al ralentizar la absorción de glucosa en el sistema digestivo al inhibir las enzimas α -glucosidasa que hidrolizan carbohidratos. Sin embargo, este hallazgo sugiere que los compuestos de antocianina presentes en el maqui pueden inhibir otras enzimas de importancia en nuestro metabolismo. (Kashtoh & Baek, 2022)(Alssema et al., 2021).

TABLA 6. Las propiedades cinéticas del ciclo 2 se concentran en la α -glucosidasa

Concentración de inhibidores (mM)	Vmax (mmol NPnG/s)	Km (mM)	Tipo de inhibición
0	1.162×10^{-3}	0.275351	Mixto
7	1.041×10^{-3}	0.281273	
8,5	$9,20 \times 10^{-4}$	0.243302	
10	$8,19 \times 10^{-4}$	0.285842	
13	$6,65 \times 10^{-4}$	0.39771	
16	$5,06 \times 10^{-4}$	0.6418	

La Tabla 6 donde se encontró que tanto la constante Michaelis-Menten y la velocidad máxima de reacción no se mantienen constantes, por lo tanto, se reporta un tipo de inhibición mixta similar al mecanismo presentado por las antocianinas; un similar hallazgo reportó Ji et al., (2021), al determinar el tipo de inhibición del bilberry *Vaccinium myrtillus* fue mixto, baya similar al maqui en cuanto al color púrpura y perfil de contenido de antocianinas. También Chen et al., (2020) reportó el mecanismo de inhibición mixto de la cianidina; así mismo, Promyos et al., (2020) señala que las delfinidinas también tiene un tipo de inhibición mixta sobre la α -glucosidasa, lo que respalda el comportamiento presentado por el crioconcentrado de maqui del ciclo 2. La inhibición mixta permite que las delfinidinas actúen de forma más versátil y eficaz que los inhibidores simples, integrando una acción multisitio, reguladora y protectora

sobre el metabolismo de la glucosa. Por ello, los geles funcionales desarrollados a partir de crioconcentrados ricos en delphinidinas no solo aportan valor nutricional, sino que tienen un efecto fisiológico directo en la modulación glicémica, lo que fortalece su relevancia para la salud pública y la seguridad alimentaria regional.

5. Conclusión

Los resultados de la simulación basada en modelos matemáticos confirman que la crioconcentración es una estrategia viable para potenciar la estabilidad, concentración de antocianinas y funcionalidad de matrices frutales como *Rubus spp.* en la formulación de geles alimentarios saludables. El modelo propuesto mostró coherencia con datos experimentales reportados, validando su utilidad como herramienta predictiva para optimizar procesos agroalimentarios sin recurrir a ensayos repetitivos. Los geles funcionales derivados de esta investigación poseen un alto potencial para contribuir a la prevención de enfermedades metabólicas como la diabetes tipo 2, gracias a su capacidad inhibitoria sobre enzimas digestivas relacionadas con la absorción de glucosa. Este enfoque tecnológico de bajo costo y alta escalabilidad puede fortalecer la seguridad alimentaria, diversificar las cadenas de valor rurales y mejorar la salud pública regional. En coherencia con los pilares de sostenibilidad, innovación e integración económica del SICA, el estudio plantea una vía concreta hacia una transformación positiva para la región centroamericana.

6. Referencias

- ALMEIDA, É. DA S., AREND, G. D., KNAPP, M. A., REZZADORI, K., VERRUCK, S., HOTZA, D., & DE OLIVEIRA, D. (2023). Effect of the multi-stage block freeze concentration process on the physicochemical and biological properties of noni tea (*Morinda citrifolia* L.): a case study in Brazil to obtain a promising functional food. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(3), 2519–2536. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01719-1>
- ALSSEMA, M., RUIJGROK, C., BLAAK, E. E., EGLI, L., DUSSORT, P., VINOY, S., DEKKER, J. M., & DENISE ROBERTSON, M. (2021). Effects of alpha-glucosidase-inhibiting drugs on acute postprandial glucose and insulin responses: a systematic review and meta-analysis. *Nutrition and Diabetes*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41387-021-00152-5>
- ALVARADO, J. L., LESCHOT, A., OLIVERA-NAPPA, Á., SALGADO, A. M., RIOSECO, H., LYON, C., & VIGIL, P. (2016). Delphinidin-rich maqui berry extract (Delphinol®) lowers

fasting and postprandial glycemia and insulinemia in prediabetic individuals during oral glucose tolerance tests. *BioMed Research International*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9070537>

ANSARY, M. A. T., & PANDA, G. (2020). A Sequential Quadratic Programming Method for Constrained Multi-objective Optimization Problems. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 64(1-2), 379–397. <https://doi.org/10.1007/s12190-020-01359-y>

BASTÍAS-MONTES, J. M., MONTERROSA, K., MUÑOZ-FARIÑA, O., GARCÍA, O., ACUÑA-NELSON, S. M., VIDAL-SAN MARTÍN, C., QUEVEDO-LEON, R., KUBO, I., AVILA-ACEVEDO, J. G., DOMIGUEZ-LOPEZ, M., WEI, Z. J., THAKUR, K., & CÉSPEDES-ACUÑA, C. L. (2020). Chemoprotective and antiobesity effects of tocots from seed oil of Maqui-berry: Their antioxidative and digestive enzyme inhibition potential. *Food and Chemical Toxicology*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111036>

BASTÍAS-MONTES, J. M., VIDAL-SAN MARTÍN, C., MUÑOZ-FARIÑA, O., PETZOLD-MALDONADO, G., QUEVEDO-LEÓN, R., WANG, H., YI, Y., & CÉSPEDES-ACUÑA, C. L. (2019). Cryoconcentration procedure for aqueous extracts of maqui fruits prepared by centrifugation and filtration from fruits harvested in different years from the same localities. *Journal of Berry Research*, 9(3), 377–394. <https://doi.org/10.3233/JBR-180368>

BURGOS-EDWARDS, A., JIMÉNEZ-ASPEE, F., THOMAS-VALDÉS, S., SCHMEDA-HIRSCHMANN, G., & THEODULOZ, C. (2017). Qualitative and quantitative changes in polyphenol composition and bioactivity of *Ribes magellanicum* and *R. punctatum* after in vitro gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 237, 1073–1082. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.060>

CASAS-FORERO, N., MORENO-OSORIO, L., ORELLANA-PALMA, P., & PETZOLD, G. (2021). Effects of cryoconcentrate blueberry juice incorporation on gelatin gel: A rheological, textural and bioactive properties study. *LWT*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110674>

CHARLTON, A. J., BAXTER, N. J., KHAN, M. L., MOIR, A. J. G., HASLAM, E., DAVIES, A. P., & WILLIAMSON, M. P. (2002). Polyphenol/peptide binding and precipitation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(6), 1593–1601. <https://doi.org/10.1021/jf010897z>

CHEN, J. GUANG, WU, S. FU, ZHANG, Q. FENG, YIN, Z. PING, & ZHANG, L. (2020). α -Glucosidase inhibitory effect of anthocyanins from *Cinnamomum camphora* fruit: Inhibition kinetics and mechanistic insights through in vitro and in silico studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.091>

- CHEN, J., MU, T., GOFFIN, D., BLECKER, C., RICHARD, G., RICHEL, A., & HAUBRUGE, E. (2019). Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 261, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.016>
- COCHACHIN-CARRERA, B., MORENO-CUEVAS, J., & CARVAJAL-MENA, N. (2023). Effects of concentration by block freezing and vacuum evaporation on the physicochemical properties and digestibility of whey. *CYTA - Journal of Food*, 21(1), 313–320. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2196321>
- ČORKOVIĆ, I., GAŠO-SOKAČ, D., PICHLER, A., ŠIMUNOVIĆ, J., & KOPIJAR, M. (2022). Dietary Polyphenols as Natural Inhibitors of α -Amylase and α -Glucosidase. In *Life* (Vol. 12, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/life12111692>
- DAVINELLI, S., BERTOGLIO, J. C., ZARRELLI, A., PINA, R., & SCAPAGNINI, G. (2015). A Randomized Clinical Trial Evaluating the Efficacy of an Anthocyanin–Maqui Berry Extract (Delphinol®) on Oxidative Stress Biomarkers. *Journal of the American College of Nutrition*, 34, 28–33. <https://doi.org/10.1080/07315724.2015.1080108>
- FREDES, C., & ROBERT, P. (2018). *Maqui (Aristotelia chilensis (Mol.) Stuntz)*. www.fundacionvioletaparra.org
- GALLERY, C., AGODA-TANDJAWA, G., BEKAERT, D., & GITTO, L. (2024). Understanding structure/rheology relationships of amidated low-methoxyl citrus and apple pectin gels: Implications of sucrose, pectin types and characteristics. *Food Hydrocolloids*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109950>
- GARCÍA-MILLA, P., PEÑALVER, R., & NIETO, G. (2024). A Review of the Functional Characteristics and Applications of *Aristotelia chilensis* (Maqui Berry), in the Food Industry. In *Foods* (Vol. 13, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13060838>
- GUERRA-VALLE, M., LILLO-PEREZ, S., PETZOLD, G., & ORELLANA-PALMA, P. (2021). Effect of freeze crystallization on quality properties of two endemic patagonian berries juices: Murta (*ugni molinae*) and arrayan (*luma apiculata*). *Foods*, 10(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/foods10020466>
- HERRERA-LAVADOS, C., TABILO-MUNIZAGA, G., RIVERA-TOBAR, D., CARVAJAL-MENA, N., PALMA-ACEVEDO, A., MORENO-OSORIO, L., & PÉREZ-WON, M. (2023). Development of bean-based emulgels for 3D printing applications: Feasibility for dysphagia diets. *Journal of Food Engineering*, 358. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111687>

- Ji, Y., Liu, D., Jin, Y., Zhao, J., Zhao, J., Li, H., Li, L., Zhang, H., & Wang, H. (2021). In vitro and in vivo inhibitory effect of anthocyanin-rich bilberry extract on α -glucosidase and α -amylase. *LWT*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111484>
- KASHTOH, H., & BAEK, K. H. (2022). Recent Updates on Phytoconstituent Alpha-Glucosidase Inhibitors: An Approach towards the Treatment of Type Two Diabetes. In *Plants* (Vol. 11, Issue 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11202722>
- LARREA-WACHTENDORFF, D., DI NOBILE, G., & FERRARI, G. (2020). Effects of processing conditions and glycerol concentration on rheological and texture properties of starch-based hydrogels produced by high pressure processing (HPP). *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.120>
- LI, J., KEBREAB, E., YOU, F., FADEL, J. G., HANSEN, T. L., VAN KERKHOVE, C., & REED, K. F. (2022). The application of nonlinear programming on ration formulation for dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2180–2189. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20817>
- LIN, Y., LI, C., SHI, L., & WANG, L. (2023). Anthocyanins: Modified New Technologies and Challenges. In *Foods* (Vol. 12, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods12071368>
- MENESES, D. L., RUIZ, Y., HERNANDEZ, E., & MORENO, F. L. (2021). Multi-stage block freeze-concentration of green tea (*Camellia sinensis*) extract. *Journal of Food Engineering*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110381>
- MORENO, F. L., RAVENTÓS, M., HERNÁNDEZ, E., & RUIZ, Y. (2014). Block freeze-concentration of coffee extract: Effect of freezing and thawing stages on solute recovery and bioactive compounds. *Journal of Food Engineering*, 120(1), 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.034>
- NORONHA, L. A., TURECK, C., PINTO, V. Z., & KOEHNLEIN, E. A. (2024). Dietary Polyphenols: What is the Estimated Intake in Population Studies With Adults and Elderly People? In *Current Nutrition Reports* (Vol. 13, Issue 2, pp. 280–293). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13668-024-00530-2>
- ORELLANA-PALMA, P., PETZOLD, G., ANDANA, I., TORRES, N., & CUEVAS, C. (2017). Retention of ascorbic acid and solid concentration via centrifugal freeze concentration of orange juice. *Journal of Food Quality*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5214909>
- ORELLANA-PALMA, P., PETZOLD, G., GUERRA-VALLE, M., & ASTUDILLO-LAGOS, M. (2017). Impact of block cryoconcentration on polyphenol retention in blueberry juice. *Food Bioscience*, 20, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.10.006>

ORQUEDA, M. E., RIVAS, M., ZAMPINI, I. C., ALBERTO, M. R., TORRES, S., CUELLO, S., SAYAGO, J., THOMAS-VALDES, S., JIMÉNEZ-ASPEE, F., SCHMEDA-HIRSCHMANN, G., & ISLA, M. I. (2017). Chemical and functional characterization of seed, pulp and skin powder from chilito (*Solanum betaceum*), an Argentine native fruit. Phenolic fractions affect key enzymes involved in metabolic syndrome and oxidative stress. *Food Chemistry*, 216, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.015>

OVERALL, J., BONNEY, S. A., WILSON, M., BEERMANN, A., GRACE, M. H., ESPOSITO, D., LILA, M. A., & KOMARNYTSKY, S. (2017). Metabolic effects of berries with structurally diverse anthocyanins. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(2). <https://doi.org/10.3390/ijms18020422>

PARK, S. H., LEE, C. R., & HONG, S. K. (2020). Implications of agar and agarase in industrial applications of sustainable marine biomass. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 104, Issue 7, pp. 2815–2832). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10412-6>

PINTO, A. A., FUENTEALBA-SANDOVAL, V., LÓPEZ, M. D., PEÑA-ROJAS, K., & FISCHER, S. (2022). Accumulation of delphinidin derivatives and other bioactive compound in wild maqui under different environmental conditions and fruit ripening stages. *Industrial Crops and Products*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115064>

PROMYOS, N., TEMVIRIYANUKUL, P., & SUTTISANSANEE, U. (2020). Investigation of anthocyanidins and anthocyanins for targeting α -glucosidase in diabetes mellitus. *Preventive Nutrition and Food Science*, 25(3), 263–271. <https://doi.org/10.3746/pnf.2020.25.3.263>

QUISPE-FUENTES, I., VEGA-GÁLVEZ, A., & ARANDA, M. (2018). Evaluation of phenolic profiles and antioxidant capacity of maqui (*Aristotelia chilensis*) berries and their relationships to drying methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(11), 4168–4176. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8938>

RENALDI, G., JUNSARA, K., JANNU, T., SIRINUPONG, N., & SAMAKRADHAMRONGTHAI, R. S. (2022). Physicochemical, textural, and sensory qualities of pectin/gelatin gummy jelly incorporated with *Garcinia atroviridis* and its consumer acceptability. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100505>

REZAAE, M., AIT AIDER-KACI, F., & AIDER, M. (2022). Effects of Hydrocolloid Agar, Gelatin, Pectin, and Xanthan on Physicochemical and Rheological Properties of Pickering Emulsions Stabilized by Canola Protein Microgel as a Potential Animal Fat Replacer.

ACS Food Science and Technology, 2(10), 1681–1690. <https://doi.org/10.1021/acfoodscitech.2c00264>

ROJO, L. E., RIBNICKY, D., LOGENDRA, S., POULEV, A., ROJAS-SILVA, P., KUHN, P., DORN, R., GRACE, M. H., LILA, M. A., & RASKIN, I. (2012). In vitro and in vivo anti-diabetic effects of anthocyanins from Maqui Berry (*Aristotelia chilensis*). *Food Chemistry*, 131(2), 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.066>

UGOLNIKOVA, M. A., & CHERNYAVSKAYA, V. V. (2021). Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*, 57(7–8), 561–566. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00976-z>

VÁSQUEZ-CASTILLO, F. M., HERNÁNDEZ, E., & ACHAERANDIO, I. (2024). Cryoconcentration in Block Assisted by Centrifugation-Vacuum to Pomegranate Juice: A New Improved Method. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03472-3>

VEGA-GÁLVEZ, A., RODRÍGUEZ, A., & STUCKEN, K. (2021). Antioxidant, functional properties and health-promoting potential of native South American berries: a review. In *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 101, Issue 2, pp. 364–378). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10621>

VIDAL-SAN MARTÍN, C., BASTÍAS-MONTES, J. M., VILLAGRA-JORQUERA, C., SALINAS-HUENCHULAO, G., FLORES-RÍOS, A., GONZÁLES-DÍAZ, N., TAMARIT-PINO, Y., MUÑOZ-FARIÑA, O., & QUEVEDO-LEÓN, R. (2021). Effect of cryoconcentration assisted by centrifugation-filtration on bioactive compounds and microbiological quality of aqueous maqui (*Aristotelia chilensis* (mol.) stuntz) and calafate (*berberis microphylla* g. forst) extracts pretreated with high-pressure homogenization. *Processes*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/pr9040692>

WAHYUNINGSIH, S., WULANDARI, L., WARTONO, M. W., MUNAWAROH, H., & RAMELAN, A. H. (2017). The Effect of pH and Color Stability of Anthocyanin on Food Colorant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 193(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/193/1/012047>

YANG, L., QIU, Y., LING, W., LIU, Z., YANG, L., WANG, C., PENG, X., WANG, L., & CHEN, J. (2021). Anthocyanins regulate serum adiponin and visfatin in patients with prediabetes or newly diagnosed diabetes: a randomized controlled trial. *European Journal of Nutrition*, 60(4), 1935–1944. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02379-x>

ZAMORA-ROS, R., KNAZE, V., ROTHWELL, J. A., HÉMON, B., MOSKAL, A., OVERVAD, K., TJØNNELAND, A., KYRØ, C., FAGHERAZZI, G., BOUTRON-RUAULT, M. C., TOUILLAUD, M., KATZKE,

V., KÜHN, T., BOEING, H., FÖRSTER, J., TRICHOPOULOU, A., VALANOU, E., PEPPA, E., PALLI, D., ... SCALBERT, A. (2016). Dietary polyphenol intake in europe: The european prospective investigation into cancer and nutrition (EPIC) study. *European Journal of Nutrition*, 55(4), 1359–1375. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-0950-x>

ZHANG, Y., BALASOORIYA, H., SIRISENA, S., & NG, K. (2023). The effectiveness of dietary polyphenols in obesity management: A systematic review and meta-analysis of human clinical trials. In *Food Chemistry* (Vol. 404). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134668>

ZIELINSKI, A. A. F., ZARDO, D. M., ALBERTI, A., BORTOLINI, D. G., BENVENUTTI, L., DEMIATE, I. M., & NOGUEIRA, A. (2019). Effect of cryoconcentration process on phenolic compounds and antioxidant activity in apple juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(6), 2786–2792. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9486>

ANEXO I. Código Mat Lab para la optimización mediante el método SQP

% Características texturales del gel comercial

gel_comercial=[1079.98, 101.92, 0.90, 0.72, 776.87, 0.67, 558.97]; %Incluyendo polifenoles totales

% Características texturales de los geles formulados

% Columnas: [Dureza, Adhesividad, Elasticidad, Cohesividad, Gomosidad, Resiliencia, Polifenoles Totales]

geles_formulados = [

231.66, 11.30, 0.54, 0.50, 63.67, 0.39, 126.41; % Inicial 10%

753.29, 86.74, 0.91, 0.79, 579.01, 0.52, 253.84; % Inicial 20%

178.94, 12.45, 0.28, 0.26, 12.82, 0.19, 192.82; % Ciclo 1 10%

764.69, 66.58, 0.87, 0.74, 559.98, 0.45, 366.67; % Ciclo 1 20%

51.90, 21.07, 0.08, 0.08, 0.31, 0.06, 255.13; % Ciclo 2 10%

606.32, 55.97, 0.97, 0.88, 544.32, 0.65, 366.67; % Ciclo 2 20%

103.26, 16.50, 0.25, 0.24, 88.76, 0.15, 279.49; % Ciclo 3 10%

575.97, 57.12, 0.87, 0.74, 425.62, 0.44, 558.97; % Ciclo 3 20%

gel_comercial % Añadir el gel comercial como un tratamiento más

];

% Normalización de las variables

max_caracteristicas = max(geles_formulados, [], 1);

```

% Función objetivo: Minimizar la diferencia cuadrática entre las características
texturales,
% y maximizar el contenido de polifenoles totales. Los valores mayores de
elasticidad,
% cohesividad y gomosidad son mejores.
funcion_objetivo = @(params) sum(((gel_comercial - sum(params' .* geles_
formulados, 1)).^2) ./ max_caracteristicas.^2) - ...
    (sum(params' .* geles_formulados(:, 3)) / max_caracteristicas(3) + ...
    sum(params' .* geles_formulados(:, 4)) / max_caracteristicas(4) + ...
    sum(params' .* geles_formulados(:, 5)) / max_caracteristicas(5));

% Valores iniciales para los pesos (distribución uniforme)
valores_iniciales = ones(1, size(geles_formulados, 1)) / size(geles_formulados, 1);

% Función de restricción: La suma de los pesos debe ser 1
restricciones = @(params) deal([], sum(params) - 1);

% Resolver el problema de optimización
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'iter', 'Algorithm', 'sqp');
[pesos_optimos, ~] = fmincon(funcion_objetivo, valores_iniciales, [], [], [], [],
zeros(size(valores_iniciales)), ones(size(valores_iniciales)), restricciones, options);

% Características texturales del gel óptimo
gel_optimo = pesos_optimos * geles_formulados;

% Encuentra los tres mejores tratamientos
[~, orden_tratamientos] = sort(pesos_optimos, 'descend');
mejores_tratamientos = orden_tratamientos(1:3);

% Genera el mensaje de combinación óptima
mensaje_combinacion_optima = 'Los tres mejores tratamientos son: ';
for i = 1:length(mejores_tratamientos)
    if mejores_tratamientos(i) <= 2
        mensaje_combinacion_optima = [mensaje_combinacion_optima,
sprintf('Inicial %d (%.2f mg/L polifenoles totales), ', mejores_tratamientos(i)*10,
geles_formulados(mejores_tratamientos(i), 7))];
    elseif mejores_tratamientos(i) <= 4
        mensaje_combinacion_optima = [mensaje_combinacion_optima,
sprintf('Ciclo 1 %d (%.2f mg/L polifenoles totales), ', (mejores_tratamientos(i)-2)*10,
geles_formulados(mejores_tratamientos(i), 7))];
    elseif mejores_tratamientos(i) <= 6
        mensaje_combinacion_optima = [mensaje_combinacion_optima,

```

```
fprintf('Ciclo 2 %d (%.2fmg/L polifenoles totales)', (mejores_tratamientos(i)-4)*10,
geles_formulados(mejores_tratamientos(i), 7));
    elseif mejores_tratamientos(i) <= 8
        mensaje_combinacion_optima = [mensaje_combinacion_optima,
fprintf('Ciclo 3 %d (%.2fmg/L polifenoles totales)', (mejores_tratamientos(i)-6)*10,
geles_formulados(mejores_tratamientos(i), 7));
    else
        mensaje_combinacion_optima = [mensaje_combinacion_optima,
fprintf('Gel comercial (%.2fmg/L polifenoles totales)', geles_formulados(mejores_
tratamientos(i), 7));
    end
end

% Eliminar la última coma y espacio
mensaje_combinacion_optima = mensaje_combinacion_optima(1:end-2);

disp('Pesos óptimos:');
disp(pesos_optimos);
disp('Características texturales del gel óptimo:');
disp(gel_optimo);
disp(mensaje_combinacion_optima);
```