



Artículo

Evaluación del efecto de la germinación sobre las propiedades tecnofuncionales de harina de frijol pinto

Ximena Cruz García¹, María Guadalupe González García², Elsa Nelly Flores Hernández³ y Miguel Ángel Martínez Maldonado^{4*}

¹ Tecnológico Nacional de México/ Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Estudiante de Ingeniería en Innovación Agrícola, Hidalgo, 42411, México.

² Tecnológico Nacional de México/ Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Gastronomía, Hidalgo, 42411, México.³

* Correspondencia: mamartinez@iteshu.edu.mx

Resumen: La germinación representa una estrategia de bioprocesamiento con potencial para modular la funcionalidad de harinas de leguminosas. Este estudio experimental de laboratorio, con enfoque cuantitativo y alcance exploratorio-comparativo, tuvo como objetivo evaluar el efecto de la germinación de la semilla de frijol pinto sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina de frijol. Se obtuvieron harinas a partir de semillas sin germinar y germinadas durante 24, 48 y 72 h, y se determinaron la capacidad emulsificante, la capacidad de retención de agua, la capacidad de retención de aceite y la capacidad mínima de gelificación. La germinación modificó de manera selectiva las propiedades evaluadas. La harina germinada durante 48 h mostró mayor estabilidad emulsificante a tiempos prolongados; sin embargo, presentó una disminución significativa en la capacidad de retención de aceite. La retención de agua no presentó diferencias significativas entre tratamientos. La gelificación estable se observó a concentraciones de 10-14 %. La germinación moduló la funcionalidad de la harina de frijol de forma dependiente del tiempo y de la propiedad evaluada.

Keywords: Bioprocesamiento; leguminosas; ingredientes tecnofuncionales

Citar este trabajo: Cruz García, X.; González García, M.G.; Flores Hernández, E.N.; Martínez Maldonado, M.A. Título; Evaluación del efecto de la germinación sobre las propiedades tecnofuncionales de harina de frijol pinto. RELITEC'S 2026, 9^a, edición, Vol. 1 ISSN 2395-972X

Recibido: 18-07-2026
Aceptado: 22-07-2026
Publicado: 31-07-2026

1. Introducción

Las leguminosas ocupan un lugar relevante en los sistemas alimentarios contemporáneos por su contribución integral en la seguridad alimentaria, la sostenibilidad agrícola y la diversificación de fuentes de proteína vegetal. Dentro de este grupo, el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) se destaca por su amplia adaptación agronómica, su valor nutricional y su importancia cultural en América Latina. El frijol pinto, en particular, constituye una de las variedades de mayor consumo en el norte de México y el suroeste de Estados Unidos, donde forma parte de preparaciones culinarias tradicionales y de consumo cotidiano. Desde un punto de vista composicional, los frijoles aportan proteína, fibra, almidón, minerales y compuestos bioactivos. Sin embargo, su aprovechamiento industrial no depende únicamente de su densidad nutricional, sino también de la forma en que sus componentes responden al procesamiento y a su incorporación en matrices alimentarias complejas (Sathe, 2002; Jukanti *et al.*, 2012; Sharan *et al.*, 2021). En la ciencia y tecnología de alimentos, el interés por las harinas de leguminosas ha crecido de manera notable debido a su potencial como ingredientes en productos horneados, extruidos, sistemas emulsionados, análogos cárnicos, sopas instantáneas, salsas y formulaciones sin gluten. Sin embargo, el desempeño tecnológico de estas harinas se define por un conjunto de propiedades tecnofuncionales que incluyen, entre otras, la capacidad de retención de agua, la capacidad de retención de aceite, la capacidad emulsificante y la gelificación. Dichas propiedades dependen de la interacción

entre proteínas, almidón, fibra, tamaño de partícula y grado de daño estructural inducido por el procesamiento. Por lo cual, una harina nutricionalmente valiosa puede no ser necesariamente un ingrediente funcionalmente competitivo si no exhibe una hidratación adecuada, estabilidad interfacial o capacidad de estructuración en condiciones de uso industrial (Sathe, 2002; Ghavidel y Prakash, 2006 ; Sharan *et al.*, 2021).

Entre los factores que explican la funcionalidad de las harinas de frijol, la fracción proteica ocupa un papel central. Las proteínas de leguminosas contribuyen a la absorción de agua, a la estabilización de emulsiones y a la formación de redes gelificadas mediante mecanismos que involucran solubilidad, estado conformacional de las proteínas, exposición de regiones hidrofóbicas e hidrofílicas, y posibilidad de agregación ordenada durante el calentamiento o la hidratación. De manera paralela, el almidón y la fibra modulan la viscosidad, la retención de fase acuosa y la formación de estructura. Sathe (2002) reportó que la funcionalidad de proteínas y harinas de frijol no puede interpretarse de forma aislada, sino como resultado de la composición integral de la matriz. En ese sentido, la evaluación de propiedades tecnofuncionales en harina entera y no solo en aislados proteicos, resulta pertinente cuando se busca desarrollar ingredientes de uso directo para formulaciones alimentarias (Sathe, 2002; Ghavidel y Prakash, 2006).

La germinación ha sido propuesta como una estrategia de bioprocesamiento de bajo costo y relativamente fácil escalamiento para mejorar la calidad nutricional y modular la funcionalidad de las semillas. Durante este proceso se activan enzimas endógenas (principalmente amilasas, proteasas y fitasas) que movilizan las reservas del cotiledón y promueven cambios en la organización supramolecular de almidón y proteínas. Como consecuencia, pueden ocurrir reducciones en ciertos factores antinutricionales, aumento de la digestibilidad, cambios en la solubilidad proteica, variaciones en la porosidad de la matriz y modificaciones en la disponibilidad de grupos funcionales capaces de interactuar con agua, aceite o interfaces aceite-agua (Ghavidel y Prakash, 2006; Jukanti *et al.*, 2012; Onwuka *et al.*, 2024). En semillas germinados de distintas especies se ha documentado que la hidrólisis parcial de macromoléculas puede mejorar algunas propiedades de desempeño tecnológico; sin embargo, también se ha reportado que una transformación excesiva puede debilitar la capacidad de formar redes o reducir el atrapamiento físico de fases líquidas (Ghavidel y Prakash, 2006; Sharan *et al.*, 2021; Onwuka *et al.*, 2024).

A pesar de este interés, la evidencia disponible muestra que la germinación no ejerce efectos uniformes sobre las propiedades tecnofuncionales de las leguminosas. En el 2006 Ghavidel y Prakash, reportaron que la germinación y el descascarado pueden alterar de manera importante la funcionalidad de harinas de leguminosas, aunque los efectos sobre las propiedades tecnofuncionales dependen de la especie y del atributo evaluado. De manera similar, Sharma *et al.*, (2019), observaron en harina de chícharo germinado modificaciones en la absorción de agua y aceite, así como en la capacidad de formación de geles. Asimismo, Sofi *et al.*, (2023) documentaron alteraciones en el comportamiento reológico y de gelificación en sistemas de garbanzo. Además, Medhe *et al.*, (2022), señalaron que la germinación puede incluso reducir la concentración mínima de gelificación en ciertos materiales. Por otro lado, otros estudios muestran mejoras discretas, lo que sugiere que la germinación debe entenderse no como una tecnología universal de “mejora”, sino como una herramienta de modulación funcional altamente dependiente del tiempo, del cultivo, del secado posterior y del tipo de harina obtenida (Ghavidel y Prakash, 2006; Onwuka *et al.*, 2024).

La capacidad de retención de agua, la capacidad de retención de aceite, la capacidad emulsificante y la gelificación mínima son propiedades tecnofuncionales relevantes para valorar el potencial de las harinas de frijol como ingredientes en matrices semisólidas, masas, productos reestructurados, salsas, rellenos, bebidas proteicas, análogos cárnicos y

otros sistemas alimentarios con requerimientos específicos de hidratación, lubricidad, estabilidad física y formación de estructura. La retención de agua está asociada con el rendimiento, la suavidad de textura y la estabilidad del producto final; sin embargo, su comportamiento depende del equilibrio entre componentes capaces de inmovilizar agua (como proteínas, almidón y fibra) y las modificaciones estructurales inducidas por el procesamiento. En este sentido, la germinación puede favorecer la accesibilidad del agua mediante el aumento de la porosidad o la ruptura de barreras celulares, pero también puede disminuir la masa molecular efectiva de proteínas y polisacáridos responsables de formar redes capaces de atrapar agua, lo que explica que la literatura reporte respuestas variables después de la germinación (Atudorei *et al.*, 2021; Medhe *et al.*, 2022; Onwuka *et al.*, 2024). De forma similar, la capacidad de retención de aceite depende de la exposición de sitios hidrofóbicos, de la integridad del entramado particulado y del atrapamiento de lípidos en espacios interpartículas, mientras que la capacidad emulsificante se relaciona con la adsorción de compuestos, principalmente proteínas, en la interfase aceite-agua y con la formación de películas viscoelásticas que estabilizan las gotas dispersas (Sathe, 2002; Viana y English, 2022). Estudios previos sugieren que la hidrólisis parcial inducida por la germinación puede incrementar la flexibilidad molecular y favorecer la estabilización interfacial. Sin embargo, una desorganización excesiva de la matriz puede comprometer la retención de aceite, por lo que estos atributos deben evaluarse en función del tiempo de germinación (Sharma *et al.*, 2019; Onwuka *et al.*, 2024; Chinma *et al.*, 2025). Asimismo, la gelificación mínima es determinante para el diseño de ingredientes, ya que define la concentración necesaria para formar una red tridimensional estable, con impacto directo sobre textura, estructura y costo de formulación. En harinas de leguminosas, este fenómeno depende de la concentración relativa de proteínas, almidón y fibra, del grado de hidrólisis o desnaturalización alcanzado y de la capacidad de los biopolímeros para asociarse durante la hidratación y el calentamiento. Aunque en algunos sistemas la germinación mejora la capacidad gelificante, en otros puede reducirla cuando la proteólisis o la amilólisis disminuyen la longitud efectiva de cadena o debilitan los puntos de unión entre macromoléculas (Medhe *et al.*, 2022; Sofi *et al.*, 2023; Badia-Olmos *et al.*, 2023). Por ello, en harinas destinadas a alimentos espesados, purés, rellenos, productos moldeados y matrices semisólidas, resulta indispensable comprender cómo la germinación modula de manera diferencial estas propiedades, ya que pequeñas variaciones en hidratación, retención de aceite, emulsificación o capacidad de gelificación pueden repercutir significativamente en el desempeño tecnológico y en la aceptabilidad del producto final (Medhe *et al.*, 2022; Sofi *et al.*, 2023; Badia-Olmos *et al.*, 2023).

Pese al creciente interés por las harinas de leguminosas germinadas, todavía existe poca información sobre el frijol pinto, particularmente cuando se estudia harina integral obtenida a partir de tiempos cortos de germinación. Los estudios actuales, se ha concentrado en cambios nutricionales, reducción de antinutrientes o comportamiento de otras especies como garbanzo, haba o chicharro. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la germinación de la semilla de frijol pinto sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina de frijol, con la finalidad de la generación de información para la valorización tecnológica de esta leguminosa como ingrediente alimentario

2. Materiales y Métodos

2.1 Obtención de harina de frijol pinto mediante diferentes tiempos de germinación

El frijol pinto fue adquirido en el mercado local de Huichapan, Hidalgo. Para la evaluación del efecto de la germinación sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina de frijol pinto, se prepararon cuatro muestras independientes de 100 g de semilla cada una. Previo al inicio del procedimiento experimental, se verificó el correcto funcionamiento de la cámara bioclimática y del horno de secado, con la finalidad de asegurar condiciones adecuadas durante las etapas de germinación y deshidratación.

Las semillas se sometieron inicialmente a un proceso de remojo en agua potable durante 6 h, empleando una relación semilla:agua de 1:3, con el propósito de favorecer la hidratación homogénea del grano y activar las condiciones iniciales necesarias para el proceso de germinación. Una vez concluido el remojo, las muestras se distribuyeron en cuatro tratamientos experimentales de acuerdo con el tiempo de germinación: F0, correspondiente a 0 h de germinación; F2, correspondiente a 24 h; F4, correspondiente a 48 h; y F7, correspondiente a 72 h. La muestra F0 se consideró como tratamiento control, por lo que, después del remojo, fue trasladada directamente al horno de secado sin ser sometida a germinación. Las muestras F2, F4 y F7 se colocaron en una cámara bioclimática durante los tiempos establecidos, bajo condiciones controladas y a una temperatura de 25 °C que permitieron el desarrollo del proceso germinativo.

Al término de cada periodo de germinación, las muestras fueron retiradas de la cámara bioclimática y sometidas a secado en horno convencional a 90 °C durante 24 h. Esta etapa tuvo como finalidad reducir el contenido de humedad de las semillas y detener la actividad metabólica asociada con la germinación, favoreciendo la estabilidad del material previo a la molienda. Una vez concluido el secado, las semillas correspondientes a cada tratamiento fueron molidas hasta obtener harina. Posteriormente, la harina fue tamizada con el propósito de uniformar el tamaño de partícula y reducir la variabilidad física entre tratamientos. Por último, las harinas obtenidas fueron identificadas de acuerdo con su tratamiento de germinación y posteriormente utilizadas para la evaluación de sus propiedades tecnofuncionales, incluyendo capacidad emulsificante, capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite y capacidad mínima de gelificación.

2.2 Evaluación de la capacidad emulsificante y estabilidad de emulsión

La capacidad emulsificante y la estabilidad de emulsión de las harinas de frijol pinto obtenidas a partir de los diferentes tiempos de germinación se determinaron mediante una metodología adaptada de procedimientos descritos para la evaluación tecnofuncional de harinas vegetales. Para cada tratamiento, se pesó previamente un tubo cónico de 50 mL y posteriormente se colocaron 3 g de harina de frijol. La muestra se dispersó en 30 mL de agua destilada en una jarra medidora y se homogeneizó con un homogeneizador tipo Ultra-Turrax durante 2-3 min, hasta obtener una dispersión uniforme. Posteriormente, la dispersión se dejó reposar durante 20 min a temperatura ambiente, con la finalidad de favorecer la hidratación de la harina y permitir la interacción inicial de sus componentes con la fase acuosa. Transcurrido el periodo de hidratación, se adicionó aceite vegetal a la dispersión hidratada y la mezcla se homogeneizó nuevamente durante 1 min con el mismo equipo, hasta formar una emulsión cremosa y uniforme, sin separación visible inmediata de fases. La emulsión obtenida se transfirió cuidadosamente al tubo cónico de 50 mL y se registró el volumen total de la muestra (V_t). La estabilidad de la emulsión se evaluó mediante la lectura del volumen de la capa emulsificada o fase cremosa visible a diferentes tiempos de reposo: 10, 30, 60 y 90 min, así como después de 24 h.

La capacidad emulsificante o estabilidad de emulsión se expresó como porcentaje de la fase emulsificada respecto al volumen total de la muestra, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Capacidad emulsificante (\%)} = (\text{Volumen de la capa emulsificada (mL)} * \text{Volumen total de la emulsión (mL)}) / 100, \quad (1)$$

Durante el registro de datos se consideró la separación de fases como indicador de menor estabilidad emulsificante. Las muestras menos estables presentaron separación completa o parcial de las fases acuosa y oleosa, mientras que las emulsiones más estables conservaron una capa cremosa, firme y visible durante los tiempos de evaluación. Las determinaciones se realizaron para cada tratamiento por triplicado.

2.3 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua de las harinas de frijol pinto obtenidas a partir de los diferentes tiempos de germinación se determinó mediante una metodología gravimétrica adaptada de procedimientos previamente reportados para harinas y concentrados proteicos de leguminosas. Para cada tratamiento, se realizaron tres repeticiones independientes. Inicialmente, se prepararon y etiquetaron tubos cónicos limpios y secos, los cuales fueron pesados en una balanza analítica para registrar el peso del tubo vacío. Posteriormente, se adicionó 1 g de harina de frijol pinto correspondiente a cada tratamiento. A cada tubo se le agregaron 10 mL de agua destilada y la mezcla se homogenizó en vortex durante 30 s, con el propósito de asegurar una dispersión uniforme de la harina y evitar la formación de grumos. Después de la homogenización, las muestras se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 15 min, con la finalidad de permitir la hidratación de los componentes de la harina y favorecer la absorción de agua por parte de proteínas, almidón, fibra y otros compuestos hidrofílicos presentes en la matriz. Transcurrido el tiempo de reposo, los tubos fueron colocados en una centrifugadora y centrifugados durante 15 min a 4000 rpm. Al finalizar la centrifugación, se observó la separación entre el sobrenadante acuoso no retenido y el sedimento correspondiente a la harina hidratada. El sobrenadante se eliminó cuidadosamente por decantación, evitando la pérdida del sedimento. Posteriormente, los tubos se colocaron inclinados sobre papel absorbente durante 2 min para retirar el exceso de agua superficial no retenida por la muestra. Para finalizar, los tubos con el sedimento hidratado fueron pesados nuevamente. La capacidad de retención de agua se calculó a partir de la diferencia entre el peso del sedimento hidratado y el peso inicial de la harina seca, expresándose como gramos de agua retenida por gramo de harina seca, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{CRA (g/g)} = (\text{SH sedimento hidratado} - \text{HS harina seca}) * \text{HS harina seca} \quad (2)$$

donde (CRA) corresponde a la capacidad de retención de agua, (SH sedimento hidratado) representa el peso del sedimento después de la centrifugación y eliminación del sobrenadante, y (HS harina seca) corresponde al peso inicial de harina utilizada en la determinación. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones por tratamiento.

2.4 Capacidad de retención de aceite

La capacidad de retención de aceite de las harinas de frijol pinto obtenidas a partir de los diferentes tiempos de germinación se determinó mediante una metodología gravimétrica adaptada de procedimientos previamente reportados para harinas y fracciones proteicas de leguminosas. Para cada tratamiento se realizaron tres repeticiones independientes. Inicialmente, se prepararon y etiquetaron tubos cónicos limpios y secos, los cuales fueron pesados en una balanza analítica para registrar el peso del tubo vacío. Posteriormente, se adicionó 1 g de harina de frijol pinto correspondiente a cada tratamiento. A cada tubo se le agregaron 10 mL de aceite vegetal y la mezcla se homogenizó en vortex durante 30 s, con la finalidad de asegurar una dispersión uniforme de la harina en la fase oleosa y evitar la formación de grumos. Después de la homogenización, las muestras se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 15 min para favorecer la interacción entre los componentes de la harina y el aceite. Este periodo permitió que proteínas, fibra, almidón y otros componentes de la matriz establecieran interacciones físicas o hidrofóbicas asociadas con la retención de lípidos. Después, los tubos fueron colocados en una centrifugadora y centrifugados durante 15 min a 4000 rpm. Al finalizar la centrifugación, se observó la separación entre el aceite libre no retenido y el sedimento correspondiente a la harina impregnada con aceite. El sobrenadante oleoso se eliminó cuidadosamente por decantación, evitando la pérdida del sedimento. Posteriormente, los tubos se colocaron inclinados sobre papel absorbente durante 2 min para retirar el exceso de aceite superficial no retenido por la muestra. Por último, los tubos con el sedimento fueron pesados nuevamente. La capacidad de retención de aceite se calculó a partir de la diferencia entre el peso del sedimento impregnado con aceite y el peso inicial de la harina seca, expresándose como gramos de aceite retenido por gramo de harina seca, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{CRAC g/g} = (\text{SA sedimento con aceite} - \text{HS harina seca}) * \text{HS harina seca} \quad (3)$$

donde (CRAC) corresponde a la capacidad de retención de aceite, (SA sedimento con aceite) representa el peso del sedimento después de la centrifugación, eliminación del sobrenadante y retiro del exceso superficial de aceite, y (HS harina seca) corresponde al peso inicial de harina utilizado en la determinación. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones por tratamiento.

2.5 Determinación de la concentración mínima de gelificación

La concentración mínima de gelificación de las harinas de frijol pinto obtenidas a partir de los diferentes tiempos de germinación se determinó mediante una metodología cualitativa adaptada de procedimientos previamente reportados para harinas de leguminosas. Para cada tratamiento se prepararon dispersiones de harina en agua destilada a concentraciones de 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 % p/v. Para ello, se pesaron 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 g de harina, respectivamente, en tubos de ensayo limpios y secos. Posteriormente, se adicionó agua destilada a cada tubo hasta alcanzar un volumen final de 5 mL, con la finalidad de obtener las concentraciones establecidas. Las dispersiones se agitaron en vortex hasta lograr una mezcla homogénea, evitando la presencia de grumos o material seco adherido a las paredes del tubo. Posteriormente, las muestras se dejaron reposar durante 20 min a temperatura ambiente para favorecer la hidratación de los componentes de la harina antes del tratamiento térmico. Transcurrido este periodo, los tubos se colocaron en baño María a 85-90 °C/60 min. Después del calentamiento, los tubos se retiraron del baño María y se enfriaron a temperatura ambiente durante 20 min. Posteriormente, las muestras se mantuvieron en refrigeración durante 24 h para favorecer la formación y estabilización de la red de gel. Finalizado el periodo de refrigeración, la formación de gel se evaluó visualmente mediante la inversión cuidadosa de cada tubo. La concentración mínima de gelificación se definió como la menor concentración de harina capaz de formar un gel estable que no se deslizó ni fluyó al invertir el tubo.

La respuesta de gelificación se registró de forma ordinal utilizando la siguiente escala: “-”, ausencia de gel; “±”, gel débil o parcialmente estable; y “+”, gel estable. Este registro permitió comparar el efecto del tiempo de germinación sobre la capacidad de las harinas de frijol pinto para formar estructuras gelificadas. Los resultados se organizaron en una matriz de respuesta por concentración y tratamiento, considerando como criterio principal la menor concentración con formación de gel estable.

2.6 Diseño experimental

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental, con alcance exploratorio y comparativo. El estudio se realizó en condiciones de laboratorio, con el propósito de evaluar el efecto del tiempo de germinación de la semilla de frijol pinto sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina obtenida. Para ello, se consideró como factor experimental el tiempo de germinación, con cuatro niveles de evaluación: 0, 24, 48 y 72 h, correspondientes a los tratamientos F0, F2, F4 y F7, respectivamente.

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante determinaciones experimentales aplicadas a cada tratamiento. Las variables cuantitativas se obtuvieron a partir de mediciones gravimétricas y volumétricas realizadas bajo condiciones controladas, mientras que la gelificación mínima se registró mediante una escala ordinal basada en la formación visual de gel. Las determinaciones se realizaron con repeticiones experimentales, y los resultados fueron organizados para su análisis comparativo entre tratamientos, con el fin de identificar posibles modificaciones asociadas al proceso de germinación.

El análisis estadístico se realizó con el software Statistica v7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía, considerando como factor el tiempo de germinación. Las diferencias entre medias se evaluaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, considerando significancia estadística cuando $p < 0.05$.

3. Resultados

3.1 Efecto de la germinación del frijol sobre la capacidad espumante de las harinas de frijol

La capacidad emulsificante en harinas se define como la habilidad de sus componentes, principalmente proteínas, para formar y estabilizar emulsiones al facilitar la dispersión de una fase líquida (aceite) en otra (agua), mediante la adsorción en la interfase y la reducción de la tensión superficial. En la tabla 1, se presenta los resultados de la germinación influyó en la capacidad emulsificante de la harina de frijol, observándose valores iniciales más altos en la harina sin germinar y una mejora en la estabilidad emulsificante en tratamientos con germinación intermedia. Los valores oscilaron desde 40 ml a los 10 min en el control, hasta valores cercanos a 18 ml a las 24 h en el tratamiento con mejor desempeño. La germinación modificó significativamente la capacidad emulsificante de la harina de frijol en función del tiempo de evaluación, como se muestra en la tabla 1. A los 10 min, la harina sin germinar (T1/F0) presentó el mayor valor de capacidad emulsificante (40.0 ml), siendo estadísticamente superior a los tratamientos germinados ($p < 0.05$). Sin embargo, este comportamiento inicial disminuyó marcadamente después de 30 min, lo que sugiere una baja estabilidad de la emulsión formada por la harina control. A los 30 min no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica una respuesta emulsificante similar durante esta etapa intermedia. Sin embargo, a partir de los 60 min se evidenció un efecto positivo de la germinación, particularmente en el tratamiento T3/F4, correspondiente a 48 h de germinación. Este tratamiento presentó los valores más altos a 60 min (23.3), 90 min (24.7) y 24 h (18.0), con diferencias significativas respecto al control y a la mayoría de los tratamientos evaluados ($p < 0.05$).

Tabla 1. Determinación de la capacidad emulsificante de la harina de frijol obtenida después de la germinación de la semilla de frijol.

Tratamiento	Germinación (h)	10 min	30 min	60 min	90 min	24 h
T1/F0	0	40.0 ± 0.0 a	18.3 ± 1.2 a	18.7 ± 0.6 b	19.0 ± 1.0 c	13.3 ± 1.2 c
T2/F2	24	19.0 ± 1.7 b	19.0 ± 1.0 a	18.7 ± 1.2 b	20.7 ± 0.6 bc	15.7 ± 1.2 b
T3/F4	48	20.3 ± 0.6 b	19.3 ± 0.6 a	23.3 ± 1.2 a	24.7 ± 0.6 a	18.0 ± 0.0 a
T4/F7	72	20.7 ± 1.2 b	17.3 ± 0.6 a	19.7 ± 0.6 b	22.3 ± 0.6 b	15.0 ± 0.0 bc

Datos expresados como media ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos por Tukey ($p < 0.05$).

Estos resultados sugieren que un tiempo intermedio de germinación favorece la funcionalidad emulsificante de la harina de frijol, posiblemente debido a modificaciones estructurales en las proteínas y almidones, exposición de grupos hidrofóbicos. Por otro lado, la germinación prolongada hasta 72 h no incrementó adicionalmente la respuesta emulsificante, lo que indica que la mejora funcional podría depender de un grado óptimo de modificación de los cambios bioquímicos durante la germinación. El tratamiento T3/F4 puede considerarse la condición con mejor desempeño emulsificante, especialmente por su mayor estabilidad a tiempos prolongados.

3.2 Determinación de la capacidad de retención de agua en harinas obtenidas de frijol germinado

La capacidad de retención de agua es una propiedad funcional que describe la habilidad de un material para absorber y mantener agua dentro de su estructura bajo determinadas condiciones. En la tabla 2, se muestra la capacidad de retención de agua de las harinas de frijol no presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p > 0.05$). La harina control sin germinar (T1/F0) mostró un valor de 12.11, mientras que las harinas obtenidas después de 24, 48 y 72 h de germinación presentaron valores de 12.53, 12.43 y 12.51, respectivamente. Aunque se observó una ligera tendencia al incremento en las harinas germinadas, particularmente en T2/F2 y T4/F7, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Los resultados obtenidos bajo las condiciones evaluadas indican que la germinación de la semilla de frijol no produjo cambios suficientes en la matriz de la harina para modificar de manera significativa su capacidad de interacción con el agua. La capacidad de retención observada en todos los tratamientos puede estar relacionada con la composición intrínseca de la harina de frijol, particularmente con la presencia de proteínas y almidón, componentes capaces de hidratarse y retener agua dentro de la matriz alimentaria.

Tabla 2. Efecto de la germinación de la semilla de frijol sobre la capacidad de retención de agua de harinas de frijol.

Tratamiento	Germinación (h)	Capacidad de retención de agua
T1/F0	0	12.11 ± 0.22 a
T2/F2	24	12.53 ± 0.18 a
T3/F4	48	12.43 ± 0.12 a
T4/F7	72	12.51 ± 0.33 a

Datos expresados como media ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos por Tukey ($p < 0.05$).

3.3 Efecto del tiempo de germinación del frijol sobre la capacidad de retención de aceite en harinas de frijol

La capacidad de retención de aceite es una propiedad tecnofuncional que describe la habilidad de una harina para absorber y mantener aceite dentro de su matriz, principalmente a través de interacciones hidrofóbicas con proteínas, fibra y otros componentes estructurales. Esta propiedad es relevante en sistemas alimentarios donde se busca mejorar la retención de grasa, la jugosidad, la textura y la estabilidad de productos emulsionados, reestructurados o formulaciones tipo cárnicas. En la tabla 3, se presenta los resultados sobre como la germinación modificó significativamente la capacidad de retención de aceite de las harinas de frijol ($p < 0.05$). La harina sin germinar (T1/F0) presentó un valor de 11.01, sin diferencias significativas respecto a los tratamientos germinados durante 24 h (T2/F2; 10.94) y 72 h (T4/F7; 11.06). Por otro lado, el tratamiento T3/F4, correspondiente a 48 h de germinación, mostró el valor más bajo (10.22), siendo estadísticamente diferente al resto de los tratamientos. Estos resultados sugieren que la germinación durante 48 h pudo modificar la estructura de la matriz de la harina, reduciendo temporalmente su capacidad de interacción con la fase lipídica. Sin embargo, la recuperación observada a las 72 h indica que la respuesta funcional no fue lineal y podría depender del grado de modificación bioquímica inducido durante la germinación. Desde una perspectiva tecnofuncional, T1/F0, T2/F2 y T4/F7 conservaron una mayor capacidad de retención de aceite, lo que podría ser favorable para aplicaciones en matrices alimentarias donde se requiere retención de lípidos y mejora de textura.

Tabla 3. Efecto de la germinación de la semilla de frijol sobre la capacidad de retención de aceite de harinas de frijol.

Tratamiento	Germinación (h)	Capacidad de retención de agua
T1/F0	0	11.01 $\pm$ 0.17 a
T2/F2	24	10.94 $\pm$ 0.02 a
T3/F4	48	10.22 $\pm$ 0.18 b
T4/F7	72	11.06 $\pm$ 0.18 a

Datos expresados como media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos por Tukey ($p < 0.05$).

3.4 Determinación de la capacidad mínima de gelificación de harinas obtenidas de frijol germinado

La capacidad mínima de gelificación es una propiedad tecnofuncional que describe la menor concentración de harina o proteína necesaria para formar un gel estable bajo condiciones definidas de procesamiento. Esta propiedad depende principalmente de la interacción entre proteínas, almidón, fibra y otros biopolímeros, los cuales contribuyen a la formación de una red tridimensional capaz de retener agua y mantener la estructura del sistema. En la figura 1, se muestra el efecto de la germinación del frijol sobre la modificación diferencial la capacidad mínima de gelificación de las harinas. La harina sin germinar (T1/F0) presentó formación de gel estable desde 10 % de harina, mientras que las harinas germinadas requirieron concentraciones iguales o superiores para alcanzar una respuesta similar. En T3/F4, correspondiente a 48 h de germinación, se observó gel estable a partir de 12 %, mientras que T2/F2 y T4/F7 requirieron 14 % para formar geles estables.

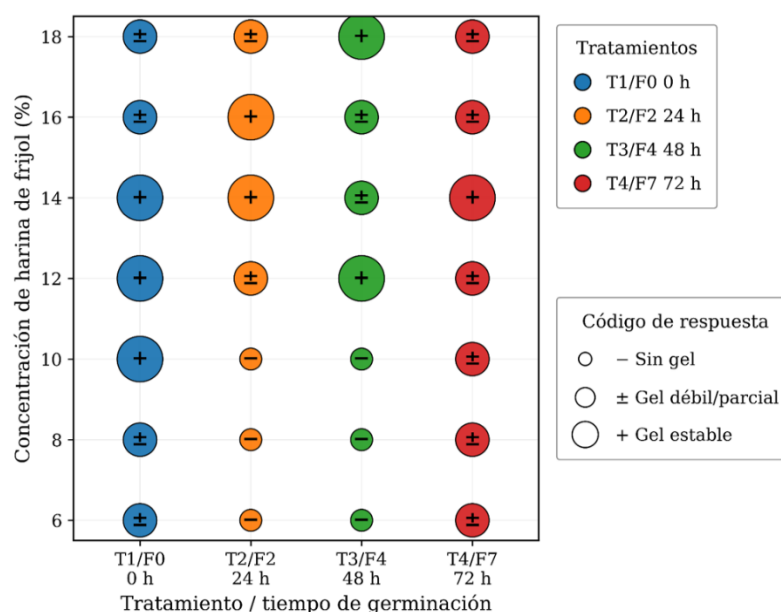


Figura 1. Evaluación de la gelificación mínima de harinas de frijol obtenidas después de diferentes tiempos de germinación. Los símbolos indican la respuesta observada: - = ausencia de gel, ± = gel débil o parcialmente estable y + = gel estable. Para el análisis exploratorio, las respuestas se codificaron como 0, 1 y 2, respectivamente. El tamaño del marcador representa el puntaje ordinal de gelificación.

El puntaje medio se obtuvo mediante la codificación ordinal de la respuesta de gelificación: - = 0, ausencia de gel; ± = 1, gel débil o parcialmente estable; y + = 2, gel estable. En la Figura 2 se muestran los valores del puntaje medio. Los resultados indican que la gelificación incrementó conforme aumentó la concentración de harina, alcanzando el valor máximo a 14 %, seguido de una disminución parcial en las concentraciones de 16 y 18 %. Los valores muestran que la respuesta de gelificación aumentó con la concentración de harina hasta alcanzar el mayor puntaje a 14 %, seguido de una disminución parcial a concentraciones de 16 y 18 %. por tratamiento no mostró diferencias significativas entre harinas, ya que todos los tratamientos compartieron la misma letra estadística. Sin embargo, desde una perspectiva tecnológica, la concentración de harina tuvo un efecto relevante sobre la formación del gel. Las concentraciones bajas, entre 6 y 10 %, mostraron principalmente geles débiles o ausencia de gel, mientras que las concentraciones de 12 y 14 % favorecieron una mayor estabilidad estructural. El mayor puntaje medio por concentración se observó a 14 %, lo que sugiere que esta proporción podría representar una condición adecuada para promover la gelificación de la harina de frijol.

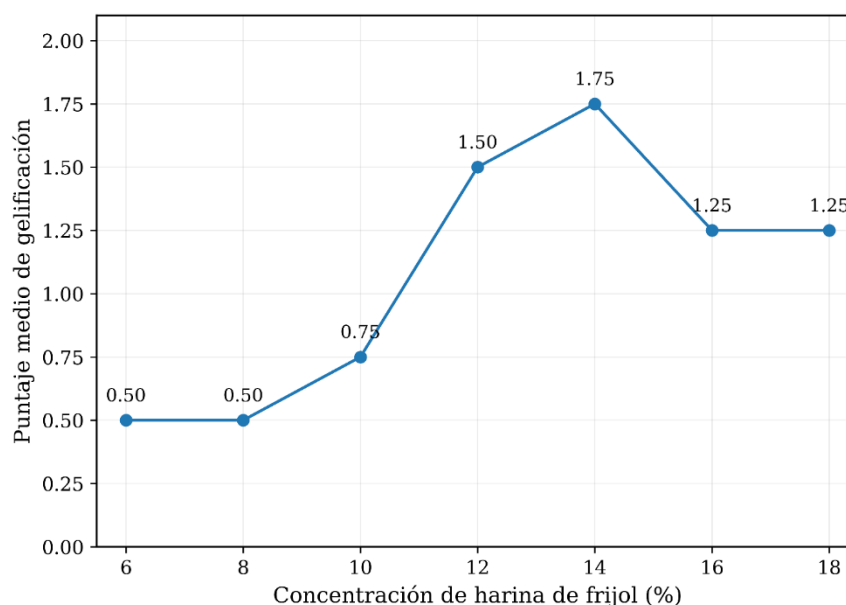


Figura 2. Puntaje medio de gelificación de harinas de frijol obtenidas después de la germinación de la semilla, en función de la concentración de harina.

Los resultados indican que la germinación no mejoró de forma evidente la capacidad mínima de gelificación en comparación con la harina sin germinar. No obstante, las harinas germinadas conservaron capacidad para formar geles estables, especialmente a concentraciones de 12-14 %, lo que respalda su posible uso como ingredientes tecnofuncionales en matrices alimentarias semisólidas, productos reestructurados y formulaciones que requieren formación de estructura.

4. Discusión

Los resultados obtenidos del presente estudio indican que la germinación de la semilla de frijol modificó las propiedades tecnofuncionales de la harina de manera selectiva, dependiente del tiempo de germinación y no necesariamente lineal. Este comportamiento confirma parcialmente la hipótesis de que la germinación podría mejorar la funcionalidad de la harina de frijol, ya que algunas propiedades mostraron respuestas favorables o diferenciadas, mientras que otras permanecieron sin cambios estadísticamente significativos. Los resultados sobre la respuesta propiedad-específica coincide con lo reportado para harinas de leguminosas, donde la germinación actúa como un bioproceso capaz de inducir cambios estructurales, bioquímicos y funcionales en proteínas, almidón, fibra y compuestos de reserva, pero con efectos variables según la especie, el cultivar, el tiempo de germinación, las condiciones de secado y la forma en que se evalúa la matriz alimentaria (Sathe, 2002; Atudorei *et al.*, 2021; Onwuka *et al.*, 2024; Chinma *et al.*, 2025).

Desde una perspectiva de mecanismos de acción se puede inferir que la germinación activa procesos metabólicos asociados con la movilización de reservas, particularmente mediante la acción de enzimas hidrolíticas como amilasas, proteasas y fitasas. Estas enzimas pueden modificar la organización del cotiledón, alterar la matriz almidón-proteína, aumentar la porosidad estructural y favorecer la exposición de grupos funcionales capaces de interactuar con agua, aceite o interfaces aceite-agua. Sin embargo, el efecto tecnológico final depende del equilibrio entre la generación de estructuras más reactivas y la posible pérdida de macromoléculas con capacidad de formar redes o retener fases líquidas. Por lo cual, la germinación no debe interpretarse como una estrategia universal de mejora funcional, sino como una herramienta de modulación cuyo impacto depende del atributo evaluado y del grado de transformación alcanzado durante el

proceso (Ghavidel y Prakash, 2006; Sharma *et al.*, 2019; Medhe *et al.*, 2022; Onwuka *et al.*, 2024).

En el caso de la capacidad emulsificante, los resultados sugieren que la germinación intermedia favoreció la estabilidad de la emulsión, particularmente en la harina obtenida a las 48 h. Aunque la harina sin germinar presentó una mayor respuesta inicial, este comportamiento disminuyó en los tiempos posteriores, lo que indica que la emulsión formada por el control fue menos estable. Por otro lado, el tratamiento de 48 h mostró valores superiores a 60 min, 90 min y 24 h, lo que permite inferir una mejor capacidad de estabilización de la interfase aceite-agua. Este efecto podría estar relacionado con una hidrólisis parcial de proteínas que facilite su difusión y adsorción interfacial, así como con una mayor exposición de regiones hidrofóbicas e hidrofílicas necesarias para estabilizar emulsiones. Este comportamiento es consistente con estudios que indican que la funcionalidad emulsificante de proteínas de leguminosas depende de su solubilidad, flexibilidad molecular, hidrofobicidad superficial y capacidad para formar películas interfaciales estables (Sathe, 2002; Viana y English, 2022; Onwuka *et al.*, 2024).

La capacidad de retención de agua no presentó diferencias significativas entre tratamientos, manteniéndose en un intervalo estrecho. Este resultado indica que la germinación entre 24 y 72 h no modificó la capacidad global de la harina para absorber y retener agua. Esta respuesta podría explicarse por la interacción simultánea de procesos estructurales contrapuestos. Por una parte, la germinación puede favorecer una mayor porosidad de la matriz, facilitando la penetración del agua; por otra, la hidrólisis parcial de almidones y proteínas puede disminuir la proporción de macromoléculas con capacidad para inmovilizar agua dentro de la estructura de la harina. El balance entre ambos procesos podría explicar la que los tiempos de germinación no hayan tenido un efecto en la capacidad de retención de agua. En la literatura consultada, se ha encontrado estudios que reportan resultados opuestos, ya que algunas leguminosas incrementan su capacidad de retención de agua después de germinar, mientras que otras presentan reducciones o cambios mínimos dependiendo de la matriz y las condiciones de procesamiento (Ghavidel y Prakash, 2006; Jukanti *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2019; Badia-Olmos *et al.*, 2023). Desde el punto de vista tecnológico, la estabilidad de esta propiedad puede considerarse favorable, ya que indica que la germinación no compromete la capacidad de hidratación de la harina, aspecto relevante en masas, sopas, salsas, productos reestructurados y matrices semisólidas.

A diferencia de la retención de agua, la capacidad de retención de aceite mostró una respuesta dependiente del tiempo. La disminución significativa observada a las 48 h sugiere una modificación transitoria de la matriz, posiblemente asociada con cambios en la disponibilidad de sitios hidrofóbicos, alteraciones en la estructura proteica o pérdida temporal de capacidad de atrapamiento físico de lípidos. La recuperación observada a las 72 h indica que la respuesta no fue lineal, sino posiblemente bifásica: una etapa intermedia de desorganización estructural, seguida de una reorganización funcional parcial. Esta interpretación concuerda con reportes donde la germinación puede incrementar, disminuir o no modificar la retención de aceite, dependiendo de la intensidad del proceso y de la composición específica de la harina (Ghavidel y Prakash, 2006; Sharma *et al.*, 2019). Tecnológicamente, este resultado es relevante porque la retención de aceite se relaciona con jugosidad, lubricidad, textura y retención de compuestos lipofílicos en alimentos formulados.

La gelificación mínima mostró una lectura particularmente importante desde la perspectiva de aplicación. Aunque el puntaje medio por tratamiento no presentó diferencias significativas, el umbral práctico para formar geles estables sí cambió. La harina sin germinar formó gel estable desde 10 %, mientras que las harinas germinadas

requirieron concentraciones mayores, principalmente entre 12 y 14 %. Esto sugiere que la germinación conservó, pero no potenció, la eficiencia gelificante de la harina. La hidrólisis parcial inducida durante la germinación puede favorecer cierta movilidad molecular; sin embargo, una degradación excesiva de proteínas o almidón puede reducir la longitud efectiva de las cadenas necesarias para construir una red tridimensional firme (Sathe, 2002). Este comportamiento ha sido reportado en otras leguminosas, donde la germinación puede incrementar la concentración mínima de gelificación o reducir la fuerza del gel, aunque también existen estudios que reportan el efecto contrario según la matriz evaluada (Sharma *et al.*, 2019; Medhe *et al.*, 2022; Badia-Olmos *et al.*, 2023; Sofi *et al.*, 2023).

5. Conclusiones

El presente estudio exploratorio evidenció que la germinación de la semilla de frijol modificó de manera selectiva las propiedades tecnofuncionales de la harina obtenida, sin generar una respuesta lineal en los atributos evaluados. La capacidad emulsificante mostró una mejora relevante en la harina germinada durante 48 h, particularmente en términos de estabilidad a tiempos prolongados, lo que sugiere una posible modificación estructural de la matriz proteica favorable para la formación de sistemas emulsionados. Sin embargo, entre los tratamientos no hubo cambio significativo en los valores de la capacidad de retención de agua, indicando que la germinación no comprometió la funcionalidad de hidratación de la harina. La capacidad de retención de aceite disminuyó significativamente a las 48 h, aunque aumentó a las 72 h. Por su parte, la gelificación mínima mostró que las harinas germinadas requirieron mayores concentraciones para formar geles estables en comparación con la harina sin germinar. Por lo cual, la germinación debe considerarse como una estrategia de modulación funcional dependiente del tiempo y de la propiedad tecnológica de interés. Como perspectiva futura, se recomienda complementar estos resultados con análisis de composición proximal y propiedades fisicoquímicas, así como de las propiedades nutraceuticas y reológicas.

Contribución: Conceptualización, M.A.M.M.; análisis formal, E.N.F.H., y M.A.M.M.; investigación, X.C.G. y M.G.G.G.; recursos, M.A.M.M.; redacción—preparación del borrador original, X.C.G. y M.A.M.M.; redacción- revisión y edición, M.G.G.G y M.A.M.M visualización, E.N.F.H., y M.A.M.M.; supervisión, M.A.M.M.; administración del proyecto, M.A.M.M.; adquisición de financiamiento, E.N.F.H., y M.A.M.M Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiado por el TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, con el número de proyecto 25238.26-PD.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses. Los financiadores no tuvieron ningún rol en el diseño del estudio; en la recopilación, análisis o interpretación de datos; en la redacción del manuscrito, o en la decisión de publicar los resultados.

Referencias

1. Atudorei, D., Stroe, S. G., & Codină, G. G. (2021). Impact of germination on the microstructural and physicochemical properties of different legume types. *Plants*, 10(3), 592. <https://doi.org/10.3390/plants10030592>
2. Badia-Olmos, C., Laguna, L., Haros, C. M., & Tárrega, A. (2023). Techno-functional and rheological properties of alternative plant-based flours. *Foods*, 12(7), 1411. <https://doi.org/10.3390/foods12071411>
3. Chinma, C. E., Ezeocha, V. C., Shadrach, A. M., Onwuka, Q. I., & Adebo, O. A. (2025). Impact of short-term germination on the nutritional, physicochemical, and techno-functional properties of black turtle beans. *Journal of Food Science*, 90(6), e70298. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70298>
4. Ghavidel, R. A., & Prakash, J. (2006). Effect of germination and dehulling on functional properties of legume flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(8), 1189–1195. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2460>
5. Jukanti, A. K., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., & Chibbar, R. N. (2012). Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): A review. *British Journal of Nutrition*, 108(S1), S11–S26.
6. Medhe, S. V., Kamble, M. T., Kettawan, A. K., Monboonpitak, N., & Kettawan, A. (2022). Effect of hydrothermal cooking and germination treatment on functional and physicochemical properties of *Parkia timoriana* bean flours: An underexplored legume species of *Parkia* genera. *Foods*, 11(13), 1822. <https://doi.org/10.3390/foods11131822>
7. Onwuka, Q. I., Chinma, C. E., Ezeocha, V. C., Otegbayo, B., Oyeyinka, S. A., Adebo, J. A., Wilkin, J., Bamidele, O. P., & Adebo, O. A. (2024). Short-term germinated legume flours as functional ingredients in food products. *Journal of Food Science*, 89(10), 6070–6085. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17334>
8. Sathe, S. K. (2002). Dry bean protein functionality. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(2), 175–223. <https://doi.org/10.1080/07388550290789487>
9. Sharan, S., Zanghelini, G., Zotzel, J., Bonerz, D., Aschoff, J., Saint-Eve, A., & Maillard, M. N. (2021). Fava bean (*Vicia faba* L.) for food applications: From seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 401–428.
10. Sharma, S., Singh, A., & Singh, B. (2019). Characterization of in vitro antioxidant activity, bioactive components, and nutrient digestibility in pigeon pea (*Cajanus cajan*) as influenced by germination time and temperature. *Journal of Food Biochemistry*, 43(2), e12706. <https://doi.org/10.3920/QAS2018.1357>
11. Sofi, S. A., Rafiq, S., Singh, J., Mir, S. A., Sharma, S., Bakshi, P., Dar, B. N. (2023). Impact of germination on structural, physicochemical, techno-functional, and digestion properties of desi chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour. *Food Chemistry*, 405, 135011.
12. Viana, L., & English, M. (2022). The impact of dehulling and germination on the physiochemical, protein solubility and water and oil holding capacities of yellow eye bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein concentrates. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 855788. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.855788>