



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA

**“DESARROLLO DE UN ALIMENTO TIPO HOT
CAKE CON HARINA DE TRIGO SARRACENO
GERMINADO (*FAGOPYRUM ESCULENTUM*):
EVALUACIÓN *IN VITRO* DE SU CAPACIDAD
ANTIOXIDANTE Y DE SU RESPUESTA FRENTE
AL ÓXIDO NÍTRICO COMO APROXIMACIÓN A
PROCESOS POTENCIALMENTE
RELACIONADOS CON EL ESTADO DE ÁNIMO”**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

NATALIE VILLA MAZÓN

Director

DR. ALAN AMADO RUIZ HERNÁNDEZ



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Y METALURGIA

**“DESARROLLO DE UN ALIMENTO TIPO HOT
CAKE CON HARINA DE TRIGO SARRACENO
GERMINADO (*FAGOPYRUM ESCULENTUM*):
EVALUACIÓN *IN VITRO* DE SU CAPACIDAD
ANTIOXIDANTE Y DE SU RESPUESTA FRENTE
AL ÓXIDO NÍTRICO COMO APROXIMACIÓN A
PROCESOS POTENCIALMENTE
RELACIONADOS CON EL ESTADO DE ÁNIMO”**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

NATALIE VILLA MAZÓN

Director

DR. ALAN AMADO RUIZ HERNÁNDEZ

Votos aprobatorios del Jurado

Dedicatoria

A Dios, por ser la luz de mi camino, por darme la fuerza y el amor para superar cada obstáculo, por guiarme y darme tantas oportunidades, también porque me permitió vivir esta etapa rodeada de bendiciones y personas que me aman.

A mi padre, por su esfuerzo constante, su apoyo incondicional, por poner mi nombre en sus oraciones, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación los sueños se cumplen, por ser mi ejemplo que guía mis pasos día a día.

A la memoria de mi madre, cuyo amor eterno sigue vivo en mi corazón y brilla en las estrellas siendo mi inspiración en cada logro.

A la memoria de mis abuelos, Carmen, Rodolfo, Regulo y Eva, quienes estarían muy orgullosos de este triunfo, también es de ustedes.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Alan Ruiz Hernández por su guía, por su paciencia y por compartir conmigo sus conocimientos, gracias por sus correcciones minuciosas, por confiar en mí y estar presente en cada etapa de este proyecto.

Gracias a la Dra. Maribel Roblez Sánchez, por permitirme trabajar en el laboratorio, por su disposición, orientación y apoyo.

Gracias a mis compañeras de laboratorio por su ayuda, por compartir largas horas de jornada y su convivencia.

Gracias a mi padre por ser el promotor de mis sueños, por guiarme y forjarme desde que era pequeña para que cumpliera mis metas, gracias por confiar y creer en mí cada día, gracias por cada consejo que me ayudo a ser mejor, por la sabiduría y disciplina con la que me educo, gracias por siempre recibirme con un abrazo lleno de amor.

Gracias a mis tíos Víctor y Maricela quienes siempre estuvieron para mí con amor, quienes me cuidaron y recibieron con los brazos abiertos.

Gracias a mi hermana Nahomi, por tu amor incondicional, por la paciencia, por inspirarme y por extenderme la mano siempre que la necesité, gracias por ser mi compañera y acompañarme en este camino.

Gracias a mi novio Homar, por su paciencia infinita, por su amor incondicional y por estar a mi lado en cada etapa de este camino, gracias por ayudarme siempre que lo necesite y por darme ánimos.

Gracias a mis amigas Sandra y Paula, por ser un rayito de sol en mi vida, por animarme, por acompañarme, por las risas y por una amistad tan bonita, gracias por ser parte de mi vida.

Gracias a todos por el amor recibido, la dedicación y paciencia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
1. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Justificación	3
2. Antecedentes.....	5
2.1 Estado de ánimo y procesos fisiológicos asociados	5
2.2 Estrés oxidativo, especies reactivas y óxido nítrico como sistema de estudio.....	6
2.3 Dieta, comportamiento alimentario y estado de ánimo	7
2.4 Alimentos funcionales y compuestos bioactivos	8
2.5 Trigo sarraceno como fuente de compuestos antioxidantes.....	10
2.6 Germinación como estrategia tecnológica.....	13
2.6.1 Sistemas de germinación controlada	15
2.6.2 Trigo sarraceno germinado como ingrediente funcional.....	17
3. Metodología experimental	19
3.1 Obtención y acondicionamiento del material vegetal.....	19
3.2 Condiciones de germinación y control del proceso.....	20
3.3 Obtención de extractos fenólicos.....	20
3.4 Determinación de compuestos fenólicos totales	21
3.5 Determinación de flavonoides totales	21
3.6 Evaluación de la capacidad antioxidante.....	22
3.6.1 DPPH.....	22
3.6.2 TEAC	22
3.7 Evaluación de la modulación de óxido nítrico (ON)	23
3.8 Desarrollo del alimento (<i>hot cake</i>)	23
3.9 Diseño experimental.....	24
4. Resultados y discusión	25

4.1 Análisis de harinas.....	27
4.1.1 Contenido de compuestos fenólicos totales en harinas	27
4.1.2 Contenido de flavonoides totales en harinas	29
4.1.3 Capacidad antioxidante en harinas	31
4.1.4 Capacidad de las harinas para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess.....	36
4.2 Análisis del alimento tipo hot cake	39
4.2.1 Contenido de compuestos fenólicos totales en el alimento tipo hot cake	40
4.2.2 Contenido de flavonoides totales en alimento tipo <i>hot cake</i>	43
4.2.3 Capacidad antioxidante en el alimento tipo <i>hot cake</i>	47
4.2.4 Capacidad del alimento tipo hot cake para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess	54
5. Conclusión y recomendaciones.....	60
Bibliografía.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Obtención del grano de trigo sarraceno germinado	26
Figura 2. Trigo sarraceno germinado por 24 horas (Živković et al. 2021)	27
Figura 3. Contenido de fenoles totales en muestras de harinas	28
Figura 4. Contenido de flavonoides en harinas	30
Figura 5. Capacidad antioxidante por DPPH en harina	32
Figura 6. Capacidad antioxidante por ABTS en harina	34
Figura 7 . Inhibición de óxido nítrico (%) de las diferentes harinas	36
Figura 8. Alimento tipo hot cake elaborado a partir de harina de trigo sarraceno germinado	39
Figura 9. Contenido de fenoles totales en muestras del alimento a base de las diferentes harinas	41
Figura 10. Contenido de flavonoides en alimento a base de las diferentes harinas	44
Figura 11. Capacidad antioxidante por DPPH del alimento	48
Figura 12. Capacidad antioxidante por ABTS del alimento	51
Figura 13. Inhibición de óxido nítrico (%) del alimento	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Ingredientes para el desarrollo de panqueques.....	24
---	----

RESUMEN

Las alteraciones del estado de ánimo tienen un origen multifactorial en el que participan componentes psicológicos, sociales y biológicos. Entre estos últimos se encuentran el desequilibrio redox y las modificaciones en la señalización mediada por óxido nítrico (ON). La posible influencia de la alimentación sobre estos procesos ha impulsado el estudio de matrices ricas en compuestos fenólicos y flavonoides. El trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) contiene diversos compuestos bioactivos cuya concentración y reactividad pueden modificarse mediante la germinación; sin embargo, estos cambios dependen de las condiciones del proceso y pueden transformarse después de la elaboración del alimento.

En este trabajo se desarrolló un alimento tipo hot cake con harina de trigo sarraceno germinado y se evaluaron *in vitro* su capacidad antioxidante y su respuesta frente al ON. El grano se germinó durante 24 h bajo condiciones controladas, se secó y se transformó en harina. Las harinas germinadas y sin germinar, junto con sus respectivos alimentos, se analizaron mediante la cuantificación de fenoles y flavonoides totales, los ensayos DPPH y ABTS y el sistema nitroprusiato–Griess. Una formulación con harina de trigo convencional se utilizó como referencia comercial.

La germinación modificó las propiedades bioactivas de la harina, pero no produjo un incremento uniforme. Respecto a la harina sin germinar, la harina germinada presentó reducciones de 43,58 % en fenoles, 38,79 % en flavonoides y 25,43 % en la respuesta frente a DPPH. También mostró menor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito, con 60,38 % frente a 74,68 %. En contraste, alcanzó la mayor capacidad antioxidante mediante ABTS. Después de la elaboración del hot cake, la formulación germinada presentó menores valores de fenoles, DPPH y ABTS, mientras que las diferencias en flavonoides y disminución de nitrito dejaron de ser significativas. Los alimentos de trigo sarraceno conservaron

mayores contenidos de fenoles y flavonoides y mayor capacidad antioxidante que la referencia convencional.

Estos resultados muestran que la respuesta bioactiva depende de la germinación, el método analítico y las transformaciones de la matriz durante el procesamiento. Los ensayos empleados describen respuestas químicas generales y no descartan el aumento de compuestos individuales con actividad biológica relevante. El estudio constituye una aproximación inicial a procesos redox potencialmente relacionados con el estado de ánimo, pero no demuestra efectos fisiológicos. La identificación cromatográfica de los compuestos, seguida de estudios de bioaccesibilidad y actividad biológica, permitirá precisar la funcionalidad del producto.

1. Introducción

En los últimos años, las alteraciones asociadas al estado de ánimo han sido reconocidas como un problema relevante de salud a escala mundial, debido a su impacto en la calidad de vida y a su relación con diversos procesos fisiológicos (World Health Organization, 2025). Además de los factores psicológicos y sociales, se ha documentado que diversas condiciones relacionadas con el estado de ánimo están asociadas con procesos biológicos como el estrés oxidativo, la inflamación crónica de bajo grado y las alteraciones en los sistemas de señalización celular. Estos pueden afectar la función neuronal y la homeostasis del organismo (Godos *et al.*, 2018; Wierońska *et al.*, 2021). Entre las moléculas involucradas en estos procesos se encuentra el óxido nítrico (ON) el cual ha sido identificado como una molécula clave en la regulación de múltiples procesos fisiológicos, incluyendo la neurotransmisión, la respuesta inmune y la regulación del flujo sanguíneo (Förstermann & Sessa, 2012).

El NO se sintetiza a partir de L-arginina mediante las enzimas óxido nítrico sintasas (NOS), cuyas isoformas desempeñan funciones diferentes según el entorno fisiológico (Knowles & Moncada, 1994; Förstermann & Sessa, 2012). En condiciones normales, participa en la señalización celular; sin embargo, su desregulación puede favorecer la formación de especies reactivas de nitrógeno, contribuyendo al estrés nitrosativo y al daño celular (Radi, 2013).

Debido a estas condiciones ha aumentado el interés por estrategias no farmacológicas dirigidas a modular estos procesos fisiológicos, particularmente mediante la alimentación, ya que debido han demostrado esta puede influir en el balance redox y en procesos inflamatorios (Aleksandrova *et al.*, 2021).

Entre los alimentos, aquellos ricos en metabolitos secundarios presentan gran interés (Jacka *et al.*, 2015; Godos *et al.*, 2018). Particularmente los compuestos fenólicos y flavonoides han sido ampliamente estudiados por su capacidad para interactuar con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, así como por su

potencial para modular mecanismos celulares relacionados con la respuesta antioxidante (Pannu *et al.*, 2021), donde algunos estudios han encontrado asociaciones entre los patrones dietarios ricos en compuestos bioactivos, determinadas respuestas emocionales y el bienestar percibido, particularmente en poblaciones jóvenes (Godos *et al.*, 2018; O'Neil *et al.*, 2014). No obstante, gran parte de la evidencia procede de estudios observacionales, por ello no permite establecer relaciones causales directas. Por lo tanto, el análisis de compuestos bioactivos en matrices alimentarias y su interacción con sistemas redox constituye una alternativa experimental para estudiar su posible funcionalidad en condiciones controladas.

Entre las matrices alimentarias, el trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) es un pseudocereal perteneciente a la familia *Polygonaceae*, este posee proteínas de alto valor biológico, fibra dietética, almidón resistente, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, lo cual ha llamado la atención (Hu *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2024; Zamaratskaia *et al.*, 2024), el cual ha sido utilizado en el desarrollo de panes, galletas, pastas, fideos, cereales para el desayuno y bebidas (Giménez-Bastida y Zieliński, 2015), principalmente debido a su potenciales efectos antiinflamatorios, antihipertensivos, hipoglucemiantes, cardioprotectores y neuroprotectores (Giménez-Bastida y Zieliński, 2015; Litoiu *et al.*, 2025).

Sin embargo, aunque el trigo ha demostrado potenciales efectos benéficos a la salud, sus características bioactivas podrían potenciarse mediante procesos como la germinación, en los cuales se activan rutas metabólicas que pueden favorecer la síntesis o liberación de compuestos fenólicos y flavonoides (Ribeiro-Oliveira *et al.*, 2021; Günal-Köroğlu *et al.*, 2025).

Por lo tanto, considerando el creciente interés por el desarrollo de alimentos con propiedades bioactivas y su posible participación en procesos asociados con el estado de ánimo, se propone el desarrollo de un alimento tipo hot cake elaborado a base de trigo sarraceno germinado (*Fagopyrum esculentum*), con potencial actividad antioxidante y moduladora del óxido nítrico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Desarrollar un alimento tipo hot cake con harina de trigo sarraceno germinado (*Fagopyrum esculentum*) y evaluar el efecto de la germinación y del procesamiento sobre el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, la capacidad antioxidante y la respuesta frente al óxido nítrico *in vitro*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar los cambios inducidos por la germinación en el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides y en la capacidad antioxidante, respecto a la harina de trigo sarraceno sin germinar.
- Formular un alimento tipo hot cake con harina de trigo sarraceno germinado y evaluar sus propiedades bioactivas.
- Determinar la capacidad de los extractos de las harinas y los alimentos para disminuir la acumulación de nitrito mediante el sistema *in vitro* nitroprusiato–Griess.

1.2 Justificación

En los últimos años, la relación entre alimentación, estado de ánimo y bienestar percibido ha adquirido relevancia en la búsqueda de estrategias no farmacológicas orientadas al cuidado de la salud. Esta relación está influida por factores conductuales, ambientales y fisiológicos, entre los que destacan el estrés oxidativo y la inflamación crónica de bajo grado, procesos que también se han asociado con trastornos del estado de ánimo, particularmente con la depresión (Godos *et al.*, 2018; Wierońska *et al.*, 2021). Ante esta relación, los alimentos ricos en compuestos bioactivos, particularmente aquellos con propiedades antioxidantes, resultan de interés para estudiar su interacción con los sistemas redox. (Godos *et al.*, 2018).

En particular, los compuestos bioactivos de origen vegetal, especialmente los fenólicos y los flavonoides, han sido ampliamente estudiados por su capacidad

para interactuar con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, así como por su posible participación en la regulación de procesos vinculados con el balance redox (Pannu *et al.*, 2021; Scuto *et al.*, 2024). Sin embargo, su aprovechamiento en sistemas alimentarios depende no solo de su presencia en los alimentos, sino también de su estabilidad, disponibilidad y posibilidad de incorporarlos en matrices aptas para el consumo habitual. (Hithamani & Srinivasan, 2014).

El trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) es una fuente importante de estos compuestos, aunque las condiciones de procesamiento pueden modificar su concentración y disponibilidad (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010). En este sentido, la germinación constituye una estrategia tecnológica capaz de inducir cambios en la composición del grano y favorecer la acumulación o liberación de determinados compuestos antioxidantes. No obstante, cuando variables como la temperatura, la humedad y el tiempo no se controlan adecuadamente, los resultados pueden variar, lo que limita su reproducibilidad y dificulta su aplicación en el desarrollo de productos alimentarios (Chen *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2024).

El empleo de un sistema de germinación controlada permite definir y mantener las condiciones de operación, favoreciendo la obtención de ingredientes con características más consistentes (Cochrane, 2017). Este enfoque contribuye no solo a mejorar la reproducibilidad del proceso, sino que también permite analizar la relación entre las condiciones de germinación y las propiedades funcionales del ingrediente obtenido (Martins *et al.*, 2014; Cochrane, 2017).

Además, para evaluar el potencial bioactivo de los alimentos elaborados, se requieren métodos experimentales que permitan determinar su capacidad para disminuir o modular la generación de óxido nítrico. En este sentido, los sistemas de generación de óxido nítrico, evaluados mediante métodos indirectos, pueden emplearse para estimar la actividad de los compuestos bioactivos frente a este proceso (Archer, 1993; Jankovic *et al.*, 2024).

Este trabajo responde, por tanto, a la necesidad de integrar el control del proceso de germinación con la caracterización de las propiedades bioactivas de un

alimento con valor agregado. El establecimiento de condiciones controladas para la germinación del trigo sarraceno, junto con el desarrollo y la evaluación de un producto alimentario derivado, permite vincular los aspectos tecnológicos del proceso con la actividad antioxidante y la capacidad de modular la generación de óxido nítrico. De esta manera, el estudio contribuye tanto al campo de la ingeniería de alimentos como al conocimiento sobre el comportamiento de compuestos bioactivos en matrices alimentarias, aportando bases para el desarrollo de alimentos con potencial participación en procesos asociados con el estado de ánimo.

2. Antecedentes

2.1 Estado de ánimo y procesos fisiológicos asociados

Los trastornos del estado de ánimo afectan la esfera emocional y la calidad de vida de las personas. Su desarrollo se ha relacionado con distintos procesos fisiológicos en los que participan varios sistemas del organismo (Baranyi *et al.*, 2015). Actualmente se reconoce que estas alteraciones no dependen únicamente de factores psicológicos, sino también de cambios bioquímicos y celulares, entre ellos alteraciones en el balance redox y en la respuesta inflamatoria (Godos *et al.*, 2018; Wierońska *et al.*, 2021).

El estrés oxidativo y la inflamación de bajo grado se han relacionado con cambios en la función neuronal, la señalización celular y la homeostasis. Estos procesos pueden afectar la regulación de neurotransmisores, la plasticidad sináptica y otros mecanismos relacionados con la respuesta fisiológica (Wierońska *et al.*, 2021).

En estos procesos también intervienen factores ambientales y conductuales. Entre ellos, la alimentación resulta relevante por su posible relación con el balance redox y la respuesta inflamatoria. Esto ha llevado a estudiar con mayor detalle los compuestos bioactivos presentes en los alimentos y la forma en que pueden participar en estos procesos (Godos *et al.*, 2018).

Por esta razón, el estudio de sistemas relacionados con el estrés oxidativo y con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno puede ayudar a conocer el comportamiento de los compuestos bioactivos presentes en los alimentos. Sin embargo, estos ensayos representan únicamente una aproximación experimental y no permiten establecer por sí solos efectos fisiológicos o clínicos.

2.2 Estrés oxidativo, especies reactivas y óxido nítrico como sistema de estudio.

El mantenimiento de la homeostasis celular depende del equilibrio entre la generación de especies reactivas y la capacidad antioxidante del sistema biológico (Radi, 2013). Las especies reactivas de oxígeno (ERO) y de nitrógeno (ERN) participan en procesos esenciales como la señalización celular, la respuesta inmunitaria y la regulación metabólica, no obstante, cuando su producción supera la capacidad del sistema para neutralizarlas se genera un estado de estrés oxidativo y nitrosativo que puede ocasionar daños en biomoléculas como lípidos, proteínas y ácidos nucleicos (Radi, 2013).

Entre las especies reactivas de nitrógeno, el óxido nítrico (ON) desempeña funciones diferentes de acuerdo con su concentración y el entorno biológico. Este radical libre se sintetiza a partir de L-arginina por acción de las enzimas óxido nítrico sintasas (ONS). Las isoformas endotelial, neuronal e inducible cumplen funciones específicas según el tejido y las condiciones fisiológicas (Förstermann & Sessa, 2012). En condiciones reguladas, el ON participa en procesos como la vasodilatación, la neurotransmisión y la respuesta inmunitaria, sin embargo, su producción excesiva o descontrolada puede favorecer la formación de compuestos altamente reactivos, como el peroxinitrito, lo que puede contribuir al daño celular (Radi, 2013).

Desde el punto de vista analítico, el uso de donadores de ON, como el nitroprusiato de sodio, permite generar especies reactivas de nitrógeno bajo condiciones controladas. En estos sistemas puede evaluarse la capacidad de una

muestra o de sus compuestos bioactivos para interactuar con dichas especies (Archer, 1993).

En modelos *in vitro*, la generación controlada de óxido nítrico a partir de donadores como el nitroprusiato de sodio permite evaluar la interacción de compuestos bioactivos con especies reactivas de nitrógeno (Srihaphon *et al.*, 2020). Este tipo de aproximación experimental resulta útil para explorar la actividad funcional de compuestos presentes en matrices alimentarias bajo condiciones controladas (Archer, 1993).

La concentración de nitritos determinada mediante este modelo puede emplearse como un indicador indirecto de la interacción entre los compuestos bioactivos y las especies reactivas generadas en el sistema. Por tanto, el ensayo permite realizar una evaluación preliminar de la actividad funcional de una matriz alimentaria, pero sus resultados no demuestran por sí mismos efectos fisiológicos en organismos vivos.

2.3 Dieta, comportamiento alimentario y estado de ánimo

En los últimos años, distintos estudios han aportado evidencia de que la dieta puede influir en procesos asociados al estrés oxidativo y la inflamación (Godos *et al.*, 2018). Diversos estudios han reportado que ciertos patrones dietéticos se han relacionado con la función neuronal, la regulación de neurotransmisores y la respuesta inflamatoria (Jacka *et al.*, 2015; Godos *et al.*, 2018).

Además, se ha descrito una relación bidireccional entre la alimentación y el estado de ánimo. Por un lado, el estado emocional puede influir en las preferencias alimentarias y por otra parte la calidad de la dieta se ha asociado con variaciones en el riesgo de desarrollar síntomas depresivos. (Gao, 2025). Se han encontrado que un mayor consumo de frutas y vegetales se relaciona con un menor riesgo de depresión, mientras que el consumo frecuente de alimentos altamente procesados se asocia con un riesgo mayor (Sedgi *et al.*, 2025).

Estas asociaciones no implican necesariamente una relación causal, debido a la intervención de otros factores biológicos, sociales y conductuales, sin embargo,

la relación entre el estado emocional y la elección de los alimentos puede involucrar la experiencia sensorial, los factores cognitivos y las necesidades emocionales. La percepción y aceptación de los alimentos no dependen únicamente de sus características nutricionales, sino también de aspectos psicológicos y contextuales que intervienen en la elección alimentaria (Booth & Shepherd, 1988; Zhong *et al.*, 2026).

Desde una perspectiva aplicada, la incorporación de ingredientes alternativos o funcionales puede influir en las emociones que el consumidor relaciona con un alimento (Godos *et al.*, 2018). Por ejemplo, productos elaborados con ingredientes sostenibles pueden provocar respuestas emocionales diferentes, especialmente cuando se proporciona información adicional sobre sus beneficios. Estos resultados muestran la conveniencia de considerar la respuesta emocional del consumidor durante el desarrollo de nuevos productos (Yang *et al.*, 2020).

La relación entre dieta y estado de ánimo comprende, por tanto, más elementos que la composición nutricional de los alimentos. La experiencia sensorial, las expectativas, la información disponible y las emociones asociadas con el consumo también pueden influir en la respuesta del consumidor. Considerar estos factores resulta pertinente durante el desarrollo de alimentos funcionales orientados al bienestar, siempre que sus posibles beneficios se formulen de acuerdo con la evidencia disponible.

2.4 Alimentos funcionales y compuestos bioactivos

El interés por la relación entre alimentación y salud ha favorecido el desarrollo del concepto de alimento funcional, utilizado para describir alimentos que, además de aportar nutrientes esenciales, contienen componentes bioactivos capaces de producir efectos fisiológicos más allá de la nutrición básica (Temple, 2022). Este concepto surgió en Japón durante la década de 1980 y con el tiempo se amplió para incluir alimentos que pueden contribuir al mantenimiento de determinadas funciones del organismo o a la reducción de algunos factores de

riesgo asociados con enfermedades (Kaur & Das, 2011). Para que estos efectos sean relevantes, los componentes bioactivos deben encontrarse en concentraciones seguras y suficientes para producir respuestas medibles (Temple, 2022).

Los alimentos funcionales pueden ser naturales, procesados o enriquecidos con compuestos fenólicos, fibra dietaria, probióticos y otros componentes con actividad biológica (Temple, 2022), y su consumo se ha relacionado con cambios en procesos como la respuesta inmunitaria, la función gastrointestinal y la regulación metabólica (Damián et al., 2022). El interés actual por estos productos también se relaciona con la búsqueda de estrategias nutricionales que complementen la dieta y contribuyan al mantenimiento de la salud y a la reducción de factores de riesgo asociados con enfermedades crónicas (Vignesh et al., 2024).

Dentro de los compuestos bioactivos de origen vegetal, los compuestos fenólicos y los flavonoides han recibido especial atención debido a su presencia en cereales, frutas, semillas y otros alimentos (Pannu et al., 2021). Estos forman parte de un grupo amplio de metabolitos secundarios y, en el caso de los flavonoides, su diversidad estructural explica en parte las diferencias observadas en su actividad (Pannu et al., 2021). Su capacidad antioxidante se relaciona con mecanismos como la donación de electrones o átomos de hidrógeno y la estabilización de radicales libres, procesos que dependen del número y la disposición de los grupos hidroxilo, de la estructura de la molécula y de las condiciones del medio en el que se evalúan (Scuto et al., 2024).

Algunos flavonoides también pueden participar en la regulación de rutas celulares relacionadas con la respuesta antioxidante, como la vía Nrf2, asociada con la expresión de enzimas involucradas en la defensa frente al estrés oxidativo (Scuto et al., 2024). Además, los compuestos fenólicos pueden interactuar con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno y modificar la disponibilidad o reactividad de moléculas como el óxido nítrico, aunque este comportamiento depende de la naturaleza del compuesto, su concentración y las condiciones experimentales

(Rudrapal et al., 2024). En modelos celulares y experimentales también se ha observado que algunos compuestos bioactivos pueden participar en rutas relacionadas con proliferación celular, apoptosis y respuesta inflamatoria, pero sus efectos dependen de factores como su estructura química, concentración, biodisponibilidad y el sistema utilizado para evaluarlos (Vignesh et al., 2024). En el sistema nervioso, algunos de estos compuestos se han estudiado por su posible participación en procesos relacionados con neuroinflamación, neurotransmisión y plasticidad sináptica (Elbandy, 2023), mientras que extractos ricos en fitoquímicos han mostrado actividad antioxidante, antiinflamatoria y potencialmente neuroprotectora en distintos modelos experimentales (Maqbool et al., 2022). Sin embargo, la funcionalidad de estos compuestos dentro de un alimento no depende únicamente de su concentración inicial, ya que la matriz alimentaria, el procesamiento y el almacenamiento pueden modificar su estabilidad, estructura, liberación y bioaccesibilidad (Pannu et al., 2021).

Por esta razón, el desarrollo de un alimento funcional requiere considerar no solo la presencia de compuestos bioactivos, sino también su estabilidad, bioaccesibilidad y biodisponibilidad dentro de la matriz (Damián et al., 2022). La cantidad consumida, la frecuencia de consumo y las características del individuo también pueden modificar los efectos observados (Damián et al., 2022). Incluso la percepción de bienestar asociada con este tipo de productos puede influir en la forma en que el consumidor los valora y los relaciona con la salud (Gao, 2025). En conjunto, el estudio de alimentos con compuestos fenólicos y flavonoides requiere relacionar su contenido con su comportamiento en modelos experimentales adecuados y con las características propias de la matriz alimentaria, evitando asumir que una mayor concentración de compuestos bioactivos se traduce necesariamente en un efecto fisiológico.

2.5 Trigo sarraceno como fuente de compuestos antioxidantes

Entre las fuentes dietarias de compuestos fenólicos, el trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) ha despertado interés por su contenido de compuestos

bioactivos y por su posible uso en el desarrollo de alimentos funcionales. Aunque se utiliza de manera similar a los cereales convencionales, se trata de un pseudocereal perteneciente a la familia *Polygonaceae* y no a la familia *Poaceae*. Su origen se sitúa en Asia, particularmente en China, donde su cultivo se remonta aproximadamente a 7 000–8 000 años. En la actualidad, su producción se concentra principalmente en países asiáticos y en regiones de Europa central y oriental (Yao et al., 2023; He et al., 2024).

El interés en este pseudocereal también se relaciona con su composición fitoquímica. Entre sus principales compuestos destacan los flavonoides, especialmente rutina y quercetina, además de distintos ácidos fenólicos. Estos componentes se han asociado con actividad antioxidante en modelos experimentales y con la capacidad de interactuar con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (Hu et al., 2024; Kang et al., 2024).

A diferencia de los cereales convencionales, el trigo sarraceno presenta una composición nutricional que favorece su aprovechamiento como ingrediente alimentario. Se ha reportado que sus semillas contienen entre 8.5 y 19 % de proteínas, con un perfil de aminoácidos equilibrado y un contenido de lisina, superior al de algunos cereales convencionales. También constituye una fuente importante de carbohidratos complejos, fibra dietaria y almidón resistente, además de contener lípidos con un perfil de ácidos grasos semejante al de otros granos (Dziadek et al., 2016).

Además de sus macronutrientes, el trigo sarraceno contiene una amplia variedad de compuestos bioactivos, incluyendo flavonoides, compuestos fenólicos, vitaminas del complejo B, minerales como magnesio, hierro, zinc y calcio, así como otros metabolitos secundarios de interés (Litoiu et al., 2025). Su composición ha motivado estudios sobre posibles actividades antioxidantes, antiinflamatorias, cardioprotectores y antihipertensivas. No obstante, la magnitud de estos efectos depende del compuesto, la concentración, la biodisponibilidad y el modelo experimental utilizado (Huda et al., 2021).

Dentro de los compuestos fenólicos presentes en el trigo sarraceno, los flavonoides constituyen uno de los grupos de compuestos fenólicos de mayor interés funcional en el trigo sarraceno. La rutina puede representar una proporción significativa del contenido fenólico total, acompañada de otros compuestos como kaempferol, quercitrina, orientina y vitexina. Las concentraciones reportadas varían según la especie, el genotipo, las condiciones de cultivo y el estado de desarrollo de la planta (Zhang *et al.*, 2012; Podolska *et al.*, 2021).

Sin embargo, es importante destacar que la distribución de estos compuestos dentro de la semilla no es homogénea, las cáscaras pueden contener concentraciones mayores de fibra dietaria y determinados compuestos fenólicos que el grano descascarado, así como mostrar una actividad antioxidante superior en algunos ensayos. Esto indica que las operaciones de descascarado, molienda y separación de fracciones pueden modificar el perfil químico y funcional de los ingredientes obtenidos (Dziadek *et al.*, 2016).

Sumado a lo anterior, la variabilidad en la composición del trigo sarraceno está influenciada por factores genéticos y ambientales, incluyendo la especie (*F. esculentum* vs. *F. tataricum*) y las prácticas agronómicas. En particular, se han encontrado concentraciones mayores de rutina y otros compuestos fenólicos en el trigo sarraceno tartárico (*F. tataricum*) que en el trigo sarraceno común (*F. esculentum*). Estas diferencias muestran la importancia de identificar la especie y seleccionar el material vegetal de acuerdo con el propósito del estudio (Podolska *et al.*, 2021).

En términos de aplicación, el trigo sarraceno ha sido utilizado en la formulación de diversos productos alimenticios, incluyendo harinas, bebidas, pastas, productos de panificación y alimentos sin gluten. Debido a que no contiene gluten de manera natural, puede utilizarse en productos destinados a personas con enfermedad celíaca, siempre que las materias primas y el procesamiento eviten la contaminación cruzada y el producto cumpla los criterios aplicables para

declararse libre de gluten. También representa una alternativa para diversificar los ingredientes empleados en la alimentación (Huda *et al.*, 2021).

Las características nutricionales del trigo sarraceno y su contenido de compuestos fenólicos respaldan su estudio como materia prima para elaborar alimentos con valor agregado (Chunmei & Shuai, 2025). Su composición puede modificarse mediante tratamientos como la germinación; sin embargo, los cambios producidos dependen de las especies, el tiempo y las condiciones del proceso. Por ello, la germinación controlada constituye una alternativa para estudiar las condiciones favorables y aumentar la concentración o disponibilidad de determinados compuestos bioactivos.

Algunos estudios también han examinado la actividad biológica de flavonoides presentes en el trigo sarraceno, como la rutina y la quercetina, en procesos relacionados con el estrés oxidativo, la inflamación y el sistema nervioso. En modelos experimentales, la rutina ha mostrado posibles efectos neuroprotectores relacionados con la disminución del estrés oxidativo, la neuroinflamación y la regulación de vías de señalización celular (Chunmei & Shuai, 2025). Por su parte, la quercetina ha mostrado efectos sobre sistemas de neurotransmisión y sobre el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal, además de modificar marcadores de estrés oxidativo e inflamación en determinados modelos (Teng & Song, 2025). Estos hallazgos justifican el estudio de tales compuestos, pero no demuestran que el trigo sarraceno produzca directamente efectos sobre el estado de ánimo o el bienestar humano.

2.6 Germinación como estrategia tecnológica

La germinación es un proceso biológico que puede emplearse como tratamiento tecnológico para modificar la composición nutricional y funcional de granos y pseudocereales. Inicia con la imbibición de agua, seguida de la reactivación metabólica de la semilla, la activación enzimática y la movilización de las reservas necesarias para el crecimiento del eje embrionario (Ribeiro-Oliveira *et al.*, 2021; Sarun, 2026).

Durante este proceso ocurren transformaciones bioquímicas que modifican la composición del grano. La activación de enzimas hidrolíticas favorece la degradación de macromoléculas de reserva, mientras que rutas metabólicas como la de los fenilpropanoides intervienen en la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos y flavonoides. Como resultado, pueden presentarse cambios en el contenido de estos compuestos y en la actividad antioxidante del material germinado (Günel-Köroğlu *et al.*, 2025; Salato *et al.*, 2026).

La germinación también puede favorecer la liberación de compuestos fenólicos que se encuentran ligados a componentes de la matriz celular. Sin embargo, estos cambios no ocurren de la misma manera en todas las semillas, ya que algunos metabolitos pueden aumentar, degradarse, transformarse o utilizarse durante el crecimiento (Günel-Köroğlu *et al.*, 2025; Salato *et al.*, 2026). Parte de estas modificaciones se relaciona con la activación de enzimas como la fenilalanina amonio liasa (FAL), involucrada en la vía de los fenilpropanoides y en la formación de distintos compuestos fenólicos. También se ha observado que durante la germinación pueden aparecer metabolitos que no se detectaban en el grano sin germinar o que inicialmente se encontraban por debajo del límite de detección (Chen *et al.*, 2022).

La respuesta a la germinación varía según la especie y el tratamiento aplicado. En quinoa se han reportado aumentos en el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante después de periodos controlados de germinación (Ramos-Pacheco *et al.*, 2024). De manera similar, en mijo se han observado incrementos en el contenido fenólico total, cambios en el perfil de metabolitos y una mayor capacidad antioxidante bajo determinadas condiciones experimentales (Xiang *et al.*, 2023). Estos resultados muestran que la germinación puede modificar de manera importante la composición de las semillas, aunque la magnitud de la respuesta depende del material vegetal.

Además de los cambios en el perfil de compuestos bioactivos, la germinación implica una reorganización del metabolismo de la semilla que incluye la absorción de agua, el transporte de solutos y la movilización de las reservas almacenadas.

Estos procesos forman parte del crecimiento y desarrollo de la semilla y contribuyen a los cambios en su composición durante la germinación (Ribeiro-Oliveira *et al.*, 2021; Sarun, 2026).

Otro efecto de interés es la reducción de algunos compuestos antinutricionales, como el ácido fítico y ciertos inhibidores enzimáticos. La magnitud de esta reducción depende de la especie y del tratamiento aplicado y puede favorecer la disponibilidad de algunos nutrientes (Zugravu *et al.*, 2026). Junto con las modificaciones observadas en el perfil fenólico y la actividad antioxidante, estos cambios respaldan el uso de la germinación como una estrategia para modificar las características nutricionales y bioactivas de granos y pseudocereales (Xiang *et al.*, 2023; Günal-Köroğlu *et al.*, 2025).

Por lo tanto, la germinación no debe considerarse únicamente como el inicio del desarrollo de la semilla, sino también como un proceso que puede aprovecharse para modificar su composición. La magnitud de estas transformaciones depende de las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso, por lo que su control resulta importante cuando se busca obtener materiales con características definidas y reproducibles.

2.6.1 Sistemas de germinación controlada

La germinación depende en gran medida de las condiciones ambientales en las que ocurre. Variables como la temperatura, la disponibilidad de agua, el oxígeno y la iluminación pueden modificar la velocidad de germinación, el vigor de las plántulas y la uniformidad de la respuesta entre semillas (Martins *et al.*, 2014; Cochrane, 2017). Por esta razón, el uso de sistemas de germinación controlada resulta útil cuando se busca reducir la variabilidad del proceso y trabajar bajo condiciones definidas.

Estos sistemas han evolucionado desde dispositivos simples hasta cámaras capaces de mantener distintas variables dentro de intervalos programados. Su diseño permite regular condiciones como temperatura, humedad y fotoperiodo de acuerdo con la especie y con el objetivo del proceso. Organismos como la Food

and Agriculture Organization y la International Seed Testing Association han establecido criterios para la evaluación de semillas en los que el control de estas condiciones resulta fundamental para obtener resultados comparables y reproducibles (Hernández-López *et al.*, 2019; ISTA, 2017).

La incorporación de sistemas automatizados también permite registrar las variables durante la germinación y conservar la información generada para su análisis posterior. El seguimiento continuo facilita la identificación de cambios o desviaciones respecto a las condiciones programadas y permite conocer con mayor precisión el comportamiento del sistema a lo largo del proceso (Hernández-López *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista económico, la construcción de sistemas de germinación con componentes de bajo costo puede representar una alternativa frente a algunos equipos comerciales, especialmente en instituciones académicas o proyectos con recursos limitados. El uso de plataformas abiertas facilita la selección, sustitución y mantenimiento de los componentes; sin embargo, su funcionamiento debe comprobarse mediante parámetros como estabilidad, uniformidad espacial, consumo energético y repetibilidad antes de establecer comparaciones con equipos comerciales (Bento & Moraes, 2018; Hernández-López *et al.*, 2019).

Algunos sistemas automatizados han logrado mantener la temperatura dentro de intervalos aproximados de ± 1 a 2 °C respecto al valor programado. Este desempeño debe valorarse de acuerdo con la tolerancia establecida en el protocolo y con la uniformidad térmica dentro de la cámara (Brasil, 2009). Estos sistemas también permiten programar ciclos de luz y oscuridad, aspecto importante en especies cuya germinación responde a la iluminación o al fotoperiodo (Sanoubar *et al.*, 2018).

En conjunto, los sistemas de germinación controlada permiten mantener y registrar las principales variables del proceso, reducir la variabilidad entre tratamientos y trabajar bajo condiciones más reproducibles. Esto facilita el

estudio de la relación entre las condiciones de germinación y los cambios que ocurren en la semilla, y permite obtener materiales con características más consistentes para su posterior evaluación e incorporación en alimentos.

2.6.2 Trigo sarraceno germinado como ingrediente funcional

El trigo sarraceno germinado ha despertado interés como ingrediente alimentario debido a los cambios que la germinación puede producir en su composición, especialmente en el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides. Entre los compuestos reportados con mayor frecuencia se encuentran rutina, quercetina, orientina y vitexina, varios de ellos asociados con actividad antioxidante y, en determinados modelos, con posibles efectos antiinflamatorios (Hu *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2024). La germinación también puede modificar sus formas químicas y favorecer la liberación o extractabilidad de algunas fracciones; sin embargo, la magnitud de estos cambios depende de las condiciones empleadas durante el proceso (Salato *et al.*, 2026; Günal-Köroğlu *et al.*, 2025).

El interés en utilizar este material como ingrediente no depende únicamente de su composición inicial, sino de lo que ocurre cuando se incorpora a una matriz alimentaria. El procesamiento, la interacción con otros ingredientes y las condiciones de almacenamiento pueden modificar la estabilidad y disponibilidad de los compuestos bioactivos (Pannu *et al.*, 2021). Por ello, el desarrollo de alimentos elaborados con trigo sarraceno germinado permite evaluar si las características adquiridas durante la germinación se mantienen en el producto final y cómo responden dentro de una matriz real de consumo (Godos *et al.*, 2018).

En este sentido, la incorporación de harina de trigo sarraceno germinado ya ha sido estudiada en distintos productos. En muffins se han observado cambios en la composición del alimento y un índice glucémico estimado menor respecto a algunas formulaciones de referencia (Bhinder *et al.*, 2022). En productos tipo arroz reconstituido elaborados con trigo sarraceno germinado, arroz negro y boniato morado se han reportado aumentos en la capacidad antioxidante e

inhibición in vitro de enzimas digestivas como la α -amilasa (Kang *et al.*, 2024). Estos resultados muestran que la incorporación del ingrediente germinado puede modificar distintas propiedades del producto, aunque la magnitud del efecto depende de la matriz y de la formulación utilizada. Esta misma variabilidad se ha observado en productos sin gluten, donde la sustitución parcial de harinas convencionales por trigo sarraceno germinado puede modificar tanto la composición como la actividad antioxidante del alimento (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010).

En galletas elaboradas con harina de arroz y trigo sarraceno germinado se reportaron incrementos en compuestos como quercetina, orientina y vitexina, junto con cambios en la actividad antioxidante y en el índice glucémico estimado (Molinari *et al.*, 2018). Estos resultados indican que el efecto del ingrediente germinado no depende únicamente de su composición inicial, sino también de la proporción incorporada y de las características de la matriz alimentaria.

Otro aspecto de interés es la capacidad de algunos flavonoides presentes en el trigo sarraceno para interactuar con especies reactivas de oxígeno y nitrógeno. Se ha señalado que determinados compuestos pueden modificar la disponibilidad del óxido nítrico o participar en mecanismos relacionados con la respuesta inflamatoria, dependiendo de su estructura, concentración y del modelo experimental utilizado (Ali *et al.*, 2021; Chiang *et al.*, 2023).

Estos antecedentes justifican la evaluación de alimentos elaborados con trigo sarraceno germinado mediante ensayos de actividad antioxidante y de modulación de la generación de óxido nítrico. Sin embargo, al incorporar estos compuestos en una matriz alimentaria, su comportamiento puede cambiar debido al procesamiento y a la interacción con otros componentes del alimento.

El tratamiento térmico, por ejemplo, puede modificar su estabilidad y estructura, mientras que la propia matriz puede influir en su liberación, bioaccesibilidad y biodisponibilidad (Cheng *et al.*, 2022; Melrose, 2023). Por ello, la evaluación del producto no debe limitarse a cuantificar los compuestos bioactivos presentes, sino también a considerar cómo se comportan después del procesamiento.

Desde una perspectiva aplicada, el desarrollo de alimentos con trigo sarraceno germinado requiere considerar no solo la composición del ingrediente, sino también su comportamiento durante el procesamiento y las características del producto final. El objetivo no consiste únicamente en aumentar el contenido de compuestos bioactivos, sino en obtener un alimento estable, seguro y con características adecuadas para su consumo (Colombage *et al.*, 2024; Thompson *et al.*, 2026). Además de estos aspectos, el desarrollo de nuevos alimentos puede considerar la respuesta y percepción del consumidor, ya que esta información ayuda a conocer cómo se recibe y valora el producto (Booth & Shepherd, 1988; Zhong *et al.*, 2026). Debido a esto, el estudio del trigo sarraceno germinado como ingrediente permite integrar el control del proceso de germinación, su incorporación en una matriz alimentaria y la evaluación de sus compuestos bioactivos y de su actividad antioxidante y moduladora del óxido nítrico.

3. Metodología experimental

3.1 Obtención y acondicionamiento del material vegetal

El trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), sin cáscara, fue adquirido de comercio nacional bajo la marca Superproductos®. Posteriormente, los granos fueron sometidos a un proceso de selección manual para eliminar impurezas, fragmentos dañados o granos con alteraciones visibles, con el fin de asegurar la homogeneidad del material experimental, tal como se ha reportado en estudios de germinación en cereales (Ruiz-Hernández *et al.*, 2021).

Previo al proceso de germinación, los granos se desinfectaron mediante una solución de hipoclorito de sodio comercial (Cloralex®, 5–6% NaClO), diluida en agua estéril hasta una concentración aproximada de 25–30 ppm de cloro libre, durante 5 min, seguida de un enjuague con agua destilada estéril. Este procedimiento permite reducir la carga microbiana superficial sin afectar la viabilidad del grano (Ruiz-Hernández *et al.*, 2021).

3.2 Condiciones de germinación y control del proceso

La germinación se llevó a cabo bajo condiciones controladas de temperatura (25 °C), humedad relativa (90%), fotoperiodo (16 h luz / 8 h oscuridad) y riego de 5 mL por unidad experimental. Los granos (5 gr) fueron colocados en placas Petri con papel filtro estéril y algodón como soporte, utilizando agua previamente esterilizada en autoclave. El proceso se realizó dentro de un invernadero equipado con filtro HEPA 13, con el objetivo de minimizar la contaminación microbiana. Se mantuvieron condiciones de asepsia mediante el uso de etanol al 70% en superficies de trabajo y equipo. Asimismo, se aplicó radiación UV-C durante 10 min (222nm) en el interior del invernadero y de la germinadora previo al inicio de cada ensayo, con el fin de reducir la presencia de microorganismos en las superficies (Ruiz-Hernández *et al.*, 2021). Al finalizar el periodo de germinación (24 h), se observó la emergencia del eje embrionario como indicador del proceso germinativo. Posteriormente, las muestras fueron congeladas a -20 °C con el objetivo de detener la actividad metabólica del grano (Ruiz-Hernández *et al.*, 2023). Las muestras se sometieron a secado en estufa a 45 °C, se molieron y se almacenaron para análisis posteriores (Ruiz-Hernández *et al.*, 2025).

3.3 Obtención de extractos fenólicos

Los compuestos fenólicos se extrajeron mediante el uso de una solución metanólica de metanol/agua (80:20, v/v), empleada comúnmente para la recuperación de compuestos fenólicos en matrices vegetales. Para ello, se pesó 1 g de muestra previamente seca y molida, al cual se le adicionaron 15 mL del solvente de extracción.

La mezcla se sometió a sonicación durante 60 min en condiciones controladas, con el fin de favorecer la liberación de compuestos fenólicos solubles. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 4000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se recuperó y filtró.

El proceso de extracción se repitió dos veces sobre el residuo sólido para maximizar la recuperación de compuestos fenólicos. Los sobrenadantes

obtenidos se combinaron y se concentraron mediante evaporación a presión reducida a 45 °C. Finalmente, los extractos fueron reconstituidos en metanol al 50% para su análisis. Este procedimiento permitió la obtención de la fracción libre de compuestos fenólicos de acuerdo con Salazar López *et al.*, (2016)

3.4 Determinación de compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965), adaptado a formato de microplaca. Para el análisis, se colocaron 30 µL de extracto en pocillos de una placa de 96 pozos, a los cuales se añadió 150 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu previamente diluido (1:10, v/v). Posteriormente, se adiciono 120 µL de solución de carbonato de sodio al 7.5% (p/v). La mezcla se homogeneizó e incubo durante 30 min a temperatura ambiente en condiciones de oscuridad.

Finalizado el tiempo de reacción, la absorbancia se midió a 765 nm utilizando un lector de microplacas. La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración construida con ácido gálico como estándar (10–120 µg/mL). Los resultados (n=3 repeticiones) se expresaron como microgramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca (µg EAG/g).

3.5 Determinación de flavonoides totales

Los flavonoides totales se cuantificaron mediante el método colorimétrico de cloruro de aluminio, de acuerdo con la metodología descrita por Valenzuela-González *et al.* (2023), con modificaciones. Para el análisis, se colocó 30 µL de cada extracto en pocillos de microplaca, a los cuales se añadió 9 µL de NaNO₂ y 120 µL de agua destilada, seguido de una incubación de 5 min.

Posteriormente, se agregaron 9 µL de AlCl₃ y la mezcla se incubó nuevamente durante 5 min. Finalmente, se adicionarón 60 µL de NaOH 1 M y 72 µL de agua destilada. Tras la homogeneización, la absorbancia se midió inmediatamente a 415 nm utilizando un lector de microplacas (FluoStar Omega, BMG Labtech Inc., Ortenberg, Germany).

La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración con quercetina como estándar, y los resultados (n=3 repeticiones) se expresarán como microgramos equivalentes de quercetina por gramo de muestra seca ($\mu\text{g EQ/g}$).

3.6 Evaluación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de los extractos se evaluó mediante los ensayos de 2,2-difenil-1-picrilhidracilo 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) (Salazar-López *et al.*, 2017) y TEAC (Blancas-Benitez *et al.*, 2015), empleando metodologías espectrofotométricas en microplaca para la estimación de la capacidad de captura de radicales libres.

3.6.1 DPPH

Para el ensayo DPPH, se preparó una solución metanólica de DPPH (0.025 mg/mL). En cada pocillo de microplaca, se mezclaron 280 μL de la solución de DPPH con 20 μL del extracto. La mezcla se incubó durante 30 min a temperatura ambiente en oscuridad, y la disminución de la absorbancia se midió a 515 nm utilizando un lector de microplacas. La capacidad antioxidante se determinó mediante una curva de calibración con Trolox como estándar, expresándose los resultados como micromoles equivalentes de Trolox por gramo de muestra seca ($\mu\text{mol ET/g}$).

3.6.2 TEAC

Para el ensayo TEAC, el radical catión ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS^+) se generó mediante la reacción de ABTS (3.86 mg/mL) con persulfato de potasio, seguido de incubación durante 16–18 h a temperatura ambiente. Posteriormente, se preparó una solución de trabajo ajustando la absorbancia a 0.70 ± 0.02 . En cada pocillo de microplaca, se mezclaron 280 μL de la solución de ABTS^+ con 20 μL del extracto, y la reacción se incubó durante 5 min a temperatura ambiente. La absorbancia se midió a 734 nm en un lector de microplacas. Los resultados (n=3 repeticiones) se cuantificaron mediante una

curva de calibración con Trolox y se expresaron como micromoles equivalentes de Trolox por gramo de muestra seca ($\mu\text{mol ET/g}$).

3.7 Evaluación de la modulación de óxido nítrico (ON)

La capacidad de los extractos para modular la generación de óxido nítrico se evaluó mediante el sistema de generación de ON a partir de nitroprusiato de sodio, con base en el método descrito por Srihaphon *et al.*, (2020), con modificaciones.

Se preparó una solución de nitroprusiato de sodio (SNP) a una concentración de 10 mM en solución acuosa, la cual se mezcló con buffer fosfato salino (PBS, pH 7.4). Posteriormente, se adicionó los extractos a diferentes concentraciones.

La mezcla de reacción se incubó a 25 °C durante 120 min en condiciones de oscuridad, permitiendo la liberación de óxido nítrico a partir del SNP. Durante este proceso, el ON generado reaccionó con el oxígeno para formar nitritos.

Para la cuantificación de nitritos, se tomó un volumen alícuota de la mezcla de reacción y se adicionó reactivo de Griess, compuesto por sulfanilamida (1% en ácido fosfórico al 2%) y N-(1-naftil) etilendiamina diclorhidrato (0.1%). La mezcla se incubó durante 10 min a temperatura ambiente, permitiendo la formación de un cromóforo azoico de color rosado.

La absorbancia se midió a 540–546 nm en un lector de microplacas. La concentración de nitritos se determinó mediante una curva de calibración utilizando nitrito de sodio como estándar (0–100 μM). Los resultados se expresaron como la media de tres repeticiones en porcentaje de inhibición de la generación de óxido nítrico, calculado en relación con el control sin extracto.

3.8 Desarrollo del alimento (*hot cake*)

Los hot cakes se elaboraron utilizando harina de trigo y harina de trigo sarraceno germinado y no germinado. La formulación se basó en alimentos reportados para productos tipo panqueque, empleando ingredientes convencionales como huevo, leche, mantequilla, azúcar y canela, con modificaciones en función de las condiciones experimentales del presente estudio (Lu *et al.*, 2017).

Brevemente, los ingredientes (Tabla 1) se mezclaron hasta obtener una masa homogénea y fluida. Posteriormente, los hot cake se cocinaron en una superficie caliente ($\approx 180\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante 2–3 min por lado, hasta alcanzar una cocción uniforme.

Una vez preparados, los hot cake se secaron en estufa a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h y se molieron hasta obtener un polvo homogéneo. Los hot cake deshidratados se almacenaron en condiciones controladas para su posterior análisis.

Tabla I. Ingredientes para el desarrollo de panqueques

Ingredientes	Cantidad (gr, ml)	Porcentaje (%)
Leche	300 ml	43.76
Huevo	1 (55 gr)	8.02
Azúcar	15 gr	2.18
Harina (HT, HS o HG)	265.5 gr	38.73
Polvo para hornear	5 gr	0.72
Aceite	15 ml	2.18
Esencia de vainilla	15 ml	2.18
Canela	15 gr	2.18

HT: Harina de trigo, HS: Harina de trigo sarraceno, HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

3.9 Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar con una estructura anidada, considerando como factor principal la condición del trigo sarraceno (no germinado y germinado). A partir de cada condición, se evaluó el grano y el alimento desarrollado a partir de éste, manteniendo la relación dependiente entre ambos niveles del sistema.

Las variables de respuesta incluyeron el contenido de compuestos fenólicos totales, flavonoides totales, capacidad antioxidante (DPPH y TEAC) y modulación de óxido nítrico.

El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) para la comparación de los tratamientos en las variables evaluadas, seguido de la prueba de comparación de medias de Tukey, con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

En conjunto, el enfoque experimental propuesto permitió establecer relaciones entre la composición de compuestos bioactivos del trigo sarraceno, su capacidad antioxidante y su interacción con especies reactivas de nitrógeno. En particular, se esperó que variaciones en el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides se reflejaran en cambios de la capacidad antioxidante y en la modulación de óxido nítrico. De esta manera, el estudio integró niveles bioquímicos y funcionales dentro de un mismo marco de análisis.

4. Resultados y discusión

Para evaluar el efecto de la germinación y del procesamiento del alimento, se analizaron tres tipos de harina: harina de trigo convencional (HT), harina de trigo sarraceno (HS) y harina de trigo sarraceno germinado (HG). A partir de estas harinas se elaboraron alimentos tipo hot cake para comparar los cambios asociados con la germinación, el tratamiento térmico y la incorporación de otros ingredientes.

En las harinas y en los alimentos elaborados se determinó el contenido de compuestos fenólicos totales mediante el método de Folin-Ciocalteu y el contenido de flavonoides totales mediante el método colorimétrico con cloruro de aluminio. La capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos DPPH y TEAC, mientras que la capacidad de modular la generación de óxido nítrico se determinó mediante un sistema basado en nitroprusiato de sodio.

Como etapa previa a la obtención de la harina, el trigo sarraceno se germinó durante 24 h a 25 °C, 90 % de humedad relativa y un fotoperiodo de 16 h luz/8 h oscuridad. Al finalizar este periodo se observó la emergencia de la radícula en las semillas Figura 1, característica que evidencia el inicio del proceso germinativo. La evaluación fue cualitativa, por lo que no se determinó el porcentaje de germinación ni se realizaron mediciones de la longitud de la radícula. Durante la inspección visual del material tampoco se observaron signos evidentes de crecimiento de mohos. Posteriormente, los granos germinados se congelaron, secaron y molieron para obtener la harina utilizada en los análisis y en la elaboración del alimento tipo hot cake.

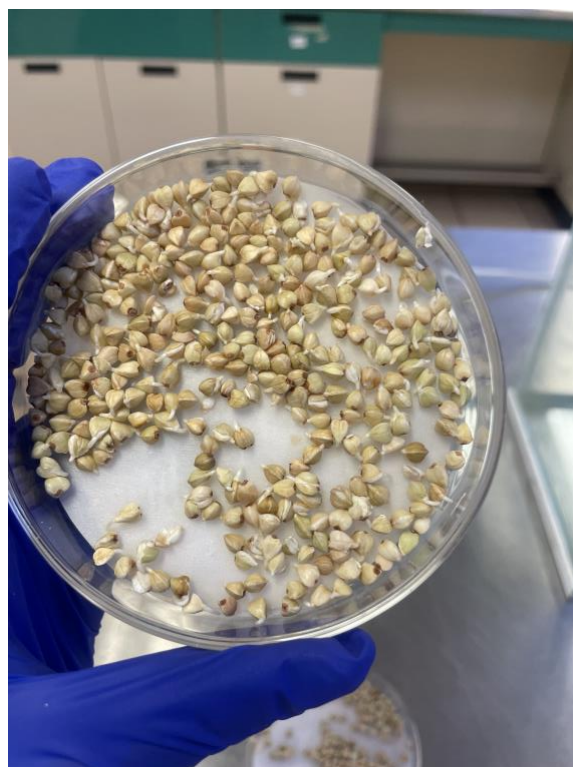


Figura 1. Obtención del grano de trigo sarraceno germinado

Živković *et al.*, (2021) reportaron la germinación de trigo sarraceno después de 24 h bajo condiciones cercanas a las empleadas en este estudio. En su

procedimiento, los granos se remojaron durante 8 h, con periodos de 15 min fuera del agua cada hora, y posteriormente se germinaron a 20 °C sobre papel filtro humedecido, manteniendo una humedad relativa superior al 95 %. En la Figura 2 se observa la emergencia de la radícula tanto en granos con cáscara como sin cáscara. El aspecto observado después de 24 h es comparable de manera cualitativa con el obtenido en este trabajo, aunque las diferencias entre ambos procedimientos no permiten establecer una comparación directa del grado de germinación.

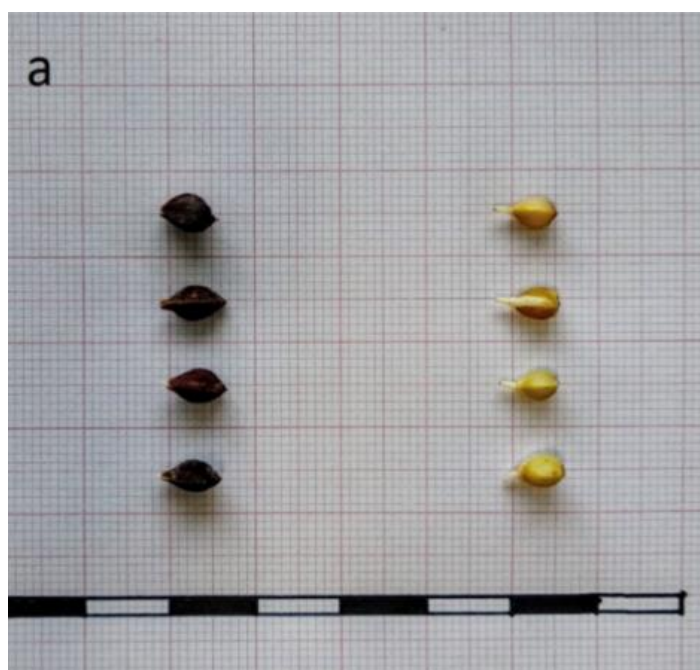


Figura 2. Trigo sarraceno germinado por 24 horas (Živković et al. 2021)

4.1 Análisis de harinas

4.1.1 Contenido de compuestos fenólicos totales en harinas

El análisis de las harinas permitió comparar el efecto de la materia prima y de la germinación sobre el contenido de compuestos bioactivos. Para ello, se evaluaron harina de trigo convencional (HT), harina de trigo sarraceno (HS) y

harina de trigo sarraceno germinado (HG). La comparación entre estas muestras permitió identificar los cambios asociados con el uso de trigo sarraceno y con el proceso de germinación antes de su incorporación al alimento.

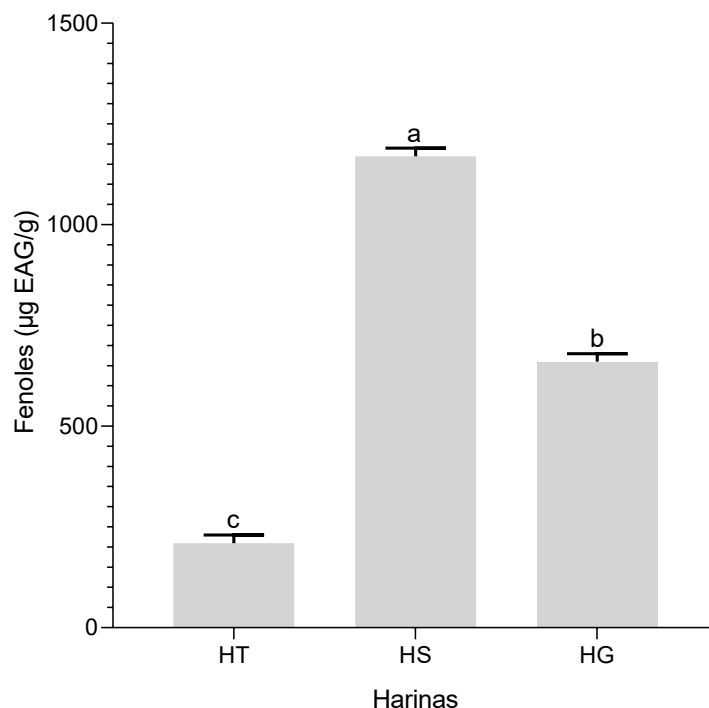


Figura 3. Contenido de fenoles totales en muestras de harinas.

Valores expresados en µg equivalentes ácido gálico/g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Harina de trigo; HS: Harina de trigo sarraceno; HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

La harina de trigo sarraceno germinado (HG) presento 660 ± 20 µg EAG/g, mostrando diferencia estadística significativas en comparación con la harina de trigo sarraceno (HS) que presento el mayor contenido de fenoles totales con un valor de 1170 ± 20 µg EAG/g. La harina HG presento una reducción del 43.58%

respecto a HS. En contraste, la harina de trigo convencional (HT) presentó el menor contenido de compuestos fenólicos totales, con valores 82.05 % inferiores a HS y 68.18 % menores que HG. La disminución de compuestos fenólicos observada en HG respecto a HS podría estar relacionada con los cambios metabólicos que ocurren durante las primeras etapas de la germinación. Durante este periodo, algunos compuestos pueden perderse por lixiviación durante la hidratación y el riego, mientras que otros pueden transformarse o utilizarse conforme aumenta la actividad metabólica de la semilla. En trigo sarraceno se ha observado que el contenido y el perfil de compuestos fenólicos cambian conforme avanza el tiempo de germinación, con incrementos más evidentes para algunos compuestos en etapas posteriores del proceso (Zhang et al., 2015).

Otros mecanismos también pueden contribuir a estas variaciones. Durante la germinación se produce la hidrólisis de componentes de reserva, la liberación y transformación de compuestos fenólicos y la síntesis de nuevos componentes necesarios para el desarrollo del embrión. Por ello, la concentración de fenoles medida en un momento determinado representa el balance entre su liberación, síntesis, transformación y utilización durante el proceso germinativo (Paucar-Menacho et al., 2022).

En contraste, el mayor contenido de compuestos fenólicos observado en HS respecto a HT puede relacionarse con la composición propia del trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), el cual se caracteriza por presentar una mayor diversidad de compuestos fenólicos y flavonoides que el trigo convencional (Sedej et al., 2010).

4.1.2 Contenido de flavonoides totales en harinas

Por otra parte, los resultados correspondientes a la cuantificación de flavonoides se muestran en la Figura 4.

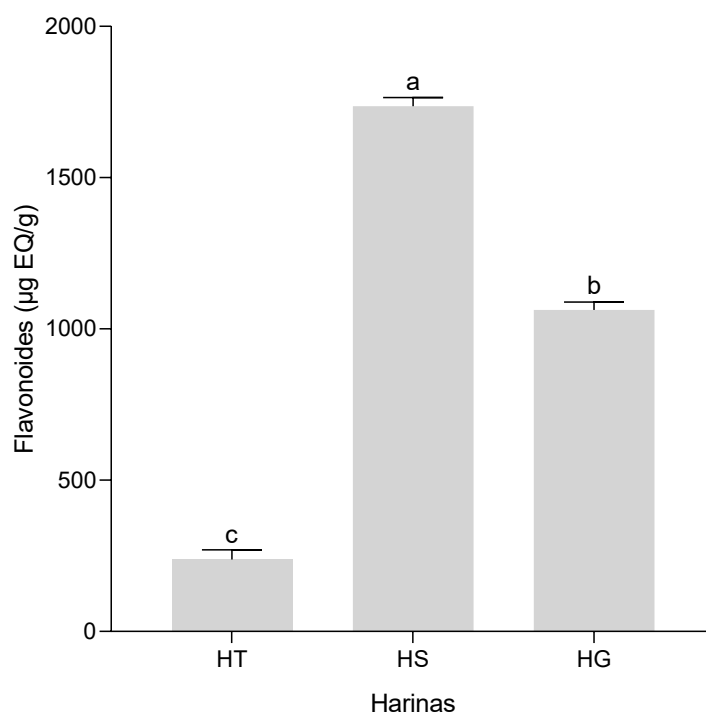


Figura 4. Contenido de flavonoides en harinas

Valores expresados en µg equivalentes quercetina /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Harina de trigo; HS: Harina de trigo sarraceno; HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

Los resultados de flavonoides totales mostraron que la harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó un contenido de 1062.47 ± 26.29 µg EQ/g, valor 38.79 % menor que el registrado en la harina de trigo sarraceno sin germinar (HS), con 1735.85 ± 28.80 µg EQ/g. Por su parte, la harina de trigo convencional (HT) presentó el menor contenido, con un valor 86.31 % inferior al de HS y 77.63 % menor que el de HG.

Los resultados observados podrían indicar que, al someter el grano de trigo sarraceno a germinación, se activan distintas rutas metabólicas, entre ellas la vía de los fenilpropanoides, relacionada con la síntesis de flavonoides y otros

metabolitos secundarios. Sin embargo, durante las primeras etapas de la germinación también aumenta la actividad metabólica de la semilla, por lo que parte de estos compuestos puede transformarse o utilizarse en procesos asociados con el crecimiento y la reorganización celular. Esto podría explicar la disminución de flavonoides libres observada durante la etapa inicial de germinación (Ortiz *et al.*, 2025).

Este comportamiento concuerda con lo reportado previamente por Hu *et al.*, (2024) cuyos resultados demostraron un aumento inicial seguido de una posterior disminución del contenido de flavonoides de los brotes de trigo sarraceno, quienes identificaron que al tercer día de germinación se obtuvo las mayores concentraciones de flavonoides, debido a que la producción de flavonoides está regulada por la actividad enzimática y los niveles de expresión génica que metabolizan los flavonoides.

De forma similar Ren & Sun, (2014) reportan que el nivel total de contenido fenólico tanto del trigo sarraceno común como del tártaro al séptimo día fue 7,1 y 3,2 veces mayor a comparación de los brotes de un día.

En conjunto, estos resultados muestran que la germinación modifica el perfil flavonoides del trigo sarraceno y que, bajo las condiciones evaluadas, las primeras 24 h se asociaron con una disminución en su contenido total. No obstante, este comportamiento no descarta que compuestos individuales puedan seguir tendencias distintas. Por ello, sería necesario complementar estos resultados con análisis dirigidos a identificar cambios específicos en compuestos fenólicos y flavonoides de interés, particularmente aquellos vinculados con mecanismos biológicos asociados con el estado de ánimo.

4.1.3 Capacidad antioxidante en harinas

4.1.3.1 DPPH

Entre las principales características de los compuestos fenólicos y flavonoides se encuentra su capacidad para actuar como donadores de electrones o átomos de hidrógeno, favoreciendo la estabilización de especies reactivas mediante resonancia. Esta capacidad depende de su estructura química, en particular del

número y la posición de los grupos hidroxilo, así como del grado de conjugación de la molécula (Goupy et al., 2003). En las harinas de trigo sarraceno se evaluó la capacidad antioxidante mediante ensayos basados en la neutralización de radicales libres, utilizando 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS). Los resultados de la capacidad antioxidante por DPPH se muestran en la Figura 5.

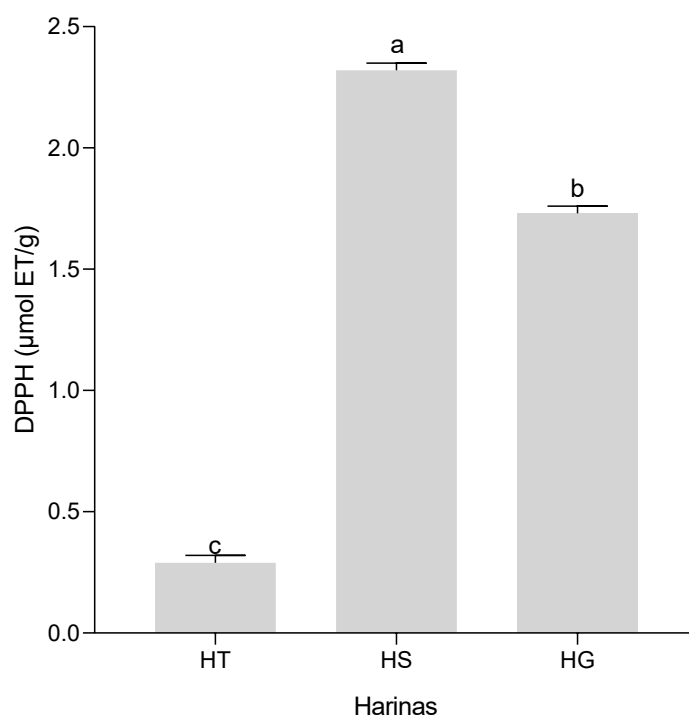


Figura 5. Capacidad antioxidante por DPPH en harina

Valores expresados en μmol equivalentes trolox /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Harina de trigo; HS: Harina de trigo sarraceno; HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

En términos generales, la harina HG demostró valores de $1.73 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$, para estabilizar especies reactivas del radical DPPH presentes en solventes

orgánicos, mientras que la harina sin germinar HS presento valores de $2.32 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$, mostrando diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) respecto a la harina HG, que tuvo una disminución del 25.43% en comparación con la harina de trigo sarraceno. Sin embargo, HG presentó una mayor capacidad antioxidante que la harina de trigo convencional (HT). Esta última mostró una capacidad 87.5 % menor respecto a HS, siendo la harina con menor respuesta en el ensayo.

El comportamiento observado en HG puede estar relacionado con el tiempo de germinación empleado. Zhang *et al.*, (2015) evaluaron trigo sarraceno germinado entre 0 y 72 h y encontraron que, a las 24 h, la capacidad de captura del radical DPPH aún no difería significativamente del grano sin germinar. Los cambios fueron más evidentes a partir de las 36 h, junto con un aumento progresivo de compuestos fenólicos y flavonoides. Estos resultados indican que la respuesta antioxidante del trigo sarraceno depende del avance de la germinación y que las primeras 24 h pueden representar una etapa en la que las modificaciones en la capacidad antioxidante todavía son limitadas.

Además, las diferencias en la capacidad antioxidante determinada mediante DPPH pueden estar relacionadas no solo con el contenido total de compuestos fenólicos y flavonoides, sino también con la composición del extracto y con las interacciones entre sus componentes, las cuales pueden generar respuestas sinérgicas, aditivas o antagónicas (Olszowy-Tomczyk & Wianowska, 2023). La estructura química de cada compuesto también influye en su capacidad para donar electrones o átomos de hidrógeno al radical DPPH, por lo que diferentes compuestos fenólicos pueden presentar distinta reactividad aun cuando se encuentren en concentraciones similares (Goupy *et al.*, 2003). Finalmente, la respuesta obtenida mediante DPPH depende de la cinética de reacción y de las condiciones del medio, factores que pueden modificar la velocidad y el grado de reducción del radical (Xie & Schaich, 2014).

4.1.3.2 TEAC

Para complementar la evaluación de la capacidad antioxidante se empleó el radical catión ABTS^{•+}. A diferencia del ensayo DPPH, que se realiza principalmente en medios orgánicos, el sistema ABTS puede utilizarse tanto en medios acuosos como orgánicos. Esto permite evaluar una gama más amplia de compuestos antioxidantes presentes en los extractos (Re *et al.*, 1999). Los resultados obtenidos mediante este ensayo se presentan en la Figura 6.

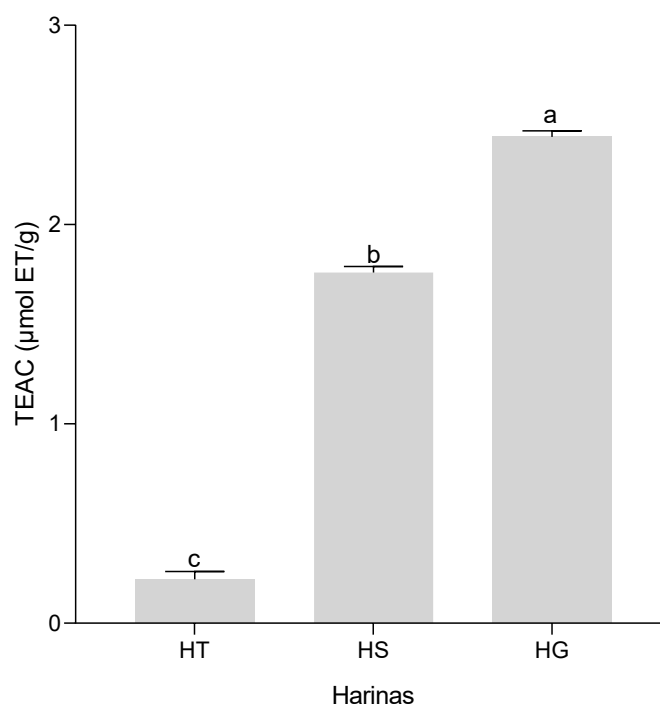


Figura 6. Capacidad antioxidante por ABTS en harina

Valores expresados en μmol equivalentes trolox /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Harina de trigo; HS: Harina de trigo sarraceno; HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

Estos resultados a comparación con los obtenidos por DPPH demuestran que la harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó la mayor capacidad antioxidante mediante el ensayo ABTS, con un valor de $2.44 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$. La harina de trigo sarraceno sin germinar (HS) mostró una capacidad 27.86 % menor que HG, mientras que la harina de trigo convencional (HT) presentó una reducción de 90.98 % respecto a HG. Se observaron diferencias significativas entre las tres harinas evaluadas ($p < 0.05$).

Esta diferencia puede estar relacionada con las características propias de cada método y con la composición de los extractos. El radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ puede reaccionar con una gama más amplia de antioxidantes y se ha reportado que refleja mejor la contribución de compuestos hidrofílicos que el ensayo DPPH (Floegel *et al.*, 2011). Por ello, el aumento observado en HG mediante ABTS podría indicar que la germinación modificó el perfil de compuestos antioxidantes presentes en la harina, favoreciendo la contribución de moléculas con mayor reactividad frente al radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$.

Durante la germinación aumenta la actividad enzimática de la semilla, incluida la actividad proteolítica, lo que favorece la hidrólisis de proteínas y la formación de péptidos de menor tamaño y aminoácidos. Algunos de estos productos pueden contribuir a la capacidad antioxidante del extracto mediante mecanismos de transferencia de electrones o hidrógeno. Por ello, la mayor respuesta observada en HG mediante ABTS podría estar relacionada no solo con los compuestos fenólicos, sino también con otros componentes generados o liberados durante la germinación (Kim *et al.*, 2026).

La germinación, por otro lado, también modifica el perfil de flavonoides del trigo sarraceno. Zhang *et al.* (2015) observaron cambios en rutina, orientina, vitexina, quercetina y otros flavonoides conforme avanzó el proceso germinativo. Además, la rutina puede ser hidrolizada por acción de la rutinósida y transformarse en quercetina, un flavonoide con actividad antioxidante (Suzuki *et al.*, 2015b). Estos cambios en la proporción de flavonoides podrían contribuir a la respuesta

observada mediante ABTS; sin embargo, para establecer esta relación sería necesario identificar y cuantificar los compuestos de manera individual.

4.1.4 Capacidad de las harinas para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess

Como parte de la evaluación del potencial bioactivo de las harinas, se determinó su capacidad para modular la generación de óxido nítrico mediante un sistema *in vitro* basado en nitroprusiato de sodio. Este ensayo permite comparar el comportamiento de los extractos frente al óxido nítrico generado en el sistema y estimar si la germinación modifica esta respuesta. Se evaluaron la harina de trigo convencional (HT), la harina de trigo sarraceno sin germinar (HS) y la harina de trigo sarraceno germinado (HG), expresando los resultados en función de la disminución de la generación de óxido nítrico respecto al control. Los resultados se observan en la figura 7.

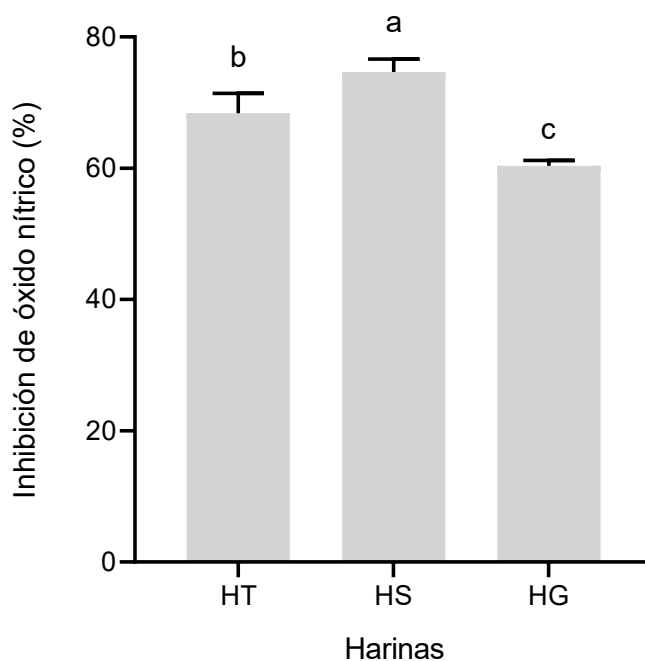


Figura 7 . Inhibición de óxido nítrico (%) de las diferentes harinas

Valores expresados en porcentaje de inhibición de óxido nítrico para cada muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Harina de trigo; HS: Harina de trigo sarraceno; HG: Harina de trigo sarraceno germinado.

El análisis de la capacidad de las harinas para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess mostró que la harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó un porcentaje de inhibición de $60.38 \pm 0.80 \%$, valor 19.14% menor que el observado en la harina de trigo sarraceno sin germinar (HS), que mostró la mayor capacidad de inhibición con $74.68 \pm 1.95 \%$. Esta diferencia fue estadísticamente significativa. Por su parte, la harina de trigo convencional (HT) presentó una inhibición de $68.40 \pm 3.02 \%$, equivalente a una reducción de 8.40% respecto a HS.

La mayor inhibición observada en HS respecto a HG puede estar relacionada tanto con las diferencias en la composición de ambas harinas como con el mecanismo del ensayo utilizado. En este sistema, el nitroprusiato de sodio actúa como fuente de óxido nítrico y el nitrito generado posteriormente puede cuantificarse mediante la reacción de Griess, por lo que una disminución de la señal refleja una menor acumulación de nitrito bajo las condiciones del ensayo (Marcocci *et al.*, 1994; Can *et al.*, 2022).

La mayor respuesta de HS podría estar asociada con su mayor contenido de compuestos fenólicos y flavonoides respecto a HG. La capacidad de estos compuestos para interactuar con el radical $ON\bullet$ depende de su estructura química y no únicamente de su concentración total. En este sentido, Van Acker *et al.* (1995) demostraron que diferentes flavonoides presentan distinta capacidad para captar $ON\bullet$, lo que indica que cambios en el perfil de flavonoides pueden modificar la respuesta frente a este radical. Estudios recientes con extractos vegetales también muestran que el contenido fenólico total no explica por sí solo toda la variación en la respuesta frente a especies reactivas, debido a la

complejidad de la composición de los extractos y a las diferencias entre los ensayos utilizados (Heckmann *et al.*, 2024).

La germinación puede modificar tanto la cantidad como el perfil individual de los compuestos fenólicos del trigo sarraceno. Zhang *et al.*, (2015) observaron cambios en rutina, orientina, isoorientina, vitexina, isovitexina y quercetina durante la germinación de *Fagopyrum esculentum*, con variaciones más marcadas después de las primeras 36 h. En cambio, en el presente estudio, la germinación se detuvo a las 24 h y HG presentó menores contenidos de fenoles y flavonoides totales que HS. Por lo tanto, la menor inhibición observada en HG podría estar relacionada tanto con esta reducción como con cambios en la proporción de compuestos con capacidad para reaccionar en el sistema nitroprusiato–Griess.

La respuesta obtenida mediante este ensayo tampoco debe esperarse que siga exactamente la misma tendencia observada mediante DPPH o ABTS. Cada método utiliza especies reactivas diferentes y responde de manera distinta a la composición del extracto. El sistema con nitroprusiato evalúa la interacción de los antioxidantes con ON• y sus productos de oxidación, mientras que DPPH y ABTS emplean radicales sintéticos con propiedades químicas diferentes (Can *et al.*, 2022; Heckmann *et al.*, 2024).

4.2 Análisis del alimento tipo hot cake

A partir de las harinas obtenidas (HT, HS y HG) se desarrolló un alimento tipo hot cake. Su incorporación en una matriz alimentaria permite evaluar los compuestos bioactivos en condiciones más cercanas al producto final, donde intervienen otros ingredientes y un tratamiento térmico. Estos factores pueden modificar su concentración, estabilidad y disponibilidad, por lo que el análisis del alimento elaborado permite conocer si las diferencias observadas entre las harinas se mantienen después de la formulación y el procesamiento (Arfaoui, 2021; Nemli *et al.*, 2024). Además, el desarrollo de un producto de consumo habitual permite considerar su posible incorporación en la alimentación.



Figura 8. Alimento tipo hot cake elaborado a partir de harina de trigo sarraceno germinado

El alimento tipo hot cake obtenido presentó una forma predominantemente circular, con ligeras variaciones en el diámetro y contorno. La superficie mostró una coloración beige a dorada, con zonas de mayor oscurecimiento principalmente en los bordes y en algunos puntos de contacto con la superficie de cocción. Este patrón de coloración es compatible con los cambios producidos durante el tratamiento térmico. Los hot cakes conservaron su estructura después de la cocción y manipulación, sin observarse fracturas extensas, colapso de la

forma o separación evidente de la matriz. También se aprecia cierta variación entre unidades en el grado de pardeamiento y grosor, atribuible al proceso de formado y cocción. En conjunto, el producto permitió obtener unidades físicamente estables para su posterior preparación de muestra y análisis de compuestos bioactivos

4.2.1 Contenido de compuestos fenólicos totales en el alimento tipo hot cake

En los alimentos elaborados se cuantificó el contenido de compuestos fenólicos libres, ya que esta fracción se encuentra más disponible dentro de la matriz alimentaria y puede contribuir de manera directa a la actividad antioxidante del producto. Los resultados se observan en la Figura 9.

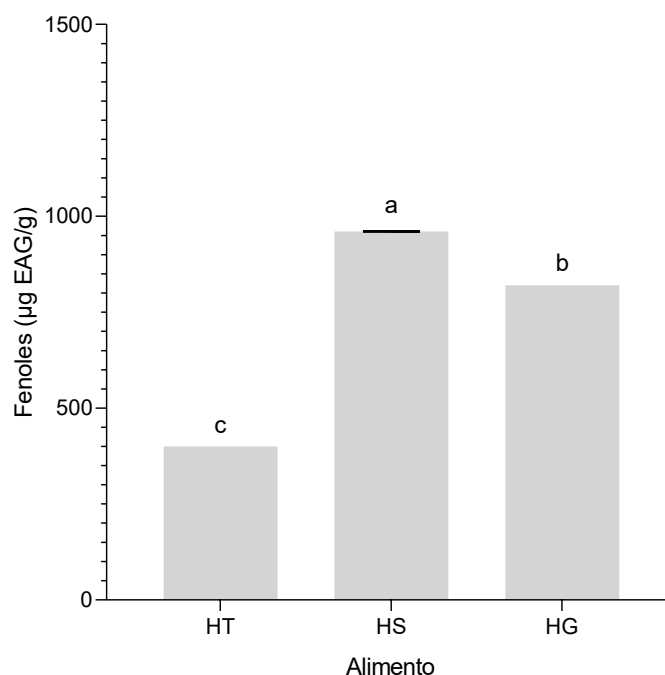


Figura 9. Contenido de fenoles totales en muestras del alimento a base de las diferentes harinas

Valores expresados en µg equivalentes ácido gálico/g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Alimento de trigo; HS: Alimento de trigo sarraceno; HG: Alimento de trigo sarraceno germinado.

Al evaluar los alimentos tipo hot cake, la formulación elaborada con harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó un contenido de compuestos fenólicos de 820 ± 20 µg EAG/g, mientras que el alimento elaborado con harina de trigo sarraceno sin germinar (HS) alcanzó 960 ± 20 µg EAG/g. Esto representa una reducción de 14.58 % en HG respecto a HS. La tendencia fue similar a la observada en las harinas, donde HS mantuvo el mayor contenido de compuestos fenólicos frente a HG. Por su parte, el alimento elaborado con harina de trigo

convencional (HT) presentó la menor concentración, con un valor 58.33 % inferior al de HS.

Al comparar los alimentos elaborados con sus respectivas harinas, se observó un comportamiento diferente entre el trigo sarraceno sin germinar y el germinado. En HS, el contenido de compuestos fenólicos disminuyó 17.95 % después de la elaboración del hot cake. En contraste, en HG se observó un aumento de 24.24 % respecto a la harina de trigo germinada. Este comportamiento sugiere que la formulación y el procesamiento afectaron de manera distinta la fracción fenólica cuantificada en ambas muestras.

La disminución de 17.95 % observada en HS después de la elaboración del hot cake puede estar relacionada con los cambios producidos durante el tratamiento térmico. En productos elaborados con trigo sarraceno se ha observado que el horneado puede reducir el contenido de compuestos fenólicos respecto a las harinas utilizadas. Jan *et al.*, (2015) relacionaron esta disminución con modificaciones estructurales, oxidación y polimerización de los compuestos fenólicos, procesos que pueden reducir su recuperación durante la extracción. De manera similar, Starowicz *et al.*, (2021) reportaron un mayor contenido fenólico en masas elaboradas con avena y trigo sarraceno que en las galletas obtenidas después de la cocción.

En HG se observó un comportamiento diferente, ya que el contenido determinado mediante Folin-Ciocalteu aumentó 24.24 % respecto a la harina germinada. El calentamiento no siempre provoca la pérdida de compuestos fenólicos; dependiendo de la matriz, puede favorecer la liberación de fracciones asociadas con otros componentes del alimento y aumentar su recuperación durante la extracción. Yu y Beta (2015) observaron en productos de cereales un aumento de fenoles libres durante distintas etapas de elaboración y cocción, mientras que los compuestos individuales respondieron de manera diferente al procesamiento.

Esto muestra que el efecto del tratamiento térmico depende de la forma en que los compuestos fenólicos se encuentran en la matriz y de su estructura química.

Este aumento también debe interpretarse considerando las características del método de Folin-Ciocalteu. El reactivo no es específico para compuestos fenólicos y puede reaccionar con otras sustancias reductoras presentes en la muestra (Everette *et al.*, 2010). Durante la cocción también se forman productos de la reacción de Maillard con capacidad reductora. Zhang *et al.*, (2023) observaron en harinas de trigo sometidas a calentamiento la formación de estos productos junto con cambios en la capacidad reductora y antioxidante. Por ello, el aumento registrado en HG no necesariamente representa un incremento equivalente en la cantidad real de compuestos fenólicos, sino que puede incluir tanto una mayor liberación de fenoles desde la matriz como la contribución de otros compuestos reductores formados durante la cocción.

En conjunto, los resultados muestran que la elaboración del hot cake produjo cambios diferentes en HS y HG. La germinación modifica previamente la composición de la harina y la forma en que algunos compuestos se encuentran asociados con la matriz, por lo que su respuesta posterior al tratamiento térmico también puede ser distinta. La identificación individual de los compuestos fenólicos permitiría determinar cuáles se conservaron, disminuyeron o aumentaron después del procesamiento.

4.2.2 Contenido de flavonoides totales en alimento tipo *hot cake*

Después de evaluar el comportamiento de los compuestos fenólicos totales, se analizó el contenido de flavonoides en los alimentos tipo hot cake elaborados con HT, HS y HG. Esta comparación permitió observar si las diferencias encontradas entre las harinas se conservaron después de la formulación y la cocción, considerando que los flavonoides pueden modificarse durante el procesamiento por efecto de la temperatura y de su interacción con otros componentes de la matriz alimentaria. Los resultados se observan en la Figura 10.

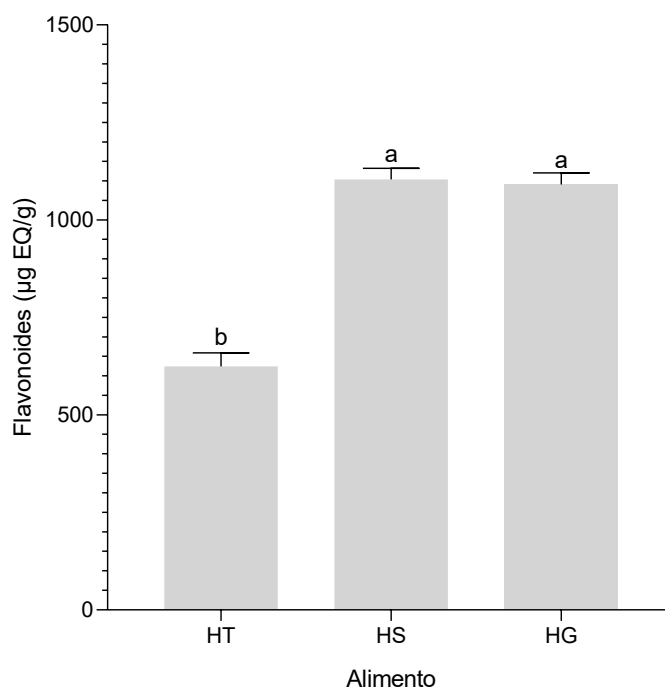


Figura 10. Contenido de flavonoides en alimento a base de las diferentes harinas

Valores expresados en µg equivalentes quercetina /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Alimento de trigo; HS: Alimento de trigo sarraceno; HG: Alimento de trigo sarraceno germinado.

En la evaluación de flavonoides totales de los alimentos tipo hot cake, HG presentó un contenido de 1090.82 ± 29.63 µg EQ/g, mientras que HS alcanzó 1104.01 ± 28.36 µg EQ/g. Ambos alimentos mostraron valores similares y no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí ($p > 0.05$). La diferencia entre ambos fue de apenas 1.19 %, lo que indica que, después de la elaboración del alimento, la germinación no produjo un cambio significativo en el contenido total de flavonoides. En contraste, el alimento elaborado con harina de trigo convencional (HT) presentó el menor contenido, con 625.57 ± 34.74 µg EQ/g, equivalente a una reducción de 43.33 % respecto a HS. Esta diferencia

coincide con la mayor presencia y diversidad de flavonoides característica del trigo sarraceno frente al trigo convencional.

A diferencia de lo observado para los compuestos fenólicos totales, donde HS mantuvo un contenido mayor que HG después del procesamiento, en los flavonoides la diferencia entre ambos alimentos dejó de ser estadísticamente significativa.

Al comparar los alimentos con sus respectivas harinas, el contenido de flavonoides en HG aumentó 2.67 %, mientras que en HS disminuyó 36.40 % después de la elaboración del hot cake. En el caso de HT, el contenido cuantificado aumentó 163.25 % respecto a la harina. Estos cambios muestran que el procesamiento no afectó de la misma manera a las tres muestras. Aunque el tratamiento térmico puede favorecer la degradación de algunos flavonoides, también puede modificar su interacción con la matriz y facilitar la liberación de compuestos que posteriormente son recuperados durante la extracción.

El comportamiento observado después de la elaboración del hot cake puede relacionarse con los cambios que produce el tratamiento térmico sobre los flavonoides y con la forma en que estos compuestos se encuentran asociados con la matriz alimentaria. Durante el procesamiento pueden ocurrir degradación, oxidación o transformación de algunos flavonoides, mientras que la modificación de la matriz puede favorecer la recuperación de otros durante la extracción. En trigo sarraceno, Liu *et al.*, (2019) observaron que el efecto del calentamiento dependió tanto del tipo de tratamiento como de la composición inicial de la muestra; en trigo sarraceno común predominaron las pérdidas de flavonoides, mientras que otras muestras mostraron respuestas diferentes después del procesamiento térmico.

Esta respuesta también depende de la estructura química de los flavonoides. Chaaban *et al.*, (2017) mostraron que, compuestos como rutina, luteolina y sus derivados presentan distinta estabilidad frente al calentamiento y que la

presencia de grupos glucosídicos puede modificar su resistencia térmica. Por ello, el contenido total no necesariamente describe el comportamiento de cada flavonoide por separado. En el caso de HG, donde el contenido cuantificado se mantuvo cercano al de la harina germinada, es posible que la germinación haya modificado previamente el perfil de estos compuestos y, con ello, su respuesta al procesamiento. Sin embargo, esta posibilidad no puede confirmarse sin determinar individualmente rutina, quercetina, orientina, vitexina y otros flavonoides.

En HS se observó una disminución de 36.40 % respecto a la harina de origen. Este comportamiento coincide con estudios en alimentos elaborados con pseudocereales, donde el procesamiento puede reducir de manera importante la cantidad de flavonoides recuperados en el producto final. Chlopicka *et al.*, (2012), por ejemplo, encontraron contenidos de flavonoides entre dos y cuatro veces mayores en las harinas de pseudocereales que en los panes elaborados a partir de ellas. En productos de trigo sarraceno también se ha observado que compuestos individuales pueden transformarse durante la elaboración; Vogrinčič *et al.*, (2010) documentaron cambios importantes en rutina y quercetina durante la preparación y cocción de pan de trigo sarraceno tártaro. Aunque se trata de otra especie de trigo sarraceno, este antecedente muestra que el procesamiento puede modificar el perfil de flavonoides y no únicamente disminuir su cantidad total.

También debe considerarse la forma en que se cuantificaron los flavonoides. El método colorimétrico con $AlCl_3$ se basa en la formación de complejos entre el aluminio y determinados grupos funcionales de los flavonoides, por lo que diferentes estructuras no producen necesariamente la misma respuesta espectrofotométrica. Shraim *et al.* (2021) demostraron que quercetina, rutina y catequina pueden generar respuestas considerablemente diferentes bajo las mismas condiciones del ensayo. Esto resulta relevante en este estudio porque la germinación y la cocción pueden modificar la proporción de los flavonoides

presentes. Por lo tanto, un cambio en el valor expresado como equivalentes de quercetina puede reflejar tanto una variación en la cantidad extraída como un cambio en el perfil de moléculas que reaccionan con el AlCl_3 .

De hecho, Liu *et al.*, (2019) observaron una situación que ayuda a interpretar este tipo de resultados: algunos tratamientos térmicos produjeron incrementos en los valores obtenidos mediante métodos colorimétricos, mientras que el análisis por HPLC mostró pérdidas de compuestos fenólicos y flavonoides individuales. Por ello, el ligero aumento observado en HG después de la elaboración del hot cake no debe interpretarse necesariamente como una formación de nuevos flavonoides, sino como un cambio en la fracción que pudo ser extraída y cuantificada mediante el método empleado.

Finalmente, al comparar las harinas con los alimentos debe considerarse que el cambio observado no corresponde exclusivamente al tratamiento térmico. La elaboración del hot cake incorpora otros ingredientes y modifica la proporción de harina dentro de la muestra final. Por esta razón, las diferencias entre harina y alimento representan el efecto conjunto de la formulación, las interacciones dentro de la matriz y la cocción. A pesar de estos cambios, los alimentos elaborados con trigo sarraceno conservaron un contenido de flavonoides superior al producto elaborado con trigo convencional, manteniendo la diferencia asociada con la materia prima.

4.2.3 Capacidad antioxidante en el alimento tipo *hot cake*

Aunque los alimentos elaborados con trigo sarraceno presentaron un mayor contenido de compuestos fenólicos y flavonoides que el elaborado con trigo convencional, esta diferencia no permite anticipar por sí sola su capacidad antioxidante. La respuesta depende también del tipo y estructura química de los compuestos presentes, ya que estas características modifican su reactividad frente a los radicales utilizados en los ensayos (Xie & Schaich, 2014). Además, durante el procesamiento térmico pueden ocurrir cambios en el perfil fenólico que modifican la capacidad antioxidante del trigo sarraceno (Liu *et al.*, 2019). Por ello,

después de cuantificar fenoles y flavonoides totales, se evaluó la capacidad antioxidante de los alimentos mediante DPPH y ABTS.

4.2.3.1 DPPH

La capacidad antioxidante de los alimentos se evaluó inicialmente mediante el radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH). Este ensayo permite estimar la capacidad de los compuestos presentes en los extractos para donar electrones o átomos de hidrógeno y reducir el radical DPPH. La respuesta obtenida depende tanto de la concentración como de la estructura química de los antioxidantes presentes, por lo que permite comparar el comportamiento de los alimentos elaborados con HT, HS y HG frente a este sistema (Figura 11).

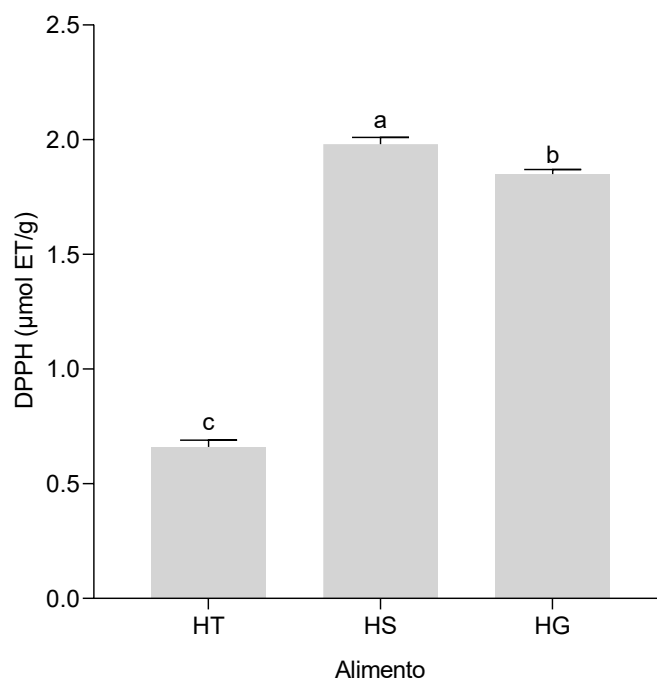


Figura 11. Capacidad antioxidante por DPPH del alimento

Valores expresados en μmol equivalentes trolox /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Alimento de trigo; HS: Alimento de trigo sarraceno; HG: Alimento de trigo sarraceno germinado.

El alimento elaborado con harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó una capacidad antioxidante de $1.85 \pm 0.02 \mu\text{mol ET/g}$, mientras que el elaborado con harina de trigo sarraceno sin germinar (HS) alcanzó $1.98 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$. Esto representa una capacidad 6.56 % menor en HG respecto a HS. Por su parte, el alimento elaborado con harina de trigo convencional (HT) mostró la menor respuesta frente al radical DPPH, con una capacidad antioxidante 66.6 % inferior a la observada en HS.

Al comparar los alimentos con sus respectivas harinas, se observó un comportamiento diferente entre HS y HG. En el caso de HG, la capacidad antioxidante aumentó 6.94 % después de la elaboración del hot cake, mientras que en HS disminuyó 14.66 %. Como resultado, la diferencia entre HS y HG, que en las harinas fue de 25.43 %, se redujo a 6.56 % en los alimentos elaborados. Esto indica que la formulación y el procesamiento modificaron de manera distinta la respuesta de ambas muestras frente al radical DPPH.

Aunque los alimentos HS y HG presentaron contenidos similares de flavonoides totales después del procesamiento, su capacidad antioxidante frente al radical DPPH fue diferente. Esto indica que el valor obtenido no depende únicamente de la concentración de flavonoides, sino también de los cambios que ocurren en la matriz durante la elaboración del alimento. En productos elaborados con trigo sarraceno se ha observado que la cocción puede modificar de manera desigual los compuestos antioxidantes y que la pérdida de algunos flavonoides no siempre se acompaña de una disminución equivalente en la capacidad para neutralizar DPPH (Żmijewski *et al.*, 2015).

En este estudio, la respuesta frente al DPPH cambió de manera distinta en HS y HG después de la elaboración del hot cake. HG mostró un aumento de 6.94 % respecto a su harina, mientras que HS disminuyó 14.66 %. Como consecuencia, la diferencia entre ambas muestras se redujo de 25.43 % en las harinas a 6.56

% en los alimentos. Este comportamiento puede estar relacionado con transformaciones producidas durante el calentamiento y con la composición inicial de cada harina. Liu *et al.*, (2019) observaron que el procesamiento térmico modifica tanto el perfil fenólico como la capacidad antioxidante del trigo sarraceno, y que la magnitud y dirección de estos cambios dependen del tipo de tratamiento y del material utilizado.

La diferencia entre HS y HG después del procesamiento también puede relacionarse con cambios en compuestos individuales. En productos elaborados con trigo sarraceno se ha descrito que la rutina puede disminuir durante la preparación y cocción, mientras que otros compuestos, como la quercetina, pueden seguir una tendencia diferente. Vogrinčič *et al.*, (2010) observaron además que la capacidad de captura del radical DPPH en panes con trigo sarraceno disminuyó solo ligeramente durante el proceso de elaboración, mientras que en el pan elaborado únicamente con trigo se observó un comportamiento distinto. Estos antecedentes muestran que la capacidad antioxidante del producto final resulta del conjunto de transformaciones ocurridas durante el procesamiento y no de un único grupo de compuestos.

A pesar de estos cambios, ambos hot cakes elaborados con trigo sarraceno mantuvieron una capacidad antioxidante superior al alimento elaborado con trigo convencional. Este resultado coincide con estudios en productos de panificación y galletería en los que la incorporación de trigo sarraceno aumentó la capacidad de captura del radical DPPH respecto a formulaciones elaboradas con cereales convencionales. Sakač *et al.*, (2015) encontraron una mayor actividad frente a DPPH en galletas elaboradas con mezclas de arroz y trigo sarraceno que en el producto control de arroz. De manera similar, Szawara-Nowak *et al.* (2017) observaron una mayor capacidad de captura de radicales en panes de trigo enriquecidos con harina de trigo sarraceno.

4.2.3.2 TEAC

Siguiendo la evaluación realizada mediante DPPH, la capacidad antioxidante de los alimentos también se determinó mediante el ensayo TEAC, basado en la reducción del radical catión $\text{ABTS}^{\bullet+}$. A diferencia del DPPH, este sistema puede responder a antioxidantes presentes tanto en medios acuosos como orgánicos, por lo que permite ampliar la evaluación de los compuestos con capacidad reductora presentes en la matriz alimentaria. Los resultados obtenidos para los alimentos tipo hot cake se muestran en la Figura 12.

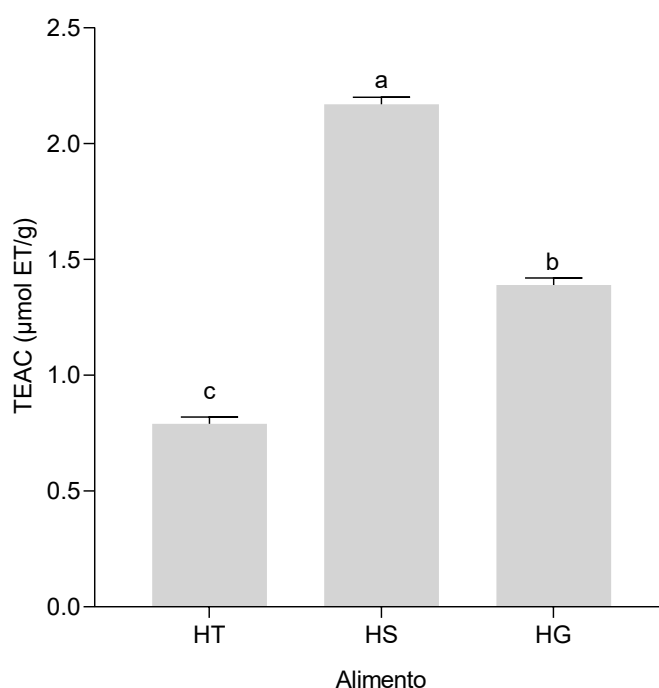


Figura 12. Capacidad antioxidante por ABTS del alimento

Valores expresados en μmol equivalentes trolox /g de muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Alimento de trigo; HS: Alimento de trigo sarraceno; HG: Alimento de trigo sarraceno germinado.

El alimento elaborado con harina de trigo sarraceno germinado (HG) presentó una capacidad antioxidante de $1.39 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$ mediante el ensayo ABTS, valor 35.94 % menor que el registrado en el alimento elaborado con harina de trigo sarraceno sin germinar (HS), que alcanzó $2.17 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$. Ambos alimentos elaborados con trigo sarraceno presentaron una mayor capacidad antioxidante que el alimento elaborado con harina de trigo convencional (HT), cuyo valor fue de $0.79 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$, equivalente a una reducción de 63.59 % respecto a HS.

Al comparar estos resultados con los obtenidos previamente en las harinas, se observó una inversión en el comportamiento de HS y HG. La harina HG había presentado la mayor capacidad antioxidante frente al radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$, con $2.44 \pm 0.03 \mu\text{mol ET/g}$, mientras que HS alcanzó aproximadamente $1.76 \mu\text{mol ET/g}$. Después de la elaboración del hot cake, la capacidad antioxidante de HG disminuyó 43.03 %, mientras que en HS aumentó 23.28 %. De esta manera, HG pasó de presentar la mayor respuesta antioxidante en la harina a mostrar una capacidad menor que HS en el alimento elaborado.

La disminución de la capacidad antioxidante observada en HG después de la elaboración del hot cake sugiere que parte de los compuestos que contribuían a la elevada respuesta frente al radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ en la harina germinada fueron modificados durante el procesamiento. Durante la germinación del trigo sarraceno se activa la proteólisis de las proteínas de reserva y aumenta la liberación de péptidos de bajo peso molecular y aminoácidos; también se producen cambios importantes en el perfil de compuestos fenólicos. Borgonovi *et al.*, (2023) observaron estas modificaciones en trigo sarraceno común germinado durante 48 y 72 h. Sin embargo, estos componentes pueden sufrir transformaciones posteriores durante el calentamiento, por lo que una mayor actividad antioxidante en la harina germinada no necesariamente se conserva en el alimento elaborado.

En este sentido, la reducción de HG no debería atribuirse exclusivamente a la degradación de péptidos bioactivos, ya que estos compuestos no fueron identificados de manera individual en el presente estudio. El tratamiento térmico puede afectar simultáneamente diferentes componentes de la matriz. Liu *et al.*, (2019) demostraron que el calentamiento modifica tanto el perfil fenólico como la capacidad antioxidante del trigo sarraceno y que la magnitud de estos cambios depende del tipo de tratamiento aplicado.

El comportamiento de HG frente a ABTS también contrastó con lo observado mediante DPPH, donde el alimento presentó una respuesta ligeramente mayor que su harina. Esta diferencia no debe considerarse contradictoria, ya que ambos métodos responden de manera distinta a la composición del extracto. Rumpf *et al.*, (2023), al comparar experimentalmente ambos ensayos, encontraron diferencias en la velocidad de reacción, sensibilidad y reproducibilidad entre ABTS y DPPH. Por ello, los cambios producidos durante la cocción pueden modificar la respuesta de una muestra de manera diferente según el radical utilizado.

En HS ocurrió el comportamiento contrario, ya que la capacidad antioxidante frente a ABTS•+ aumentó después de la elaboración del hot cake. El calentamiento puede modificar la interacción de los compuestos fenólicos con otros componentes de la matriz y alterar su recuperación durante la extracción. Además, durante la cocción se desarrollan reacciones de Maillard cuyos productos pueden contribuir a la capacidad antioxidante del alimento. Abdel-Aal y Rabalski (2022) observaron que el horneado de productos a base de cereales modificó tanto las fracciones de ácidos fenólicos como la respuesta antioxidante determinada mediante ABTS, DPPH y ORAC, y señalaron que los productos generados durante la reacción de Maillard pueden contribuir a la actividad antioxidante final.

Este fenómeno también se ha observado específicamente en trigo sarraceno. Wronkowska *et al.*, (2016) encontraron que el tostado modificó simultáneamente

los antioxidantes naturales y la formación de productos de la reacción de Maillard en granos de trigo sarraceno. Por lo tanto, el aumento observado en HS podría resultar del balance entre la pérdida de algunos compuestos originales y la liberación o formación de otros componentes con capacidad reductora durante el procesamiento. No obstante, debido a que en este estudio no se determinaron productos de Maillard de manera específica, su participación debe considerarse como una posible explicación y no como un mecanismo demostrado.

En conjunto, la inversión observada entre HS y HG muestra que el procesamiento afectó de manera diferente a ambas matrices. HG presentó la mayor capacidad antioxidante frente a ABTS•+ en la harina, pero esta ventaja se perdió después de la elaboración del hot cake, mientras que HS aumentó su respuesta en el producto final. Estos resultados muestran que la capacidad antioxidante de una harina no necesariamente predice la que tendrá el alimento elaborado, ya que la formulación y el tratamiento térmico pueden modificar la composición y la reactividad de los compuestos presentes.

4.2.4 Capacidad del alimento tipo hot cake para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess

Para evaluar la capacidad de los alimentos tipo hot cake para modular la generación de óxido nítrico, se empleó un sistema in vitro basado en nitroprusiato de sodio como fuente de óxido nítrico y su determinación indirecta mediante el reactivo de Griess. Este ensayo permitió comparar la disminución en la acumulación de nitrito en presencia de los extractos de los diferentes alimentos. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 13.

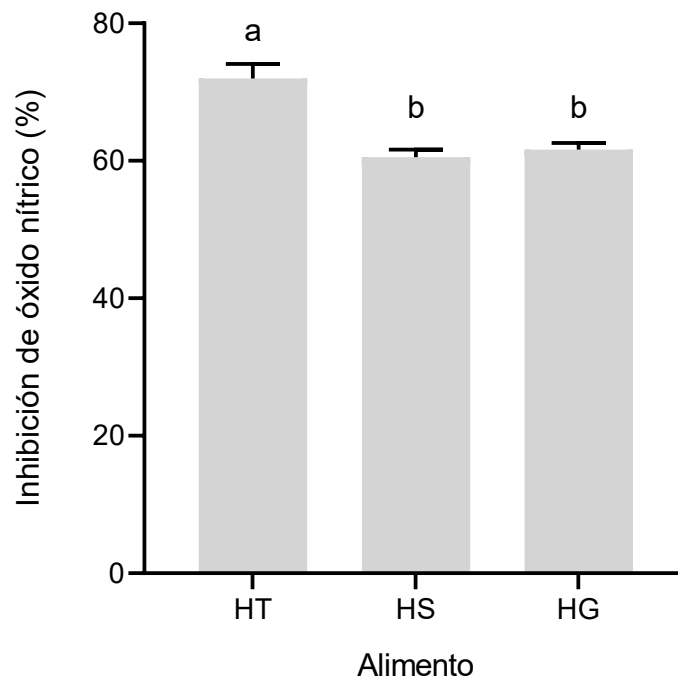


Figura 13. Inhibición de óxido nítrico (%) del alimento

Valores expresados en porcentaje de inhibición de óxido nítrico para cada muestra seca. Letras distintas (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey. HT: Alimento de trigo; HS: Alimento de trigo sarraceno; HG: Alimento de trigo sarraceno germinado.

El comportamiento de los alimentos fue diferente al observado previamente en las harinas. Entre las harinas evaluadas, HS presentó la mayor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess, con 74.68 ± 1.95 %, mientras que HG alcanzó 60.38 ± 0.80 %, con una diferencia estadísticamente significativa entre ambas. Sin embargo, después de la elaboración del hot cake esta diferencia desapareció. El alimento HG presentó un valor de 61.61 ± 1.01 %, mientras que HS alcanzó 60.53 ± 1.10 %, sin diferencias estadísticamente significativas entre ambos ($p > 0.05$).

Al comparar cada alimento con su harina, HG mostró una respuesta prácticamente estable, con un ligero aumento de aproximadamente 2.0 %, mientras que HS presentó una disminución cercana a 19 %. Como consecuencia, ambos productos alcanzaron valores similares después del procesamiento. Estos resultados indican que la elaboración del alimento modificó principalmente la respuesta de HS y redujo la diferencia inicialmente observada entre las harinas.

Un resultado que también debe considerarse es la respuesta observada en la harina de trigo convencional (HT). A pesar de presentar los menores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides, así como una menor capacidad antioxidante mediante DPPH y ABTS, HT mostró una inhibición relativamente elevada del óxido nítrico. Este comportamiento confirma que la respuesta obtenida mediante el sistema nitroprusiato–Griess no depende exclusivamente del contenido total de compuestos fenólicos ni de la capacidad antioxidante determinada mediante otros ensayos. El método de Griess cuantifica nitrito como producto derivado del óxido nítrico, por lo que la composición particular de cada extracto puede influir de manera distinta en esta respuesta (Can *et al.*, 2022).

En el caso de HT, también debe considerarse que se utilizó una harina de trigo comercial, cuya composición puede diferir de las harinas de trigo sarraceno obtenidas directamente del grano. En México, las harinas de trigo preenvasadas pueden ser adicionadas o restituidas con micronutrientes como hierro, zinc, ácido fólico, tiamina, riboflavina y niacina, de acuerdo con la NOM-247-SSA1-2008. Por lo tanto, no puede descartarse que componentes propios de la harina comercial, derivados de su procesamiento o incorporados durante su fortificación, hayan contribuido a la respuesta observada frente al sistema nitroprusiato–Griess. No obstante, esta posibilidad deberá confirmarse mediante el análisis de la composición específica de la harina utilizada.

La ausencia de diferencias significativas entre los alimentos HS y HG indica que la diferencia observada entre las harinas se redujo después de la elaboración del hot cake. Este cambio no debe atribuirse únicamente al tratamiento térmico, ya que en el alimento interviene una matriz más compleja formada por la harina y los demás ingredientes de la formulación. Las interacciones entre compuestos fenólicos, proteínas, almidón y otros componentes pueden modificar su solubilidad, extracción y actividad química. Sęczyk *et al.*, (2021) demostraron experimentalmente que las interacciones entre fenoles y la matriz alimentaria modifican tanto la recuperación de estos compuestos como su actividad antioxidante, y que el efecto depende del compuesto y de los componentes con los que interactúa.

Estas interacciones pueden ser especialmente relevantes para flavonoides presentes en el trigo sarraceno. Rawel *et al.*, (2003) observaron que quercetina y rutina pueden asociarse con proteínas alimentarias, aunque con diferente afinidad, modificando propiedades como su solubilidad y el estado de las proteínas. Por lo tanto, al incorporar la harina a una formulación, parte de los compuestos que inicialmente estaban disponibles en el extracto de la harina pueden establecer nuevas interacciones con los ingredientes del alimento, mientras que otros pueden liberarse o transformarse durante la cocción.

Este comportamiento también se ha observado en productos elaborados con trigo sarraceno. Zieliński *et al.*, (2021) encontraron que el contenido de rutina y quercetina de las harinas no se relacionó directamente con el encontrado posteriormente en los productos horneados, lo que muestra que el procesamiento y la matriz del alimento modifican el perfil que finalmente se recupera del producto. En este sentido, los valores similares obtenidos para HS y HG frente al sistema nitroprusiato–Griess probablemente reflejan el efecto conjunto de la harina, los demás ingredientes y las transformaciones ocurridas durante la cocción, más que el efecto aislado de la germinación. Por ello, la respuesta del

alimento frente al óxido nítrico no puede predecirse únicamente a partir de la actividad observada en las harinas.

Los resultados demostraron que bajo las condiciones empleadas en lo experimental el contenido tanto de fenoles y flavonoides disminuyó, así como la capacidad antioxidante mediante el ensayo DPPH con respecto a la harina de trigo sarraceno que no fue sometido a germinación.

Estas variaciones podrían estar relacionadas con los procesos metabólicos que ocurren durante la germinación, donde los compuestos bioactivos como los fenólicos pueden sufrir degradación, oxidación, lixiviación o transformación para el desarrollo y la emergencia del eje embrionario. No obstante, la harina de trigo sarraceno germinado mostró mayor capacidad antioxidante determinada mediante ABTS/TEAC. Esta diferencia indica que la respuesta antioxidante depende del método analítico empleado y podría relacionarse con cambios en la composición, disponibilidad o reactividad de los compuestos antioxidantes frente al radical ABTS•+, sin que ello implique un incremento general de la capacidad antioxidante.

En conjunto, los resultados muestran que la germinación modificó las características bioactivas del trigo sarraceno, aunque su efecto dependió del parámetro evaluado. En las harinas, HG presentó mayor capacidad antioxidante evaluada mediante ABTS, mientras que HS mostró mayores contenidos de fenoles y flavonoides, una mayor respuesta en el ensayo DPPH y mayor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito en el sistema nitroprusiato–Griess. Después de la elaboración del hot cake, estas diferencias se modificaron, lo que evidencia la influencia de la formulación, el procesamiento térmico y las interacciones propias de la matriz alimentaria sobre la respuesta de los compuestos presentes.

En particular, la diferencia observada entre HS y HG en el sistema nitroprusiato–Griess dejó de ser significativa después de la elaboración del alimento. Por lo tanto, bajo las condiciones evaluadas, la incorporación de harina de trigo sarraceno germinado no produjo en el producto final una mayor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito respecto a la harina sin germinar. No obstante, ambos alimentos conservaron actividad en este sistema, por lo que dicha respuesta puede considerarse parte de la caracterización de su potencial bioactivo.

Estos resultados proporcionan una base inicial para investigar mecanismos potencialmente relacionados con el estado de ánimo, particularmente aquellos en los que intervienen el balance oxidativo y la señalización mediada por óxido nítrico. Sin embargo, el sistema experimental empleado no permite establecer efectos sobre el estado de ánimo ni demostrar actividad antiinflamatoria o neuroprotectora. Para profundizar en esta posible relación, será necesario identificar los compuestos responsables de las respuestas observadas mediante técnicas cromatográficas y evaluar posteriormente su actividad en modelos celulares y biológicos que permitan estudiar mecanismos específicos.

5. Conclusión y recomendaciones

- La germinación durante 24 h modificó el perfil bioactivo del trigo sarraceno, pero no produjo una mejora uniforme. La harina germinada presentó menores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides, menor capacidad antioxidante frente a DPPH y menor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito que la harina sin germinar. Sin embargo, mostró una mayor capacidad antioxidante mediante ABTS.
- La harina germinada pudo incorporarse en un alimento tipo hot cake. En el producto final, la formulación germinada presentó menor contenido de compuestos fenólicos y menores respuestas frente a DPPH y ABTS que la formulación sin germinar, mientras que el contenido de flavonoides fue similar entre ambas. Los alimentos elaborados con trigo sarraceno conservaron mayores contenidos de fenoles y flavonoides y mayor capacidad antioxidante que la formulación de trigo convencional.
- En el sistema nitroprusiato–Griess, la harina de trigo sarraceno sin germinar presentó una mayor capacidad para disminuir la acumulación de nitrito que la harina germinada. Esta diferencia dejó de ser significativa después de la elaboración del hot cake, por lo que la germinación no mejoró esta respuesta en el producto final.
- Bajo las condiciones evaluadas, la germinación durante 24 h no mostró una ventaja en los parámetros bioactivos determinados en el alimento. Sin embargo, los métodos empleados evalúan contenidos totales y respuestas antioxidantes generales, por lo que no permiten descartar cambios favorables en compuestos individuales con actividad biológica relevante. La identificación y cuantificación de estos compuestos mediante técnicas cromatográficas, junto con estudios de bioaccesibilidad y modelos celulares o biológicos, será necesaria para establecer la posible funcionalidad del producto y su relación con procesos asociados con el estado de ánimo.

Bibliografía

Artículos en revistas científicas

- Abdel-Aal, E.-S.M., Rabalski, I., 2022. Cambios en los ácidos fenólicos y propiedades antioxidantes durante la cocción de pan y magdalenas elaboradas a partir de mezclas de semillas de canario sin pelo, trigo y maíz. *Antioxidants*. 11, 1059. doi: 10.3390/antiox11061059
- Aleksandrova, K., Koelman, L., Rodrigues, C.E., 2021. Dietary patterns and biomarkers of oxidative stress and inflammation: A systematic review of observational and intervention studies. *Redox Biol.* 42, 101869. doi: 10.1016/j.redox.2021.101869
- Ali, S., Corbi, G., Maes, M., Scapagnini, G., Davinelli, S., 2021. Explorando el impacto de los flavonoides en los síntomas de la depresión: una revisión sistemática y metaanálisis. *Antioxidantes*, 10(11), 1644. <https://doi.org/10.3390/antiox10111644>
- Alvarez-Jubete, L., Wijngaard, H., Arendt, E., Gallagher, E., 2009. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chem.* 119(2), 770-778. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.032>
- Alvarez-Jubete, L., Wijngaard, H., Arendt, E. K., Gallagher, E. 2010. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chem.* 119, 770–778. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.07.032
- Archer, S., 1993. Measurement of nitric oxide in biological models. *FASEB J.* 7, 349–360. doi: 10.1096/fasebj.7.2.8440401
- Arfaoui, L., 2021. Dietary plant polyphenols: Effects of food processing on their content and bioavailability. *Molecules*, 26(10), 2959.
- Baranyi, A., Amouzadeh-Ghadikolai, O., Rothenhaeusler, H.B., Theokas, S., Robier, C., Baranyi, M., Meinitzer, A., 2015. Nitric oxide-related biological pathways in patients with major depression. *PLoS ONE*. 10, e0143397. doi: 10.1371/journal.pone.0143397

- Bento, M.S., Pedroso-de-Moraes, C., 2018. Construção de uma incubadora BOD a partir de materiais reciclados para uso em ensino e pesquisas botânicas. *Rev. Agroneg. Meio Ambiente*. 11, 703–717. doi: 10.17765/2176-9168.2018v11n3p703-717
- Bhinder, S., Singh, N., Kaur, A., 2022. Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten-free muffin making properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Food Hydrocolloid*. 124, 107268. doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.107268
- Blancas-Benítez, F.J., Mercado-Mercado, G., Quirós-Sauceda, A.E., Montalvo-González, E., González-Aguilar, G.A., Sáyago-Ayerdi, S.G., 2015. Bioaccessibility of polyphenols associated with dietary fiber and in vitro kinetics release of polyphenols in Mexican ‘Ataulfo’ mango (*Mangifera indica* L.) by-products. *Food Funct*. 6, 859–868. doi: 10.1039/C4FO00982E.
- Booth, D.A., Shepherd, R., 1988. Sensory influences on food acceptance: The neglected approach to nutrition promotion. *Nutr. Bull*. 13, 39–54. doi: 10.1111/j.1467-3010.1988.tb00269.x
- Borgonovi, S.M., Chiarello, E., Pasini, F., Picone, G., Marzocchi, S., Capozzi, F., Bordoni, A., Di Nunzio, M., 2023. Effect of sprouting on biomolecular and antioxidant features of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Foods*. 12, 2047. doi: 10.3390/foods12102047
- Can, Z., Keskin, B., Üzer, A., Apak, R., 2022. Detection of nitric oxide radical and determination of its scavenging activity by antioxidants using spectrophotometric and spectrofluorometric methods. *Talanta*. 238, 122993. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122993
- Chaaban, H., Ioannou, I., Chebil, L., Slimane, M.B., Gérardin, C., Paris, C., Charbonnel, C., Ghoul, M., 2017. Effect of heat processing on thermal stability and antioxidant activity of six flavonoids. *J. Food Process. Preserv*. 41, e13203. doi: 10.1111/jfpp.13203

- Chen, Y., Zhu, Y., Qin, L., 2022. The cause of germination increases the phenolic compound contents of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *J. Future Foods*. 2, 372–379. doi: 10.1016/j.jfutfo.2022.08.009
- Cheng, N., Bell, L., Lamport, D.J., Williams, C.M., 2022. Dietary flavonoids and human cognition: A meta-analysis. *Mol. Nutr. Food Res.* 66, 2100976. doi: 10.1002/mnfr.202100976
- Chiang, M.C., Tsai, T.Y., Wang, C.J., 2023. The potential benefits of quercetin for brain health: A review of anti-inflammatory and neuroprotective mechanisms. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 6328. doi: 10.3390/ijms24076328
- Chlopicka, J., Pasko, P., Gorinstein, S., Jedryas, A., Zagrodzki, P., 2012. Total phenolic and total flavonoid content, antioxidant activity and sensory evaluation of pseudocereal breads. *LWT - Food Sci. Technol.* 46, 548–555. doi: 10.1016/j.lwt.2011.11.009
- Chunmei, Z., Shuai, W., 2025. Molecular mechanisms of neuroprotective effect of rutin. *Front. Pharmacol.* 16, 1599167. doi: 10.3389/fphar.2025.1599167
- Cochrane, A., 2017. Modelling seed germination response to temperature in *Eucalyptus* L'Her. (Myrtaceae) species in the context of global warming. *Seed Sci. Res.* 27, 99–109. doi: 10.1017/S0960258517000010
- Colombage, R.L., Holden, S., Lamport, D.J., Barfoot, K.L., 2024. The effects of flavonoid supplementation on the mental health of postpartum parents. *Front. Glob. Womens Health.* 5, 1345353. doi: 10.3389/fgwh.2024.1345353
- Colombage, R.L., Barfoot, K.L., Lamport, D.J., 2026. Effects of dietary flavonoids on mood and mental health: A systematic review. *Nutr. Rev.* 84, 734–750. doi: 10.1093/nutrit/nuae025
- Damián, M.R., Cortes-Perez, N.G., Quintana, E.T., Ortiz-Moreno, A., Garfías Noguez, C., Cruceño-Casarrubias, C.E., Sánchez-Pardo, M.E., Bermúdez-Humarán, L.G., 2022. Functional foods, nutraceuticals and probiotics: a focus on human health. *Microorganisms.* 10, 1065. doi: 10.3390/microorganisms10051065

- Dziadek, K., Kopeć, A., Pastucha, E., Piątkowska, E., Leszczyńska, T., Pisulewska, E., Witkowicz, R., Francik, R., 2016. Basic chemical composition and bioactive compounds content in selected cultivars of buckwheat whole seeds, dehulled seeds and hulls. *J. Cereal Sci.* 69, 1–8. doi: 10.1016/j.jcs.2016.01.007
- Elbandy, M., 2022. Anti-inflammatory effects of marine bioactive compounds and their potential as functional food ingredients in the prevention and treatment of neuroinflammatory disorders. *Molecules*. 28, 2. doi: 10.3390/molecules28010002
- Everette, J.D., Bryant, Q.M., Green, A.M., Abbey, Y.A., Wangila, G.W., Walker, R.B., 2010. A thorough study of reactivity of various compound classes towards the Folin-Ciocalteu reagent. *J. Agric. Food Chem.* 58, 8139–8144. doi: 10.1021/jf1005935
- Floegel, A., Kim, D.O., Chung, S.J., Koo, S.I., Chun, O.K., 2011. Comparison of DPPH and ABTS assays for determining antioxidant capacity of grain products. *J. Food Compos. Anal.* 24, 1043–1048. doi: 10.1016/j.jfca.2011.01.008
- Förstermann, U., Sessa, W.C., 2012. Nitric oxide synthases: Regulation and function. *Eur. Heart J.* 33, 829–837. doi: 10.1093/eurheartj/ehr304
- Gao, S., 2025. The path of emotional value construction of functional food in the context of health anxiety. *J. Educ. Humanit. Soc. Sci.* 60, 137–141. doi: 10.54097/grm5nr78
- Giménez-Bastida, J.A., Zielinski, H., 2015. Buckwheat as a functional food and its effects on health. *J. Agric. Food Chem.* 63, 7896–7913. doi: 10.1021/acs.jafc.5b02498
- Godos, J., Castellano, S., Ray, S., Grosso, G., Galvano, F., 2018. Dietary Polyphenol Intake and Depression: Results from the Mediterranean Healthy Eating, Lifestyle and Aging (MEAL) Study. *Molecules*. 23, 999. doi: 10.3390/molecules23050999

- Goupy, P., Dufour, C., Loonis, M., Dangles, O., 2003. Quantitative kinetic analysis of hydrogen transfer reactions from dietary polyphenols to the DPPH radical. *J. Agric. Food Chem.* 51, 615–622. doi: 10.1021/jf025938l
- Günal-Köroğlu, D., Esatbeyoglu, T., Çapanoglu, E., 2025. Effect of germination on the phenolic compounds: Content, bioavailability, food applications, and health benefits. *J. Food Meas. Charact.* 19, 8144–8164. doi: 10.1007/s11694-025-03392-6
- Gupta, M., Torrico, D.D., Hepworth, G., Gras, S.L., Ong, L., Cottrell, J.J., Dunshea, F.R., 2021. Differences in hedonic responses, facial expressions and self-reported emotions of consumers using commercial yogurts: A cross-cultural study. *Foods*. 10, 1237. doi: 10.3390/foods10061237
- He, Y., Zhang, K., Shi, Y., Lin, H., Huang, X., Lu, X., Zhao, H., Zhou, M., 2024. Genomic insight into the origin, domestication, dispersal, diversification and human selection of Tartary buckwheat. *Genome Biol.* 25, 61. doi: 10.1186/s13059-024-03203-z
- Heckmann, M., Stadlbauer, V., Drotarova, I., Gramatte, T., Feichtinger, M., Arnaut, V., Weghuber, J., 2024. Identification of oxidative-stress-reducing plant extracts from a novel extract library—Comparative analysis of cell-free and cell-based in vitro assays to quantitate antioxidant activity. *Antioxidants*. 13, 297. doi: 10.3390/antiox13030297
- Hernández López, A., Avila Alexandre, A.X., Mendoza Francisco, N., Hernández López, H., 2019. Design, construction, verification and testing of a low cost germinator. *Rev. Mex. Cien. Agríc.* 10, 431–440. doi: 10.29312/remexca.v10i2.871
- Hithamani, G., Srinivasan, K., 2014. Bioaccessibility of polyphenols from wheat (*Triticum aestivum*), sorghum (*Sorghum bicolor*), green gram (*Vigna radiata*), and chickpea (*Cicer arietinum*) as influenced by domestic food processing. *J. Agric. Food Chem.* 62, 11170–11179. doi: 10.1021/jf503450u

- Hu, M., Yang, J., Zhang, J., Fang, W., Yin, Y., 2024. Physiology and Metabolism Alterations in Flavonoid Accumulation During Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) Sprouting. *Plants*. 13, 3342. doi: 10.3390/plants13233342
- Huda, M.N., Lu, S., Jahan, T., Ding, M., Jha, R., Zhang, K., Zhu, X., Zhang, X., Yan, R., Meng, X., Zhou, M., 2021. Treasure from garden: Bioactive compounds of buckwheat. *Food Chem.* 335, 127653. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127653
- Jacka, F.N., Cherbuin, N., Anstey, K.J., Sachdev, P., Butterworth, P., 2015. Western diet is associated with a smaller hippocampus: a longitudinal investigation. *BMC Med.* 13, 215. doi: 10.1186/s12916-015-0461-x
- Jan, U., Gani, A., Ahmad, M., Shah, U., Baba, W.N., Masoodi, F.A., Maqsood, S., Wani, I.A., Wani, S.M., 2015. Characterization of cookies made from wheat flour blended with buckwheat flour and effect on antioxidant properties. *J. Food Sci. Technol.* 52, 6334–6344. doi: 10.1007/s13197-015-1773-8
- Jankovic, T., Bogicevic, M., Knezevic, N.N., 2024. The role of nitric oxide and hormone signaling in chronic stress, anxiety, depression and post-traumatic stress disorder. *Mol. Cell. Endocrinol.* 590, 112266. doi: 10.1016/j.mce.2024.112266
- Kang, L., Luo, J., Su, Z., Zhou, L., Xie, Q., Li, G., 2024. Effect of Sprouted Buckwheat on Glycemic Index and Quality of Reconstituted Rice. *Foods*. 13, 1148. doi: 10.3390/foods13081148
- Kaur, S., Das, M., 2011. Functional foods: An overview. *Food Sci. Biotechnol.* 20, 861–875. doi: 10.1007/s10068-011-0121-7
- Kim, S.M., Jeon, B.Y., Kim, U., Choi, M.J., Hwang, H.S., Kim, M.J., 2026. Effect of germination on antioxidant capacity and protein characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) with implications for food processing applications. *Appl. Sci.* 16, 2477. doi: 10.3390/app16052477
- Knowles, R.G., Moncada, S., 1994. Nitric oxide synthases in mammals. *Biochem. J.* 298, 249–258. doi: 10.1042/bj2980249

- Li, M., Qian, M., Jiang, Q., Tan, B., Yin, Y., Han, X., 2023. Evidence of flavonoids on disease prevention. *Antioxidants*. 12, 280. doi: 10.3390/antiox12020280
- Lițoiu, A.A., Păucean, A., Lung, C., Zmuncilă, A., Chiș, M.S., 2025. An overview of buckwheat—a superfood with applicability in human health and food packaging. *Plants*. 14, 2200. doi: 10.3390/plants14142200.
- Liu, Y., Cai, C., Yao, Y., Xu, B., 2019. Alteration of phenolic profiles and antioxidant capacities of common buckwheat and tartary buckwheat produced in China upon thermal processing. *J. Sci. Food Agric.* 99, 5565–5576. doi: 10.1002/jsfa.9822
- Lu, Y., Memon, A., Fuerst, P., Kizonas, A., Morris, C., Luthria, D., 2017. Changes in the phenolic acids composition during pancake preparation: Whole and refined grain flour and processed food classification by UV and NIR spectral fingerprinting method—Proof of concept. *J. Food Compos. Anal.* 60, 10–16. doi: 10.1016/j.jfca.2017.04.003
- Wronkowska, M., Piskula, M.K., Zieliński, H., 2016. Effect of roasting time of buckwheat groats on the formation of Maillard reaction products and antioxidant capacity. *Food Chem.* 196, 355–358. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.09.064
- Maqbool, Z., Arshad, M.S., Ali, A., Aziz, A., Khalid, W., Afzal, M.F., Lorenzo, J.M., 2022. Potential role of phytochemical extract from saffron in development of functional foods and protection of brain-related disorders. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2022, 6480590. doi: 10.1155/2022/6480590
- Martins, C.C., Pereira, M.R.R., Lopes, M.T.G., 2014. Germinação de sementes de eucalipto sob estresse hídrico e salino. *Biosci. J.* 30, 318–329.
- Martins, M.M., Saldanha, E., Teixeira, A.C.B., Selani, M.M., Contreras-Castillo, C.J., 2021. Going beyond sensory and hedonic aspects: A Brazilian study of emotions evoked by beef in different contexts. *Meat Sci.* 180, 108536. doi: 10.1016/j.meatsci.2021.108536

- Melrose, J., 2023. The potential of flavonoids and flavonoid metabolites in the treatment of neurodegenerative pathology in disorders of cognitive decline. *Antioxidants*. 12, 663. doi: 10.3390/antiox12030663
- Molinari, R., Costantini, L., Timperio, A.M., Lelli, V., Bonafaccia, F., Bonafaccia, G., Merendino, N., 2018. Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies. *J. Cereal Sci.* 80, 37–43. doi: 10.1016/j.jcs.2017.11.011
- Nemli, E., Ozkan, G., Gultekin-Subasi, B., Cavdar, H., Lorenzo, J.M., Zhao, C., Capanoglu, E., 2024. Interactions between proteins and phenolics: Effects of food processing on the content and digestibility of phenolic compounds. *J. Sci. Food Agric.* 104, 2535–2550. doi: 10.1002/jsfa.13112
- Olszowy-Tomczyk, M., Wianowska, D., 2023. Antioxidant properties of selected flavonoids in binary mixtures—Considerations on myricetin, kaempferol and quercetin. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 10070. doi: 10.3390/ijms241210070
- O'Neil, A., Quirk, S.E., Housden, S., Brennan, S.L., Williams, L.J., Pasco, J.A., Berk, M., Jacka, F.N., 2014. Relationship between diet and mental health in children and adolescents: a systematic review. *Am. J. Public Health*. 104, e31–e42. doi: 10.2105/AJPH.2014.302110
- Ortiz, F.A.G., Olvera, K.J.R., Llandes, C.B.M., 2025. Compuestos bioactivos durante la germinación en cereales: una revisión. *PÄDI Bol. Cient. Cien. Bási. Ing. ICBI*. 13, 139–147. doi: 10.29057/icbi.v13iespecial4.15955
- Pannu, A., Sharma, P.C., Thakur, V.K., Goyal, R.K., 2021. Emerging Role of Flavonoids as the Treatment of Depression. *Biomolecules*. 11, 1825. doi: 10.3390/biom11121825
- Paucar-Menacho, L.M., Castillo-Martínez, W.E., Simpalo-López, W.D., Verona-Ruiz, A., Lavado-Cruz, A., Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., Frias, J., Schmieie, M., 2022. Desempeño de técnicas de extrusión termoplástica, germinación, fermentación e hidrólisis sobre compuestos fenólicos en cereales y pseudocereales. *Foods*. 11, 1957. doi: 10.3390/foods11131957

- Podolska, G., Gujska, E., Klepacka, J., Aleksandrowicz, E., 2021. Bioactive compounds in different buckwheat species. *Plants*. 10, 961. doi: 10.3390/plants10050961
- Radi, R., 2013. Peroxynitrite, a stealthy biological oxidant. *J. Biol. Chem.* 288, 26464–26472. doi: 10.1074/jbc.R113.472936
- Ramos-Pacheco, B.S., Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C.A., Solano-Reynoso, A.M., Palomino-Rincón, H., Choque-Quispe, Y., Peralta-Guevara, C.E., Moscoso-Moscoso, E., Huamán-Carrión, F.L., Calla-Florez, M., Aiquipa-Pillaca, Á.S., 2024. Effect of germination on the physicochemical properties, functional groups, content of bioactive compounds, and antioxidant capacity of different varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grown in the high Andean zone of Peru. *Foods*. 13, 417. doi: 10.3390/foods13030417
- Rawel, H.M., Rohn, S., Kroll, J., 2003. Influence of a sugar moiety (rhamnosylglucoside) at 3-O position on the reactivity of quercetin with whey proteins. *Int. J. Biol. Macromol.* 32, 109–120. doi: 10.1016/s0141-8130(03)00044-8
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C., 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* 26, 1231–1237. doi: 10.1016/s0891-5849(98)00315-3
- Ren, S.C., Sun, J.T., 2014. Changes in phenolic content, phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity, and antioxidant capacity of two buckwheat sprouts in relation to germination. *J. Funct. Foods*. 7, 298–304. doi: 10.1016/j.jff.2014.01.031
- Ribeiro-Oliveira, J.P., Bosseli, M.A., da Silva, E.A.A., 2021. Acceleration in germination sensu stricto plays a central role on seedling vigor in post-germination. *Plants*. 10, 2151. doi: 10.3390/plants10102151
- Rudrapal, M., Rakshit, G., Singh, R.P., Garse, S., Khan, J., Chakraborty, S., 2024. Dietary Polyphenols: Review on Chemistry/Sources,

Bioavailability/Metabolism, Antioxidant Effects, and Their Role in Disease Management. *Antioxidants*. 13, 429. doi: 10.3390/antiox13040429

– Ruiz-Hernández, A.A., Cárdenas-López, J.L., Cortez-Rocha, M.O., González-Aguilar, G.A., Robles-Sánchez, R.M., 2021. Optimization of germination of white sorghum by response surface methodology for preparing porridges with biological potential. *CyTA - J. Food*. 19, 49–55. doi: 10.1080/19476337.2020.1853814

– Ruiz-Hernández, A.A., Rouzaud-Sáñez, O., Frias, J., Ayala-Zavala, F., Astiazarán-García, H., Salazar-López, N.J., Sánchez, M.R., 2023. Antioxidant and anti-inflammatory potential of a food produced from irradiated (UV-A LED) sorghum sprouts subjected to in vitro gastrointestinal simulation. *J. Funct. Foods*. 110, 105857. doi: 10.1016/j.jff.2023.105857

– Ruiz-Hernández, A.A., Rouzaud-Sáñez, O., Valenzuela-González, M., Domínguez-Avila, J.A., González-Aguilar, G.A., Robles-Sánchez, M., 2025. Antioxidant/antiinflammatory potential and sensory acceptance of granola bars developed with sorghum sprout flour irradiated with UV-A LED light. *Foods*. 14, 1787. doi: 10.3390/foods14101787

– Rumpf, J., Burger, R., Schulze, M., 2023. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins. *Int. J. Biol. Macromol.* 233, 123470. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123470

– Sakač, M., Pestorić, M., Mišan, A., Nedeljković, N., Jambrec, D., Jovanov, P., Mandić, A., 2015. Antioxidant capacity, mineral content and sensory properties of gluten-free rice and buckwheat cookies. *Food Technol. Biotechnol.* 53, 38–47. doi: 10.17113/ftb.53.01.15.3633

– Salazar Lopez, N.J., Loarca-Piña, G., Campos-Vega, R., Gaytán Martínez, M., Morales Sánchez, E., Esquerra-Brauer, J.M., Serna Saldívar, S.O., Robles Sanchez, M., 2016. The extrusion process as an alternative for improving the biological potential of sorghum bran: phenolic compounds and antiradical and anti-inflammatory capacity. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.* 2016, 8387975. doi: 10.1155/2016/8387975

- Salazar-López, N.J., González-Aguilar, G.A., Loarca-Piña, G., Cinco-Moroyoqui, F.J., Rouzaud-Sáñez, O., Domínguez-Avila, J.A., Robles-Sánchez, M., 2017. Contribution and interactions of hydroxycinnamic acids found in bran and wholegrain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench): Effects on the antioxidant capacity and inhibition of human erythrocyte hemolysis. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2017, 8219023. doi: 10.1155/2017/8219023
- Salato, R.E., Carvalho, H.J.M., Melo, J.D.O., Schmiele, M., 2026. Germination-driven modulation of phenolic compounds in sorghum: Bioactivity and gene expression. *Foods.* 15, 1022. doi: 10.3390/foods15061022
- Sălcudean, A., Bodo, C., Popovici, R., Cozma, M., Păcurar, M., Crăciun, R., Crisan, A., Enatescu, V., Marinescu, I., Cimpian, D., Nan, A., Sasu, A., Anculia, R., Strete, E., 2025. Neuroinflammation—a crucial factor in the pathophysiology of depression—a comprehensive review. *Biomolecules.* 15, 502. doi: 10.3390/biom15040502
- Sanoubar, R., Calone, R., Noli, E., Barbanti, L., 2018. Data on seed germination using LED versus fluorescent light under growth chamber conditions. *Data Brief.* 19, 594–600. doi: 10.1016/j.dib.2018.05.040
- Sarun, H., 2026. Seed propagation: Physiology, dormancy, and germination mechanisms. *J. Agric. Environ.* 3, 482–487.
- Scuto, M., Majzúnová, M., Torcitto, G., Antonuzzo, S., Rampulla, F., Di Fatta, E., Trovato Salinaro, A., 2024. Functional food nutrients, redox resilience signaling and neurosteroids for brain health. *Int. J. Mol. Sci.* 25, 12155. doi: 10.3390/ijms252212155
- Sęczyk, Ł., Gawlik-Dziki, U., Świeca, M., 2021. Influence of phenolic-food matrix interactions on in vitro bioaccessibility of selected phenolic compounds and nutrients digestibility in fortified white bean paste. *Antioxidants.* 10, 1825. doi: 10.3390/antiox10111825
- Sedej, I., Sakač, M., Mandić, A., Mišan, A., Pestorić, M., Šimurina, O., Čanadanović-Brunet, J., 2010. Quality assessment of gluten-free crackers based on buckwheat flour. *LWT.* 44, 694–699. doi: 10.1016/j.lwt.2010.11.010

- Sedgi, F.M., Hejazi, J., Derakhshi, R., Baghdadi, G., Zarmakhi, M., Hamidi, M., Rahimlou, M., 2025. Investigation of the relationship between food preferences and depression symptoms among undergraduate medical students: A cross-sectional study. *Front. Nutr.* 12, 1519726. doi: 10.3389/fnut.2025.1519726
- Shraim, A.M., Ahmed, T.A., Rahman, M.M., Hijji, Y.M., 2021. Determination of total flavonoid content by aluminum chloride assay: A critical evaluation. *LWT.* 150, 111932. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111932
- Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vitic.* 16, 144–158.
- Srihaphon, K., Wongwat, T., Lamlerthton, S., Pitaksuteepong, T., 2020. Investigation on the potential application of *Morus alba* stem extract for inflammatory acne vulgaris. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 42, 1319.
- Starowicz, M., Arpaci, S., Topolska, J., Wronkowska, M., 2021. Phytochemicals and antioxidant activity in oat-buckwheat dough and cookies with added spices or herbs. *Molecules.* 26, 2267. doi: 10.3390/molecules26082267
- Sun, W., Shahidi, F., 2022. Maillard reaction chemistry in flavour compounds and antioxidants. *Food Chem.* 367, 130135. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130135
- Sun, A., Chen, L., Wu, W., Soladoye, O.P., Zhang, Y., Fu, Y., 2023. The potential meat flavoring generated from Maillard reaction products of wheat gluten protein hydrolysates-xylose: Impacts of different thermal treatment temperatures on flavor. *Food Res. Int.* 165, 112512. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112512
- Suzuki, T., Morishita, T., Kim, S., Park, S., Woo, S., Noda, T., Takigawa, S., 2015. Physiological Roles of Rutin in the Buckwheat Plant. *JARQ.* 49, 37–43. doi: 10.6090/jarq.49.37
- Suzuki, T., Morishita, T., Kim, S., Park, S., Woo, S., Noda, T., Takigawa, S., 2015b. Physiological Roles of Rutin in the Buckwheat Plant. *JARQ.* 49, 37–43. doi: 10.6090/jarq.49.37

- Szawara-Nowak, D., Zielinska, D., Zielinski, H., Wronkowska, M., 2017. Antioxidant Properties of Dark Wheat Bread with Exogenous Addition of Buckwheat Flour. In: *InTech*. doi: 10.5772/65411
- Teng, T., Song, C., 2025. Research progress of quercetin on anti-anxiety and anti-depression. *Front. Pharmacol.* 16, 1621510. doi: 10.3389/fphar.2025.1621510
- Temple, N.J., 2022. A rational definition for functional foods: A perspective. *Front. Nutr.* 9, 957516. doi: 10.3389/fnut.2022.957516
- Thompson, A.S., Bondonno, N.P., Liu, Y.L., Qureshi, F., Kubzansky, L.D., Trudel-Fitzgerald, C., Boehm, J.K., Rimm, E.B., Cassidy, A., 2026. Dietary flavonoid intake and psychological well-being: a bidirectional relationship. *Clin. Nutr.* 58, 106579. doi: 10.1016/j.clnu.2026.106579
- Valenzuela-González, M., Cárdenas-López, J.L., Burgos-Hernández, A., Salazar-López, N.J., Viuda-Martos, M., Ruiz-Hernández, A.A., Robles-Sánchez, R.M., 2023. Quinoa treated by an optimized method of microwave heating and their effect on antioxidant activity and phenolic compounds after in vitro gastrointestinal digestion. *CyTA J. Food.* 21, 751–759. doi: 10.1080/19476337.2023.2279186
- Vignesh, A., Amal, T.C., Sarvalingam, A., Vasanth, K., 2024. A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. *Food Chem. Adv.* 5, 100749. doi: 10.1016/j.focha.2024.100749
- Vogrincic, M., Timoracka, M., Melichacova, S., Vollmannova, A., Kreft, I., 2010. Degradation of rutin and polyphenols during the preparation of tartary buckwheat bread. *J. Agric. Food Chem.* 58, 4883–4887. doi: 10.1021/jf9045733
- Wierońska, J.M., Cieślik, P., Kalinowski, L., 2021. Nitric Oxide-Dependent Pathways as Critical Factors in the Consequences and Recovery after Brain Ischemic Hypoxia. *Biomolecules.* 11, 1097. doi: 10.3390/biom11081097
- Xiang, J., Yuan, Y., Du, L., Zhang, Y., Li, C., Beta, T., 2023. Modification on phenolic profiles and enhancement of antioxidant activity of proso millets during germination. *Food Chem. X.* 18, 100628. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100628

- Xie, J., Schaich, K.M., 2014. Re-evaluation of the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl free radical (DPPH) assay for antioxidant activity. *J. Agric. Food Chem.* 62, 4251–4260. doi: 10.1021/jf500180u
- Xu, Y., Wang, X., Zhou, X., Peng, L., Yuan, J., Zhang, Y., Wu, N., Ye, J., 2025. Nitric oxide-mediated S-nitrosylation contributes to signaling transduction in human physiological and pathological states. *Int. J. Mol. Med.* 56, 152. doi: 10.3892/ijmm.2025.5593
- Yang, Q., Shen, Y., Foster, T., Hort, J., 2020. Measuring consumer emotional response and acceptance to sustainable food products. *Food Res. Int.* 131, 108992. doi: 10.1016/j.foodres.2020.108992
- Yang, Y., Zhang, Y., Chen, L., Li, Z., Zhao, Q., 2025. Therapeutic potential of quercetin in depressive symptoms: a systematic review and meta analysis of preclinical studies. *Front. Pharmacol.* 16, 1598053. doi: 10.3389/fphar.2025.1598053
- Yao, Y.F., Song, X.Y., Xie, G., Tang, Y.N., Wortley, A.H., Qin, F., Wang, Y.F., 2023. New insights into the origin of buckwheat cultivation in southwestern China from pollen data. *New Phytol.* 237, 2467–2477. doi: 10.1111/nph.18683
- Yu, L., Beta, T., 2015. Identification and antioxidant properties of phenolic compounds during production of bread from purple wheat grains. *Molecules.* 20, 15525–15549. doi: 10.3390/molecules200915525
- Zamaratskaia, G., Gerhardt, K., Knicky, M., Wendin, K., 2024. Buckwheat: an underutilized crop with attractive sensory qualities and health benefits. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 64, 12303–12318. doi: 10.1080/10408398.2023.2249112
- Zhang, Z.L., Zhou, M.L., Tang, Y., Li, F.L., Tang, Y.X., Shao, J.R., Wu, Y.M., 2012. Bioactive compounds in functional buckwheat food. *Food Res. Int.* 49, 389–395. doi: 10.1016/j.foodres.2012.07.035
- Zhang, G., Xu, Z., Gao, Y., Huang, X., Zou, Y., Yang, T., 2015. Effects of germination on nutritional properties, phenolic profiles and antioxidant activities of buckwheat. *J. Food Sci.* 80, H1140–H1146. doi: 10.1111/1750-3841.12830

- Zhang, C., Guo, X., Guo, R., Zhu, L., Qiu, X., Yu, X., Chai, J., Gu, C., Feng, Z., 2023. Insights into the effects of extractable phenolic compounds and Maillard reaction products on the antioxidant activity of roasted wheat flours with different maturities. *Food Chem. X.* 17, 100548. doi: 10.1016/j.fochx.2022.100548
- Zhong, L., Qing, Y., Liu, J., 2026. Mood food: antidepressant effects of culinary spices. *Front. Nutr.* 13, 1790721. doi: 10.3389/fnut.2026.1790721
- Živković, A., Polak, T., Cigić, B., Požrl, T., 2021. Germinated buckwheat: Effects of decortication on phenolic profile and antioxidant activity of buckwheat seeds. *Foods.* 10, 740. doi: 10.3390/foods10040740
- Zmijewski, M., Sokoł-Łętowska, A., Pejcz, E., Orzeł, D., 2015. Antioxidant activity of rye bread enriched with milled buckwheat groats fractions. *Rocz. Panstw. Zakł. Hig.* 66, 123–130.
- Zugravu, C.-A., Petre, M., Constantin, C., 2026. Traditional food systems as nutrient optimization architectures: Bioavailability mechanisms and dietary resilience. *Nutrients.* 18, 1448. doi: 10.3390/nu18091448

Libros

- Brasil, 2009. Regras para Análise de Sementes, 1. ed., 398 p. Ministério da Agricultura, Pecuária e Meio Ambiente..
 - Monk, S., 2010. 30 Arduino Projects for the Evil Genius, 3rd rev. ed. McGraw-Hill, New York.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003. Sistema de Semillas de Calidad Declarada: Consulta de Expertos. FAO, Roma.

Normas y documentos oficiales

- International Seed Testing Association, 2017. International Rules for Seed Testing. ISTA, Bassersdorf, Switzerland.

- Secretaría de Salud, 2009. Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales o de leguminosas, sus mezclas. Harinas preparadas para alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, de harinas o sus mezclas. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, de harinas o sus mezclas para lactantes y niños de corta edad. Denominaciones. Especificaciones sanitarias y nutrimentales. Diario Oficial de la Federación.
- World Health Organization, 2025. Trastorno Depresivo (Depresión). World Health Organization, Geneva.