

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**ARABINOXILANOS FERULADOS OBTENIDOS DE SALVADO DE TRIGO  
(*Triticum aestivum* L.) COMO INGREDIENTE FUNCIONAL EN PANIFICACIÓN.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN  
INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTA:**

**LIC. ARIANNA SANFIEL OLIVA**

**GENERAL ESCOBEDO, N.L.**

**DICIEMBRE DE 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**ARABINOXILANOS FERULADOS OBTENIDOS DE SALVADO DE TRIGO  
(*Triticum aestivum* L.) COMO INGREDIENTE FUNCIONAL EN PANIFICACIÓN.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN  
INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTA:  
LIC. ARIANNA SANFIEL OLIVA**

GENERAL ESCOBEDO, N.L.

DICIEMBRE DE 2024

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN  
INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

COMITÉ PARTICULAR



Dr. Guillermo Niño Medina  
Director de Tesis



Dr. Pablo Alan Rodríguez Salinas  
Co-Director



Dr. Celestino García Gómez  
Asesor



Dra. Nydia Corina Vásquez Aguilar  
Asesora



Dr. Fernando de Jesús Carballo Méndez  
Asesor

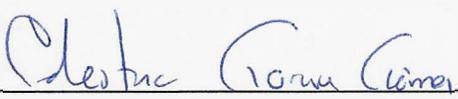


Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto  
Subdirectora de Posgrado e Investigación

ESTA TESIS FUE APROBADA EN FORMATO, POR EL COMITÉ DE POSGRADO,  
ATENDIENDO A EL ARTÍCULO 123, DEL REGLAMENTO GENERAL DEL  
SISTEMA DE POSGRADO DE LA UANL.

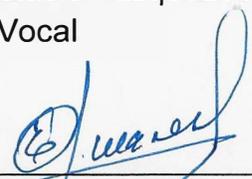
COMITÉ DE POSGRADO

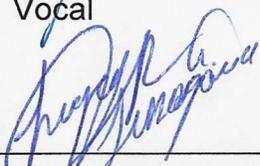
  
Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto  
Presidenta

  
Dr. Celestino García Gómez  
Secretario

  
Dra. Lidia Rosaura Salas Cruz  
Vocal

  
Ph.D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado  
Vocal

  
Ph.D. Emilio Olivares Sáenz  
Vocal

  
Dra. Sughey Ramona Sinagawa García  
Vocal

  
Dr. Guillermo Niño Medina  
Vocal

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por inculcarme los valores de la perseverancia y el esfuerzo, por ser una fuente constante de motivación e inspiración, han sido el pilar fundamental en cada paso del camino.

A mi familia y amigos, por su aliento constante y por creer en mis sueños incluso en los momentos más desafiantes, por estar siempre a mi lado, apoyándome en cada paso y celebrando mis éxitos como propios.

A mis profesores y mentores a lo largo de mi formación, cuya guía y enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi desarrollo profesional y personal.

Finalmente, esta tesis está dedicada a todos aquellos que, con su apoyo, paciencia y palabras de aliento, contribuyeron a que esta meta se convirtiera en una realidad, este logro también es suyo.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincera gratitud a todas aquellas personas e instituciones que me han acompañado y apoyado durante esta etapa de mi formación académica. Este logro no habría sido posible sin el respaldo y aliento de quienes creyeron en mí.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, Dr. Guillermo Niño Medina, por su invaluable guía y constante disposición para compartir su conocimiento y experiencia. Su apoyo fue crucial para la realización de esta investigación.

Extiendo mi agradecimiento a los miembros del comité de tesis, por sus observaciones y sugerencias, que enriquecieron este proyecto y contribuyeron a su mejora.

A mis profesores y compañeros del programa de maestría, gracias por los conocimientos compartidos y los debates académicos que enriquecieron esta experiencia formativa.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial a la Facultad de Agronomía, que proporcionó los recursos y las oportunidades necesarias para la realización de esta investigación, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el respaldo económico recibido.

A mi familia y amigos, les agradezco por su amor incondicional, comprensión y motivación constante. Sus palabras de aliento y su confianza en mis capacidades me dieron la fuerza para superar los desafíos.

## INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
HIPÓTESIS .....	6
OBJETIVOS .....	7
1.1 Objetivo General .....	7
1.1.1 Objetivos Específicos.....	7
REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1 Generalidades del Trigo .....	8
2.2 Salvado de Trigo como Subproducto de la Industrialización del Trigo .....	9
2.2.1 Composición Química .....	10
2.3 Fibra Dietética Soluble e Insoluble .....	11
2.4 Compuestos Fenólicos Libres y Ligados .....	12
2.5 Polisacáridos y Oligosacáridos.....	13
2.6 Arabinosilanos Extraíbles y No Extraíbles en Agua.....	13
2.7 Tendencias en el Consumo de Alimentos Saludables.....	16
2.8 Uso de AX como Ingrediente Alimenticio .....	19
2.8.1 Uso de AX en Panificación.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Localización del Estudio .....	21
3.2 Caracterización del Salvado de Trigo.....	21
3.3 Proceso de Extracción de los Arabinosilanos.....	22
3.3.1 Pretratamiento del Salvado de Trigo.....	22
3.3.2 Extracción de los AX.....	22
3.4 Rendimiento del Proceso de Extracción.....	23
3.5 Caracterización de los Extractos de AX .....	23
3.5.1 Extracción de Compuestos Fenólicos.....	23
3.5.2 Determinación de Fenoles Totales .....	24

3.5.3 Capacidad Antioxidante .....	24
3.6 Elaboración del Pan .....	25
3.7 Influencia en las Propiedades de la Masa .....	26
3.7.1 Extensibilidad de la Masa .....	26
3.7.2 Capacidad de Absorción de Agua .....	27
3.8 Evaluación de las Características de los Panes.....	27
3.8.1 Pérdida de Peso Durante el Horneado .....	27
3.8.2 Características Físicas.....	27
3.8.3 Determinación de Color y Textura .....	28
3.8.4 Análisis de Imagen de la Miga .....	29
3.8.5 Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante .....	29
3.9 Análisis Estadístico.....	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
4.1 Caracterización del Salvado de Trigo.....	31
4.2 Caracterización de los Extractos de AX .....	32
4.2.1 Rendimiento.....	33
4.2.2 Contenido de Fenoles Totales .....	34
4.2.3 Capacidad Antioxidante de los Extractos.....	35
4.3 CAA y Extensibilidad de la Masa.....	36
4.4 Evaluación de los Parámetros de Calidad del Pan.....	40
4.5 Influencia en el Color.....	44
4.6 Análisis del Perfil de Textura .....	46
4.7 Análisis de Imagen de la Miga.....	50
4.8 Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante del Pan .....	53
CONCLUSIONES .....	57
RECOMENDACIONES .....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
<b>Cuadro 1.</b> Características de AX obtenidos de diferentes fuentes .....	14
<b>Cuadro 2.</b> Uso de fibra dietética en panificación. ....	18
<b>Cuadro 3.</b> Fórmula empleada en la elaboración del pan blanco.....	25
<b>Cuadro 4.</b> Composición química del salvado de trigo.....	31
<b>Cuadro 5.</b> Evaluación del contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante del salvado de trigo.....	32
<b>Cuadro 6.</b> Rendimiento de los extractos de AX. ....	33
<b>Cuadro 7.</b> Contenido de fenoles totales de los extractos de AX.....	34
<b>Cuadro 8.</b> Capacidad antioxidante mediante DPPH de los extractos de AX. ....	35
<b>Cuadro 9.</b> Capacidad antioxidante mediante ABTS de los extractos de AX.....	36
<b>Cuadro 10.</b> Efecto de los AX en la capacidad de absorción de agua de la masa.....	37
<b>Cuadro 11.</b> Fuerza de la masa evaluada en diferentes tiempos de reposo.....	38
<b>Cuadro 12.</b> Distancia de extensión de la masa evaluada en diferentes tiempos de reposo. ....	39
<b>Cuadro 13.</b> Características físicas del pan. ....	42
<b>Cuadro 14.</b> Características cromáticas de la corteza del pan.....	44
<b>Cuadro 15.</b> Perfil de textura de los panes en el día de su elaboración (Día 0).....	46
<b>Cuadro 16.</b> Perfil de textura de los panes en el día 3 desde su elaboración .....	47
<b>Cuadro 17.</b> Perfil de textura de los panes en el día 6 desde su elaboración .....	48
<b>Cuadro 18.</b> Parámetros de la miga obtenidos mediante el análisis de imagen. ....	52
<b>Cuadro 19.</b> Contenido de fenoles totales del pan.....	53
<b>Cuadro 20.</b> Capacidad antioxidante mediante el método DPPH .....	54
<b>Cuadro 21.</b> Capacidad antioxidante mediante el método ABTS.....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
<b>Figura 1.</b> Estructura del grano de trigo. ....	8
<b>Figura 2.</b> Estructura química de una fracción de arabinoxilano ferulado .....	11
<b>Figura 3.</b> Análisis bromatológicos. (A) Determinación de humedad; (B) Determinación de cenizas; (C) Determinación de grasas y (D) Determinación de nitrógeno. ....	21
<b>Figura 4.</b> Pretratamiento del salvado de trigo. (A) Molienda; (B) Tamizado; (C) Desgrasado; (D) Desalmidonado; (E) Salvado antes del tratamiento y (F) Salvado sin grasa y sin almidón. ....	22
<b>Figura 5.</b> Obtención de los AX. (A) Extracción con NaOH; (B) AX precipitados con etanol; (C) Separación mediante centrifugación; (D) AX liofilizados; (E) Extracto de AX. ....	23
<b>Figura 6.</b> Piezas de pan luego de la fermentación, antes de hornear.....	26
<b>Figura 7.</b> Medición de la extensibilidad de la masa. (A) Prensado de la masa; (B) Kit de Kieffer.....	26
<b>Figura 8.</b> Dimensiones del pan. (A) diámetro máximo (mm); (B) altura máxima (mm). ....	28
<b>Figura 9.</b> Determinación de textura y color. (A y B) Análisis de Perfil de Textura; (C) Medición los parámetros cromáticos.....	28
<b>Figura 10.</b> Imagen de los extractos de AX.....	32
<b>Figura 11.</b> Imágenes de los panes elaborados. (A) Vista superior; (B) Vista lateral; (C) corte transversal a la pieza de pan para obtener la rebanada del centro. ....	41
<b>Figura 12.</b> Variación de las variables de textura, representada como porcentajes...	49
<b>Figura 13.</b> Imágenes del procedimiento para el análisis de imagen. (A) Imagen del centro de la rebanada; (B) Imagen con brillo y contraste ajustados; (C) Imagen 8-bit; (D) Imagen obtenida mediante la técnica del umbral para el conteo de las celdas...	51

## RESUMEN

El estudio se desarrolló en dos etapas: la extracción y caracterización de arabinoxilanos (AX) del salvado de trigo y su aplicación en pan blanco para evaluar su impacto en la reología de la masa y la calidad del producto final. Los AX se obtuvieron mediante un método alcalino con hidróxido de sodio, variando los tiempos de tratamiento, y se caracterizaron en términos de rendimiento, contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante. Posteriormente, se elaboraron panes con adiciones de AX al 1 y 2 %, evaluando propiedades físicas, textura, color, estructura de la miga, contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. Los resultados muestran que el tiempo de extracción de los AX influye en su funcionalidad y rendimiento. Los obtenidos en 1.5 h presentan la mayor capacidad antioxidante y contenido de fenoles, aunque con menor rendimiento; mientras que los de 4.5 h logran un balance entre alto rendimiento y buena funcionalidad. La incorporación de AX en la masa incrementó su capacidad de absorción de agua, alcanzando el máximo con AX de 4.5 h. Durante el horneado, los AX extraídos por tiempos prolongados y en bajas concentraciones mejoraron la retención de agua y estabilizaron la estructura del pan. Además, un mayor porcentaje de AX oscurece la corteza del pan y comprime la estructura de la miga, reduciendo la porosidad y el tamaño de las celdas. La adición de AX también favoreció la estabilidad de los parámetros texturales durante el almacenamiento y aumentó el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante del pan. Estos resultados sugieren que los AX son ingredientes funcionales prometedores para el desarrollo de productos panificados más nutritivos y con mayor vida útil.

## **ABSTRACT**

This study focused on extraction and characterization of arabinoxylans (AX) from wheat bran and its application in white bread to evaluate its impact on dough rheology and product final quality. AX was extracted using an alkaline sodium hydroxide method with varying treatment times, followed by characterization in terms of yield, total phenolic content and antioxidant capacity. White bread was then prepared with 1 and 2% AX additions, and its physical properties, texture, color, crumb structure, phenolic content and antioxidant capacity were analyzed. Results show that the extraction time significantly influences the functionality and yield of AX. AX extracted in 1.5 h showed the highest antioxidant capacity and phenolic content but lower yield, while AX extracted in 4.5 h achieved a best balance between high yield and functionality. Incorporating AX into the dough enhanced its water absorption capacity, with the highest values seen in AX extracted at 4.5 h. During baking, AX extracted for longer durations and at lower concentrations improved water retention and stabilized the bread's structure. Furthermore, higher AX concentrations darkened the bread crust and compressed the crumb structure, reducing porosity and cell size. AX also improved the stability of textural parameters during storage and increased the bread's phenolic content and antioxidant capacity. These findings underscore the potential of AX as functional ingredients for developing more nutritious and shelf-stable baked products.

## INTRODUCCIÓN

El hambre y la inseguridad alimentaria en el mundo presentan una tendencia al aumento (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2022). En el año 2021, el 41 % de la población mundial se encontraba en una situación de inseguridad alimentaria según cifras de la Food and Agriculture Organization (FAO). En América Latina y el Caribe se encuentra el 7.4 % de la población mundial que sufre hambre y se evidenció el aumento de la inseguridad alimentaria hasta alcanzar al 40.6 % de la población en la región (FAO, 2024).

El hambre y la malnutrición se convierten en personas con mayor probabilidad de padecer enfermedades. Anualmente fallecen 11 millones de personas a causa de dietas poco saludables (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2023). En 2020, se reportó que existían más de 3 mil millones de personas que no eran capaces de mantener una dieta saludable. Esta situación sólo podría empeorar teniendo en cuenta la tendencia mundial al incremento de los precios de los alimentos (FAO y OMS, 2020).

Antagónicamente, el volumen de desperdicio de alimentos a nivel global se estima en 1600 millones de toneladas en el equivalente de productos primarios. El despilfarro total de los alimentos para la parte comestible equivale a más de 1300 millones de ton. A su vez, estos desperdicios generan contaminación, daño al medio ambiente, consumo de agua y sobre precio del producto final (FAO, 2023).

La industria alimentaria genera una alta cantidad de subproductos que generalmente son desechados (Arciniegas-Cabrera, 2020; Garmendia-Belascoain, 2021). En México, cada año, el desperdicio de esta industria sobrepasa los 20 millones de ton. El correcto aprovechamiento de este volumen de producción podría contribuir a disminuir la inseguridad alimentaria del país, reducir la contaminación medioambiental, generar desarrollo económico, así como mejorar el bienestar social (Preciado-Saldaña *et al.*, 2022). Asimismo, estos subproductos que son desperdiciados podrían ser utilizados como materias primas económicas y fuente de compuestos bioactivos para emplearse en el desarrollo de nuevos y novedosos productos alimenticios asequibles de origen natural con propiedades funcionales y nutraceuticas (Aguiar y Cabadiana, 2022).

Como ejemplo de los desperdicios mencionados, considerado como una de las principales fuentes de nutrientes en el mundo y que por su alto consumo genera gran cantidad de subproductos, se encuentra el trigo (Hipolito y Caballero, 2022).

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cereales más cultivados en el mundo, superado sólo por el maíz y el arroz (Minta-Quiroga, 2024). Este cereal aporta el 20 % del total de las calorías requeridas a nivel mundial y hasta el 50 % en algunos países (Velasco *et al.*, 2022). El trigo se utiliza fundamentalmente para producir harinas, sémola y malta, que se emplean posteriormente para la fabricación de una gran variedad de alimentos tales como productos de panificación y repostería, bebidas, pastas y cereales para desayuno por solo citar algunos (Zingale *et al.*, 2023).

En la industria harinera del trigo los flujos de subproductos representan el 23-27 % de la producción, siendo el salvado de trigo el más significativo al constituir alrededor del 25 % del peso total del grano. Esto significa que, si se sometiera a molienda toda la producción mundial de trigo destinada al consumo humano, se tendrían aproximadamente 150 millones de ton de salvado de trigo anualmente (Prueckler *et al.*, 2014).

En México, el trigo es el segundo cereal en importancia en la dieta. En el año 2022, se produjeron 1,131,560 ton de salvado de trigo según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2023). Luego de la molienda para la obtención de harina y semolina, el salvado es recuperado como subproducto y sólo un 10 % se destina a la alimentación humana, el resto se envía a la alimentación animal (Chaquilla-Quilca *et al.*, 2018).

Se ha reportado que el salvado de trigo posee valores entre 15 y 30 % de polisacáridos complejos no almidonados de los denominados arabinosilanos (AX). El arabinosilano ferulado es un heteropolisacárido hemicelulósico no amiláceo que se encuentra fundamentalmente en las paredes celulares de algunos cereales como el trigo. Los AX se consideran un componente significativo de la fibra dietaria, principalmente fibra insoluble lignificada (Segovia-Huarcaya *et al.*, 2022). El ácido ferúlico representa el 90 % del total de polifenoles del salvado de trigo y se encuentra casi en su totalidad formando enlaces covalentes tipo éster con los AX (Ramos-Enríquez, 2019; Geyik *et al.*, 2023). La presencia de grupos funcionales ligados a los

AX hace que posean beneficios para la salud como mejorar el sistema inmunológico, regular el metabolismo de los lípidos y la glucosa, efectos antitumorales y antioxidantes (Zhu *et al.*, 2022). Estos compuestos hacen que este cereal se clasifique como alimento funcional a raíz de su efecto en la regulación del metabolismo de los carbohidratos y su bajo índice glucémico (González-Martínez, 2022).

Los AX han mostrado potencial para mejorar la calidad y favorecer la conservación de los productos horneados. Además, influyen notablemente en la calidad de prebióticos potenciales y la actividad hipoglucemiante y antioxidante de los productos de panificación fortificados con fibra (Wang *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2024).

La adición de AX puede mejorar el volumen del pan, la firmeza de la miga y mejorar la vida útil y la estabilidad de almacenamiento del pan al reducir el proceso de envejecimiento y retrogradación (Koegelenberg, 2016). También, presentan propiedades funcionales como el mejoramiento de la capacidad de absorción de agua de la masa, optimizando su desarrollo, rendimiento y el tiempo de estabilidad (Saeed, *et al.*, 2015). Además, confieren viscosidad y pueden aumentar la permeabilidad a los gases al proporcionar elasticidad a la película de proteínas que los rodea (Bieniek & Buksa, 2024).

Dado el panorama actual, es posible adoptar medidas para mitigar el impacto de la inaccesibilidad a alimentos saludables en la población más vulnerable. Una de las alternativas propuestas para abordar la escasez y el difícil acceso a alimentos nutritivos a nivel mundial es el aprovechamiento de subproductos de la agroindustria, en particular de la industria molinera del trigo. Esta estrategia no sólo podría contribuir a minimizar la crisis alimentaria, sino también a estimular la producción, el mercado y el consumo de alimentos más saludables y nutritivos, favoreciendo así la expansión de dietas más asequibles para quienes más lo necesitan. Por ello, el objetivo del presente trabajo es evaluar los AX del salvado de trigo como ingrediente funcional para mejorar las propiedades físicas y nutricionales de productos de panificación.

## **HIPÓTESIS**

La incorporación de arabinoxilanos ferulados extraídos del salvado de trigo, como ingrediente adicional, puede mejorar la calidad física y el valor nutricional de un producto de panificación.

## **OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo General**

Extraer y caracterizar arabinosilanos ferulados del salvado de trigo y evaluar su potencial como ingrediente funcional para mejorar las propiedades físicas y valor agregado de productos de panificación.

#### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Caracterizar los arabinosilanos extraídos del salvado de trigo.
- Determinar el tiempo óptimo del proceso de extracción para maximizar el rendimiento y la pureza.
- Incorporar los arabinosilanos extraídos en la formulación de un producto de panificación, evaluando su compatibilidad y funcionalidad.
- Evaluar la influencia de los arabinosilanos en la calidad reológica de las masas y las propiedades físicas del producto final.
- Determinar el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante del producto de panificación.

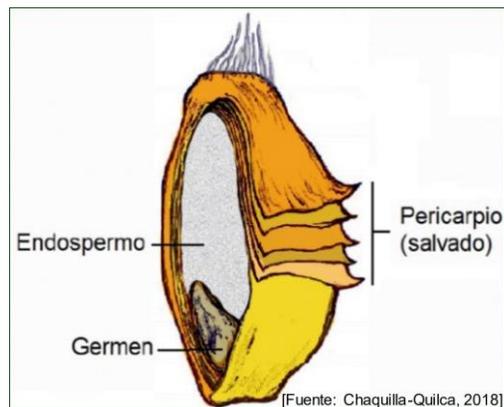
## REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Generalidades del Trigo

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cereales más cultivados en el mundo, superado sólo por el maíz y el arroz (Minta-Quiroga, 2024). Aporta el 20 % del total de las calorías requeridas a nivel mundial y hasta el 50 % en algunos países (Velasco *et al.*, 2022). Los principales productores a nivel mundial son China, India y Rusia. La producción de trigo al cierre del 2023 superó los 785 millones de ton cosechadas según los datos estadísticos de la FAO, 2024.

En México, es el segundo cereal en importancia, constituye alrededor del 21 % de los granos más demandados, con un consumo per cápita de 57 kg al año (Villaseñor-Mir *et al.*, 2024). Sonora, Guanajuato y Baja California representaron el 67 % de la superficie sembrada en 2021 (567 mil ha) según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022).

La estructura del grano de trigo (Figura 1) es fundamental para su función biológica y su procesamiento industrial (Rosa-Sibakov *et al.*, 2015). El pericarpio proporciona protección, el endospermo suministra energía, y el germen es esencial para la reproducción (Zhong *et al.*, 2023). Estos componentes no solo determinan la calidad del grano para el consumo humano, sino que también influyen en su procesamiento y utilización en la industria alimentaria.



**Figura 1.** Estructura del grano de trigo.

El trigo se utiliza fundamentalmente para producir harinas, sémola y malta, que se emplean posteriormente para la fabricación de una gran variedad de alimentos tales como productos de panificación y repostería, bebidas, pastas y cereales para desayuno por sólo citar algunos. Tanto el trigo como sus derivados presentan un alto valor nutritivo, son fuente importante de energía, proteína, vitaminas y minerales (Cuba-Cuba y Huicho-Miguel, 2024).

## **2.2 Salvado de Trigo como Subproducto de la Industrialización del Trigo**

El salvado de trigo constituye aproximadamente el 25% del peso del trigo molido y se produce en grandes cantidades anualmente, estimándose en 150 millones de toneladas a nivel mundial (Prueckler *et al.*, 2014; Katilevičiūtė *et al.*, 2019). Después de la molienda para producir harina y sémola, el salvado se recupera como un subproducto. Solo el 10 % de este se destina al consumo humano, mientras que el resto se utiliza en la alimentación animal (Balandrán-Quintana *et al.*, 2015; Chaquilla-Quilca *et al.*, 2018).

El salvado de trigo puede ser utilizado como un relleno mejorador en materiales compuestos basados en micelio, mejorando sus propiedades mecánicas y reduciendo el tiempo de producción (Sisti *et al.*, 2021). Algunos nanomateriales funcionales se han desarrollado a partir de AX derivados del salvado de trigo, que pueden ser utilizados para la entrega de ácidos nucleicos en el sector agroquímico (Sarker *et al.*, 2020).

Puede ser utilizado como sustrato para la producción de enzimas, ácidos orgánicos y otros productos biotecnológicos debido a su bajo costo y composición variada (Wolters *et al.*, 2016; Katilevičiūtė *et al.*, 2019). La hidrólisis de almidón de salvado y el pretratamiento alcalino pueden aumentar la concentración de azúcares fermentables, lo que es útil para la producción de biocombustibles (Zhao *et al.*, 2020).

El salvado de trigo es rico en fibras, minerales y antioxidantes, incluyendo ácidos fenólicos que pueden prevenir enfermedades cardíacas y cáncer de colon, además de tener propiedades antiinflamatorias (Laddomada *et al.*, 2015). A pesar de sus beneficios, la incorporación en productos alimenticios puede afectar negativamente su proceso de producción y calidad organoléptica (Hemdane *et al.*, 2016). La investigación continúa explorando métodos para mejorar su funcionalidad y ampliar

sus aplicaciones, promoviendo un enfoque sostenible y de valor añadido para este subproducto agrícola.

### **2.2.1 Composición Química**

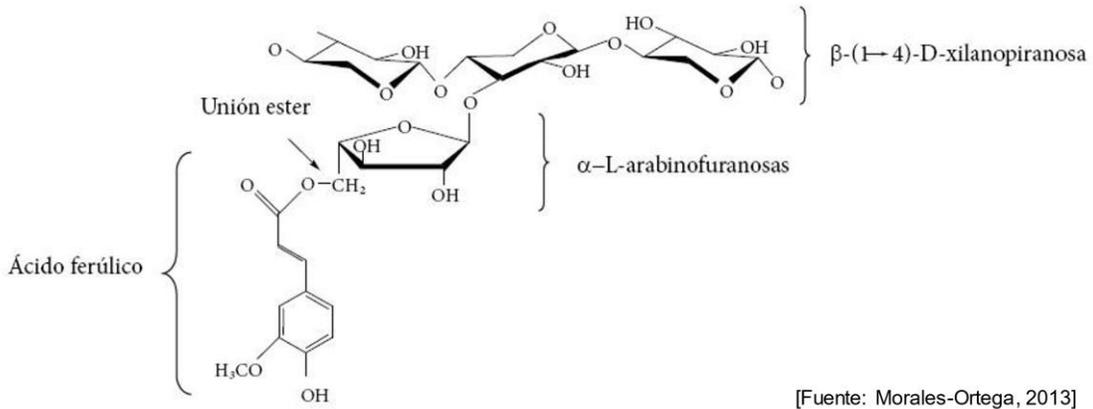
El grano de trigo es rico en compuestos bioactivos, micronutrientes y fitoquímicos, de los cuales una importante cantidad se encuentra concentrada en las fracciones de salvado, que representa entre el 14 % y 16 % del peso del grano. El salvado de trigo está compuesto por: 55-60 % de carbohidratos no almidonados, 14-25 % de almidón, 13-18 % de proteínas, 3-8 % de minerales y 3-4 % de grasas, en base seca (Katilevičiūtė *et al.*, 2019).

El salvado de trigo contiene más del 15 % de proteínas de alta calidad, aunque su digestibilidad es limitada debido a su encapsulación en una matriz de polisacáridos de la pared celular (Balandrán-Quintana *et al.*, 2015).

Aproximadamente el 15-30 % del salvado de trigo puede estar conformado por un heteropolisacárido hemicelulósico no amiláceo denominado arabinoxilano (AX) (Demuth *et al.*, 2020, Liu *et al.*, 2020). Estos polisacáridos complejos, presentes en las paredes celulares de algunos cereales, son una fuente significativa de fibra dietética, principalmente insoluble. El ácido ferúlico representa el 90 % del total de polifenoles del salvado de trigo y se encuentra casi en su totalidad formando enlaces covalentes tipo éster con los AX (Ramos-Enríquez, 2019; Geyik *et al.*, 2023).

Los AX ferulados tienen una estructura compleja (Figura 2) que incluye una columna vertebral de xilopiranososa con sustituciones de arabinofuranosa, que a su vez pueden estar esterificadas con ácido ferúlico (Lin *et al.*, 2021; Marquez-Escalante *et al.*, 2023). La ferulación de los AX les confiere propiedades antioxidantes y la capacidad de formar geles covalentes, lo que los hace interesantes para aplicaciones en alimentos y otros campos (Hussain *et al.*, 2022).

El contenido de ácido ferúlico en los AX varía según la fuente y el método de extracción, afectando sus propiedades estructurales y funcionales. Pueden contener monómeros, dímeros (di-FA) y trímeros (tri-FA) de ácido ferúlico (Herrera-Balandrano *et al.*, 2019).



**Figura 2.** Estructura química de una fracción de arabinoxilano ferulado

### 2.3 Fibra Dietética Soluble e Insoluble

La American Association of Cereal Chemists (AACC) define la fibra dietética como la parte comestible de las plantas o hidratos de carbono análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso (AACC, 2001).

Según el Codex Alimentarius (2010), la fibra dietética consiste en polímeros de carbohidratos con diez o más unidades monoméricas, que no son hidrolizados por enzimas endógenas en el intestino delgado de los seres humanos y que pertenecen a las siguientes categorías: polímeros de carbohidratos comestibles que se producen naturalmente en los alimentos, polímeros de carbohidratos que se han obtenido de materia prima alimenticia por medios físicos, enzimáticos o químicos que poseen algún efecto fisiológico beneficioso para la salud, polímeros de carbohidratos sintéticos con algún efecto fisiológico beneficioso para la salud.

La fibra dietética es un ingrediente importante de la nueva generación de los productos saludables y aumenta el valor nutricional de los alimentos (Fuentes-Berrio *et al.*, 2015; Meléndez-Sosa *et al.*, 2020; Ordaz-Rodríguez *et al.*, 2022). El consumo de un alto nivel de alimentos con fibra dietética tiene una serie de efectos fisiológicos importantes en los seres humanos y se ha asociado con la prevención de varias enfermedades (Arroyo, 2016; Bernal-Castro *et al.*, 2017).

Estos materiales pueden participar en la regulación de la motilidad gastrointestinal, influenciar el metabolismo de la glucosa y los lípidos, promover la producción fecal, estimular la actividad metabólica bacteriana, desintoxicar los contenidos lumbinales del colon y contribuir al mantenimiento del equilibrio del ecosistema del colon y la integridad de la mucosa intestinal (Mosińska *et al.*, 2019; Gill *et al.*, 2021; Katsirma *et al.*, 2021). La fibra soluble retrasa el vaciamiento gástrico, disminuye la absorción de glucosa, mejora la función inmunológica, reduce los niveles de colesterol en suero y ayuda a reducir el riesgo de ataque cardíaco y cáncer de colon. Los efectos de la fibra insoluble se pueden atribuir en gran medida a su capacidad de retención de agua y su capacidad para actuar como un agente de carga en el intestino posterior (Farooqui, 2015; Mudgil, 2017; Thilagavathi, 2020; Nweze *et al.*, 2021)

#### **2.4 Compuestos Fenólicos Libres y Ligados**

Los compuestos fenólicos son un grupo de sustancias orgánicas que se caracterizan por tener uno o más grupos hidroxilos unidos a un anillo aromático, que puede ser un compuesto por sí mismo o un componente de un compuesto de anillo heterocíclico (Lee *et al.*, 2024). Se encuentran en formas libres y ligadas en cereales y otros alimentos vegetales. La mayoría de los compuestos fenólicos en los cereales están en forma ligada, lo que significa que principalmente se encuentran unidos a la pared celular (Oracz *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2021).

La extracción de compuestos fenólicos libres y ligados puede realizarse mediante métodos químicos, biológicos y físicos. Los métodos de extracción con solventes acuosos de acetona y etanol son efectivos para extraer compuestos fenólicos libres mientras que la hidrólisis alcalina y ácida son métodos comunes para liberar compuestos fenólicos ligados (Wang *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022).

Los compuestos fenólicos, tanto libres como ligados, exhiben significativas capacidades antioxidantes (Wang *et al.*, 2021). Los compuestos fenólicos libres suelen mostrar una mayor actividad antioxidante en comparación con los ligados, sin embargo, está correlacionada con su contenido total en los alimentos, siendo los compuestos fenólicos ligados una fuente importante de antioxidantes en algunos casos

(Prakash *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020).

Los compuestos fenólicos desempeñan un papel crucial en la prevención de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo gracias a sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Kumar & Goel, 2019; Rudrapal *et al.*, 2022; Matsumura *et al.*, 2023). Además, su capacidad para mejorar la estabilidad y calidad de los alimentos los hace valiosos en la industria alimentaria (Shahidi *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2022).

## 2.5 Polisacáridos y Oligosacáridos

Los polisacáridos y oligosacáridos son tipos de carbohidratos que juegan roles importantes en la biología y la nutrición. Los polisacáridos son cadenas largas de monosacáridos, mientras que los oligosacáridos son cadenas cortas de monosacáridos (Delbianco *et al.*, 2018; Amicucci *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021).

Los poli y oligosacáridos exhiben una amplia diversidad de características estructurales en cuanto a composición de sus monosacáridos, grado de ramificación, configuración del enlace glucosídico ( $\alpha$  o  $\beta$ ) y peso molecular. Las propiedades estructurales determinan a su vez las propiedades funcionales de cada molécula y sus variadas aplicaciones en la industria alimentaria (Guo *et al.*, 2018). Ambos tipos de carbohidratos tienen aplicaciones potenciales en la industria alimentaria como nuevos alimentos funcionales o aditivos alimentarios (Ning *et al.*, 2022).

## 2.6 Arabinoxilanos Extraíbles y No Extraíbles en Agua

El AX ferulado es un heteropolisacárido hemicelulósico no amiláceo que se encuentra fundamentalmente en la pared celular de algunos cereales como el trigo, la cebada y el maíz. Los AX están compuestos principalmente por dos monosacáridos: arabinosa y xilosa (Viëtor *et al.*, 1992; Guo *et al.*, 2019). Los AX consisten en una cadena principal de xilosa lineal unida por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) con unidades de  $\alpha$ -L-arabinofuranosa unidas como cadenas laterales a través de enlaces  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 3) y/o  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 2). Las unidades de xilosa pueden estar no sustituidas, mono-sustituidas o di-sustituidas, lo que afecta sus propiedades físicas y químicas. Esta estructura puede variar significativamente según la fuente del cereal y el método de extracción

(Izydorczyk & Biliaderis, 1995; Wang *et al.*, 2020; He *et al.*, 2021).

La composición de los AX varía significativamente entre diferentes fuentes de cereales, en el Cuadro 1 se muestra una recopilación de algunos de ellos.

**Cuadro 1.** Características de AX obtenidos de diferentes fuentes

Fuente	Proceso de extracción	Rendimiento	Peso molecular	Ara/Xyl	Referencia
Semolina de trigo <i>Durum</i> (WEAX)	Incubación con R-amilasa (10 mL); 90 °C; 4 h	0.28 %		0.42-0.80	Roels <i>et al.</i> , 1999
Harina de trigo			134.700-201.600 Da	WEAX: 0.47-0.58 WUAX: 0.51-0.67	Ordaz-Ortíz <i>et al.</i> , 2005 Hernández-Espinosa <i>et al.</i> , 2020
Salvado de trigo	KOH al 24 % + 1 % NaBH <sub>4</sub> ; 3 h	6.8 % (p/p)	580.000 - 800.000 kDa	0.2-1.3	De Man <i>et al.</i> , 2022 Li <i>et al.</i> , 2016
Malta de trigo (WEAX)	Etanol 800 mL L <sup>-1</sup> ; 2 h (1:5 p/v)		1.24×10 <sup>4</sup> -2.90×10 <sup>4</sup> Da	0.55-0.62	Guo <i>et al.</i> , 2014
Centeno			40.000–900.000 g mol <sup>-1</sup>	0.55-0.79	Vinkx <i>et al.</i> , 1995 Andersson <i>et al.</i> , 2009
Salvado de cebada	NaOH 0.375 M; 3h; 55 °C	14.31±0.06 % (p/p)	298.36 kDa	0.81	Guo <i>et al.</i> , 2019
Salvado de maíz nixtamalizado	NaOH 0.5 N; 37 °C	4.89, 8.23 y 7.17 % por 2, 4 y 6 h	674 kDa	0.82-0.87	Herrera-Balandrano <i>et al.</i> , 2018 Marquez-Escalante <i>et al.</i> , 2023

WEAX = AX extraíbles en agua. WUAX = AX no extraíbles en agua.

El peso molecular de los AX puede variar significativamente, lo que influye en sus propiedades funcionales. Por ejemplo, en el salvado de trigo, los AX con relaciones de

arabinosa a xilosa (Ara/Xyl) más altas tienden a tener pesos moleculares más bajos (Maes & Delcour, 2002). El grado y el patrón de sustitución de arabinosa a lo largo de la cadena de xilosa difieren, lo que afecta la masa molecular, el grado de ramificación y la presencia de ácido ferúlico. Estas variaciones contribuyen a la heterogeneidad estructural de los AX (Wang *et al.*, 2020; He *et al.*, 2021).

La heterogeneidad estructural de los AX se caracteriza por variaciones en la proporción Ara/Xyl, el patrón de sustitución de la arabinosa, el contenido de grupos ferúlicos y el tamaño molecular. Estas características influyen en las propiedades fisicoquímicas, como la solubilidad, la viscosidad y el potencial de gelificación (Marcotuli *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2020). La relación Ara/Xyl influye en las propiedades reológicas de los geles AX. Valores de Ara/Xyl más bajos mejoran la agregación de las cadenas AX, lo que aumenta el contenido de dímeros de ácido ferúlico y mejora las características reológicas y microestructurales del gel (Marquez-Escalante *et al.*, 2018).

La masa molecular y el contenido de ácido ferúlico unido son cruciales para las propiedades antioxidantes de los AX. El ácido ferúlico es el principal responsable de la capacidad antioxidante, mientras que la masa molecular influye en la solubilidad y otras propiedades fisicoquímicas (Marcotuli *et al.*, 2016).

La variabilidad del peso molecular y su impacto en las propiedades funcionales hacen que los AX sean adecuados para diversas aplicaciones en las industrias alimentaria. Por ejemplo, los AX de alto peso molecular podrían utilizarse por sus propiedades reológicas, mientras que los de menor peso molecular podrían ser los preferidos para aplicaciones que requieren solubilidad y bioactividad (Warrand *et al.*, 2005; Kale *et al.*, 2018). Comprender la relación entre el peso molecular y las propiedades funcionales puede orientar la selección y modificación de los AX para aplicaciones industriales específicas, como mejorar la textura y la estabilidad de los productos alimenticios o aumentar la biodisponibilidad de las formulaciones (Rattan *et al.*, 1994; Li *et al.*, 2016).

Los AX se pueden clasificar según su solubilidad en formas extraíbles en agua (WEAX) y no extraíbles en agua (WUAX). La solubilidad y las propiedades

estructurales están influenciadas por la fuente de grano y los métodos de procesamiento, como la molienda y la extrusión (Demuth *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2024). El WEAX representa una pequeña porción del salvado de trigo, encontrándose en una proporción de aproximadamente el 6 % del contenido total de arabinosilanos (Nishitsuji *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2022). Debido a su débil interacción con los componentes de la pared celular del cereal, es soluble en agua a temperatura ambiente o menor a 40 °C. Por otro lado, el WUAX se encuentra unido fuertemente a la pared celular, por lo que para su extracción hay que aplicar hidrólisis con ácidos o álcalis a temperaturas elevadas. Se localizan en la capa aleurona y pericarpio, esta última concentra el mayor contenido entre 20 y 30 % (p/p) (Liu *et al.*, 2020). Otros autores reportan cifras de entre 10.9 y 26 % para los AX presentes en el salvado de trigo (Sánchez y Alonso, 2018).

Los AX se consideran un componente significativo de la fibra dietaria (Segovia-Huarcaya *et al.*, 2022). La presencia de grupos funcionales ligados a los arabinosilanos hace que posean beneficios para la salud como mejorar el sistema inmunológico, regular el metabolismo de los lípidos y la glucosa, efectos antitumorales y antioxidantes (Zhu *et al.*, 2022).

## **2.7 Tendencias en el Consumo de Alimentos Saludables**

En la actualidad, los consumidores están siendo más conscientes de que una alimentación sana y un estilo de vida saludable es lo que se requiere para alargar la vida y aumentar la calidad de vida del hombre (Küster-Boluda & Vidal-Capilla, 2017). Asimismo, los medios de comunicación y las campañas publicitarias aportan elementos interesantes y esto se traduce en que las personas cada día se preocupen más por su salud (de Vries *et al.*, 2018; Samoggia & Riedel, 2020; Yan *et al.*, 2021). Con lo cual, las personas son más exigentes y ya demandan alimentos sanos, saludables, funcionales, con beneficios importantes a su salud y no solo se preocupan por comer por placer (Polizzi *et al.*, 2020; Topolska *et al.*, 2021).

En este sentido la industria de alimentos ha respondido de manera positiva a esta nueva demanda y la industria de productos horneados también ha sido consecuente

con las nuevas exigencias de los consumidores (Birch & Bonwick, 2019; Guiné *et al.*, 2020). Para obtener una ventaja competitiva en el mercado, los fabricantes de panadería adaptaron adecuadamente sus productos alimenticios y los productores han alineado la oferta en función de las preferencias de los consumidores en evolución (Fidalgo & Miranda, 2023; Nicolosi *et al.*, 2023).

El mercado de panadería y pastelería ha experimentado un cambio significativo hacia productos centrados en la salud y el bienestar. Este cambio se ha manifestado en estrategias dobles basadas en reclamos de salud o nutricionales, con un enfoque en la reducción de ingredientes no saludables y la inclusión de componentes beneficiosos para la salud (Miteluț *et al.*, 2021; Novikova *et al.*, 2021; Shakhray *et al.*, 2021; Mickiewicz & Britchenko, 2022).

Hoy en día existen dos razones fundamentales para agregar fibra a los productos horneados: una dieta saludable, debido al aumento en la ingesta de fibra dietética y la disminución en la densidad calórica de los productos horneados, y los beneficios ambientales obtenidos al utilizar los residuos de fibra del procesamiento de algunos alimentos (Królak *et al.*, 2022).

El desarrollo de productos innovadores con alto valor nutricional y beneficios ambientales se ha difundido actualmente en el mundo de los productos horneados. En el Cuadro 2 se recopilan ejemplos de algunos productos desarrollados utilizando diferentes fuentes de fibra dietética, así como los aspectos generales de su elaboración y las principales modificaciones observadas en los parámetros de calidad.

**Cuadro 2.** Uso de fibra dietética en panificación.

<b>Fuente de fibra</b>	<b>Producto</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados generales</b>	<b>Referencia</b>
<i>Cascarilla del café</i>	Pan	Adición de la fibra en 0, 1, 2.5 y 5 %.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de la fibra dietética total, mayormente la insoluble.</li> <li>• Aumento de la actividad antioxidante del pan.</li> <li>• Aumento del color del pan, sin efecto en la dureza.</li> </ul>	Rizkaprilisa, <i>et al.</i> , 2023
<i>Harina de malanga y salvado de arroz</i>	Pan	Proporción de harina de trigo, harina de malanga y salvado de arroz 65:30:5; 65:25:10; y 65:20:15.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El salvado de arroz disminuye los parámetros brillo y la cromaticidad en la corteza y la miga, la cromaticidad en la corteza y el tono así como la aceptación sensorial (color, aroma, sabor y textura).</li> <li>• Aumenta la densidad aparente de la masa, la densidad del pan y la cromaticidad a* de la miga.</li> </ul>	Nurtiana <i>et al.</i> , 2023
<i>Albedo de pomelo</i>	Pan	La fibra dietética extraída del pomelo se adicionó a la formulación del pan en rangos del 1 al 5 %.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El pan con 1 % no mostró diferencias significativas en el volumen específico respecto al control.</li> <li>• Al aumentar el porcentaje de fibra aumentó la firmeza y la elasticidad relativa de la miga.</li> <li>• No se observó efectos sobre la porosidad de la miga.</li> </ul>	Phimolsiripol & Schönlechner, 2023
<i>Tamarillo</i>	Pan al vapor	El tamarillo se secó por liofilización y el polvo se empleó para remplazar el 5, 10, 15 y 20 % (p/p) de la harina de la fórmula.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El peso no varió significativamente.</li> <li>• Las dimensiones (largo, ancho, alto, proporción de extensión, volumen y volumen específico) disminuyeron al aumentar nivel de polvo de tamarillo.</li> <li>• Aumentó la dureza, la firmeza, la gomosidad y la masticabilidad, mientras que disminuyó la cohesividad la elasticidad, la resiliencia de los panes.</li> <li>• Las puntuaciones en la evaluación sensorial de los panes con 15 % y 20 % fueron inferiores al resto.</li> </ul>	Syu <i>et al.</i> , 2023
<i>Piel de avellana</i>	Pan de masa agria	La harina de trigo se sustituyó por piel de avellana en 5 y 10 %.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento gradual en el contenido de fibra dietética del pan.</li> <li>• Aumento del contenido de compuestos fenólicos.</li> </ul>	Durmus <i>et al.</i> , 2023
<i>Maní de bambara</i>	Pan	Sustitución de la harina de trigo en niveles (p/p) de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 %.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los tratamientos del 20 al 30 % afectaron el volumen específico del pan</li> <li>• Incrementó la humedad, dureza, masticabilidad y disminuyó la cohesión y elasticidad.</li> <li>• Se observó un efecto de oscurecimiento sobre el color de la miga y la corteza, siendo más pronunciado en la corteza.</li> <li>• Hasta el 20 % de sustitución el pan fue aceptable con buenos atributos sensoriales comparables.</li> </ul>	Chinma <i>et al.</i> , 2023

## **2.8 Uso de AX como Ingrediente Alimenticio**

Los AX son fibras dietéticas con una estructura química que les confiere una variedad de beneficios para la salud y funcionalidades en los sistemas alimentarios (Zannini *et al.*, 2022; Tse & Schendel, 2023). Los métodos de extracción y procesamiento afectan las propiedades funcionales de los arabinosilanos AX. La elección del método influye en el rendimiento, pureza y propiedades de los AX, destacando la importancia de seleccionar el más adecuado para optimizar sus características (Chen *et al.*, 2019; Yilmaz-Turan *et al.*, 2020; He *et al.*, 2021).

Los AX se han utilizado como estabilizantes, texturizantes y estructurantes en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Kamel *et al.*, 2020). Se utilizan como agentes antioxidantes naturales en la industria alimentaria debido a su capacidad de quelar iones de hierro y su actividad de eliminación de radicales libres (Maity *et al.*, 2019). Los AX insolubles tienen una alta capacidad de retención de agua, lo que los hace útiles como agentes de manejo de humedad y texturizantes en diversos sistemas alimentarios (Yadav *et al.*, 2017). Los AX ferulados tienen la capacidad única de formar geles covalentes en presencia de agentes generadores de radicales libres, lo que les confiere estabilidad a cambios de pH y concentración de electrolitos (Niño-Medina *et al.*, 2010).

Los AX pueden afectar positivamente la eficiencia del proceso y la calidad del producto en la producción de alimentos y bebidas fermentadas como el pan, la cerveza y los licores (Tse & Schendel, 2023). Además, se utilizan para desarrollar películas y recubrimientos comestibles, mejorando propiedades como la permeabilidad al vapor de agua y la hidrofobicidad de la superficie (Ghiasi *et al.*, 2020).

### **2.8.1 Uso de AX en Panificación**

Los AX han mostrado potencial para mejorar la calidad de los productos horneados y la prolongación de la vida útil del pan al reducir el proceso de envejecimiento y retrogradación. Presentan propiedades funcionales como el mejoramiento de la capacidad de absorción de agua de la masa, optimizando su desarrollo y el tiempo de estabilidad (Saeed, *et al.*, 2015). Además, confieren viscosidad y pueden aumentar la permeabilidad a los gases al proporcionar elasticidad

a la película de proteínas que los rodea. Pueden mejorar el volumen del pan, la firmeza de la miga y mejorar la vida útil y la estabilidad de almacenamiento del pan (Koegelenberg, 2016; Saeed, *et al.*, 2016)

Saeed, *et al.* (2015) evaluaron los efectos de la adición de AX extraídos de la harina de trigo en la textura del pan en niveles entre 0.5 y 1 %. El aumento del porcentaje de AX en la fórmula causó una disminución en la dureza del pan y un aumento de la fracturabilidad y gomosidad, dichos parámetros presentaron un comportamiento inverso durante el almacenamiento del pan.

El AX extraído del salvado de trigo tiene potencial como sustituto parcial de la harina en la industria panificadora. La adición AX y la eliminación de harina en ciertos niveles permite mantener propiedades similares en el peso y volumen final del pan, marcándose la principal diferencia física en un aumento del color (Koegelenberg, 2016).

Las características estructurales de los AX, tales como peso molecular, grado de ramificación, la porción de proteína unida a su estructura y el contenido de ácido ferúlico, influyen notablemente en la calidad prebiótica y la actividad hipoglucemiante del pan fortificado con fibra (Wang *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2024).

La capacidad de absorción de agua de las mezclas para hornear y el rendimiento de la masa se incrementa significativamente a medida que aumenta la masa molar de los AX añadidos (Bieniek & Buksa, 2024), demostraron que los AX tienen un efecto bajo y no concluyente sobre la pérdida de peso durante el horneado y el contenido de humedad del pan rallado.

Los arabinosilanos de la harina de trigo cambian drásticamente durante las primeras etapas del proceso de elaboración del pan, mezclado y fermentación, se ha observado que los WEAX y WUAX ejercen diferentes efectos sobre la masa y la calidad de horneado y del pan (Nishitsuji *et al.*, 2020).

En panes cocidos al vapor, los WEAX afectan el comportamiento de la gelatinización y retrogradación del almidón en la masa e inhiben parcialmente la polimerización del gluten durante la cocción, lo cual contribuye a mejorar la calidad del pan observándose un aumento del volumen final y una textura más suave (Wang *et al.*, 2019).

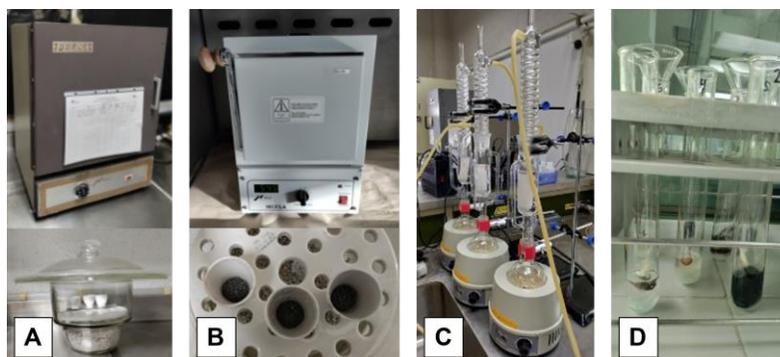
## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Localización del Estudio

El experimento se realizó en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), en el Centro de Investigación y Desarrollo en Industrias Alimentarias (CIDIA) y en el Laboratorio de Química y Bioquímica de la misma Facultad. El trabajo se desarrolló en dos etapas fundamentales. Durante la primera etapa se realizó la extracción de los AX del salvado de trigo y se caracterizaron los extractos obtenidos. En la segunda etapa se aplicaron dichos extractos en un pan blanco y se evaluaron las características fisicoquímicas del producto.

### 3.2 Caracterización del Salvado de Trigo

El análisis bromatológico de la muestra de salvado de trigo se llevó a cabo según los métodos oficiales reportados por la AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Se determinó humedad (método 925.09), grasa (método 923.03), cenizas (método 925.10), proteína cruda (método 960.52) y fibra bruta (método 920.86). El contenido de fenoles totales se evaluó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Rodríguez-Salinas *et al.*, 2020) y la capacidad antioxidante de la muestra mediante ensayos de capacidad de inhibición del radical ABTS (2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico ácido) y capacidad de inhibición del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) (Rodríguez-Salinas *et al.* 2019).



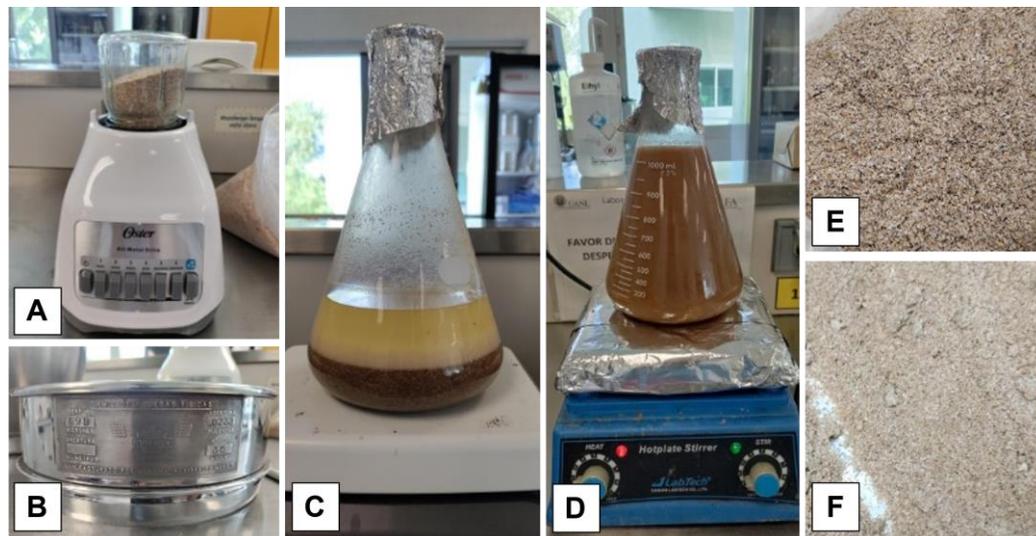
[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 3.** Análisis bromatológicos. (A) Determinación de humedad; (B) Determinación de cenizas; (C) Determinación de grasas y (D) Determinación de nitrógeno.

### 3.3 Proceso de Extracción de los Arabinosilanos

#### 3.3.1 Pretratamiento del Salvado de Trigo

El salvado de trigo se trituró en un procesador de alimentos Oster aplicando tres pulsos de 15 s cada uno y se tamizó a través de una malla 30 (0.595 mm) para obtener un tamaño de partícula homogéneo (Demuth *et al.*, 2020). De la harina obtenida, se tomaron 100 g y se suspendieron en 500 mL de etanol al 96 % durante 24 h a 25 °C bajo agitación continua para eliminar los componentes lipofílicos. El salvado se recuperó por filtración y se secó (Liu *et al.*, 2020). Posteriormente se suspendió en agua en una proporción salvado de trigo (g) - agua (mL) de 1:10 (p/v) y se mantuvo a 80 °C durante 45 min para descartar el almidón restante según lo propuesto por Khalighi *et al.* (2019) con algunas modificaciones. Finalmente, se filtró y se secó en horno a 50 °C durante 24 h.



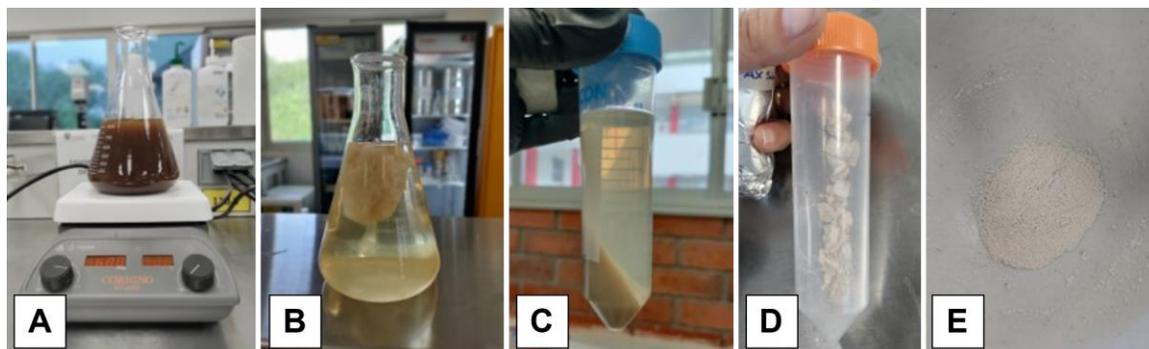
[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 4.** Pretratamiento del salvado de trigo. (A) Molienda; (B) Tamizado; (C) Desgrasado; (D) Desalmidonado; (E) Salvado antes del tratamiento y (F) Salvado sin grasa y sin almidón.

#### 3.3.2 Extracción de los AX

La extracción alcalina se aplicó empleando hidróxido de sodio (NaOH) 0.5 N en una proporción de salvado (g) - reactivo (mL) de 1:40 (p/v) en agitación continua a 25 °C. Los tiempos de extracción fueron 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 h. El salvado residual se eliminó por filtración y el sobrenadante se ajustó a pH 4 con ácido clorhídrico (HCl) 3 N, luego

se centrifugó a 6000 rpm y 20 °C durante 15 min (centrífuga HERMLE Z 400 K, Universal Laboratory Centrifuge, Labnet). El sobrenadante recuperado se precipitó con etanol al 65 % (v/v) a 4 °C durante 12 horas. El precipitado se recuperó y se secó por liofilización (liofilizador FreeZone 4.5 Freeze Dry System, Labconco Corporation). Posteriormente se trituró para obtener el extracto de AX en forma de polvo (Berlanga-Reyes *et al.*, 2011, Liu *et al.*, 2020, Raza *et al.*, 2022).



[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 5.** Obtención de los AX. (A) Extracción con NaOH; (B) AX precipitados con etanol; (C) Separación mediante centrifugación; (D) AX liofilizados; (E) Extracto de AX.

### 3.4 Rendimiento del Proceso de Extracción

El polvo de AX obtenido luego de la liofilización se pesó y el rendimiento se expresó en porcentaje (%) como gramos de AX por 100 g de salvado de trigo.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{AX (g)}}{\text{Salvado de trigo (g)}} \times 100$$

### 3.5 Caracterización de los Extractos de AX

#### 3.5.1 Extracción de Compuestos Fenólicos

Los compuestos fenólicos se extrajeron según Niño-Medina *et al.* (2017) con algunas modificaciones. Los compuestos fenólicos libres se extrajeron al suspender 0.1 g de muestra en 5 mL de metanol al 80 %, se purgó durante 30 s con argón y se agitó durante 2 h. Luego se centrifugó a 4000 rpm, se recuperó el sobrenadante y se almacenó a -20 °C. Al residuo sólido se agregó 5 mL de NaOH 2 M y se mantuvo

durante 2 h en agitación para extraer los compuestos fenólicos ligados. Posteriormente, el pH de la muestra se ajustó a 2.5 con HCl concentrado y se extrajeron los compuestos fenólicos con 10 mL de acetato de etilo dos veces. Los extractos de acetato de etilo se combinaron, se evaporaron hasta sequedad en un rotavapor (Yamato RE200, Baño de agua BM200) y luego se disolvió la muestra en 5 mL de metanol al 80 %.

### **3.5.2 Determinación de Fenoles Totales**

El contenido de fenoles totales se determinó empleando el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu según Rodríguez-Salinas *et al.* (2020) con algunas modificaciones. Brevemente, se pesaron 5 mg de ácido ferúlico, se agregaron a un matraz aforado de 25 mL y se disolvió en metanol al 80% hasta completar la solución. La curva de calibración para ácido ferúlico se realizó diluyendo la solución estándar en 0 - 200 mg L<sup>-1</sup> de ferúlico. Se agregaron 0.2 mL de cada muestra a un tubo de ensayo con 2.6 mL de agua destilada, 0.2 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu y 2 mL de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) al 7 %. Los tubos se dejaron reposar durante 90 min a temperatura ambiente (25 °C) y en oscuridad. La absorbancia se midió a una longitud de onda de 750 nm empleando un espectrofotómetro (Barnstead Turner SP-830 Plus) UV-Visible de haz único. Las muestras se prepararon por triplicado y se registraron los valores medios de absorbancia. Los resultados se expresaron como miligramos de ácido ferúlico equivalentes por 100 g de muestra (mgFAE/100 g).

### **3.5.3 Capacidad Antioxidante**

La capacidad antioxidante de los extractos de AX se evaluó mediante ensayos de capacidad de inhibición del radical ABTS (2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico ácido), poder antioxidante reductor del hierro (FRAP) y capacidad de inhibición del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) según lo descrito por Rodríguez-Salinas *et al.* (2019) con algunas modificaciones.

DPPH se evaluó empleando una solución de trabajo 60 µM con una absorbancia ajustada a 1.0 a una longitud de onda de 517 nm. Se mezcló 0.1 mL de la muestra con 3 mL de la solución de trabajo de DPPH, se dejó reaccionar durante 30 min en

oscuridad y se midió la absorbancia.

El ensayo ABTS se realizó utilizando una solución de trabajo que se obtuvo mezclando 1 mL de ABTS 7.4 mM y 1 ml de persulfato de potasio ( $K_2S_2O_8$ ) 2.6 mM y dejándolos reaccionar durante 12 h en la oscuridad. Luego la absorbancia de la solución de trabajo se ajustó a 1.0 a una longitud de onda de 734 nm diluyendo con metanol al 80 %. Se mezcló 0.1 mL de la muestra con 3 mL de la solución de trabajo ABTS, se dejó reaccionar durante 30 min en la oscuridad y luego se midió la absorbancia.

El FRAP se determinó utilizando una solución preparada mezclando acetato de sodio ( $C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$ ) 300 mM (pH 3.6), TPTZ (2,4,6-tripiridilo-s-triazina) 10 mM en HCl 40 mM y cloruro de hierro (III) hexahidratado ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) 20 mM en proporción 10:1:1. El ensayo FRAP se preparó mezclando 0.1 mL de la muestra con 3 mL de la solución de trabajo de FRAP, se dejó reaccionar durante 30 min en la oscuridad a 37 °C y se midió la absorbancia a la longitud de onda de 593 nm.

Para todos los ensayos se empleó Trolox como estándar para las curvas de calibración (0 a 500  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ). Los resultados se expresaron como micromoles de Trolox equivalentes por 100 g de muestra ( $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$ ).

### 3.6 Elaboración del Pan

Los AX se añadieron junto con los ingredientes secos en proporciones del 1 y 2 % tomando como referencia 120 g de masa elaborada según la formulación del Cuadro 3, basada en lo reportado por Herrera-Balandrano (2019).

**Cuadro 3.** Fórmula empleada en la elaboración del pan blanco.

Ingrediente	Cantidad (%)
<i>Harina de trigo</i>	100
<i>Levadura</i>	1.5
<i>Sal</i>	2.5
<i>Azúcar</i>	4.0
<i>Agua</i>	60

Para la elaboración del pan blanco se mezclaron los ingredientes en polvo: harina de trigo, levadura, sal y azúcar, posteriormente se agregó agua y se amasó durante 10 min hasta obtener una masa homogénea. La masa se dividió en piezas de 15 g, se colocaron en moldes de aluminio y se dejaron fermentar a temperatura de 40 °C por 30 min (Figura 6). Luego de la fermentación se horneó a temperatura de 200 °C durante 20 min. Las muestras se enfriaron a temperatura ambiente para realizar los análisis correspondientes.



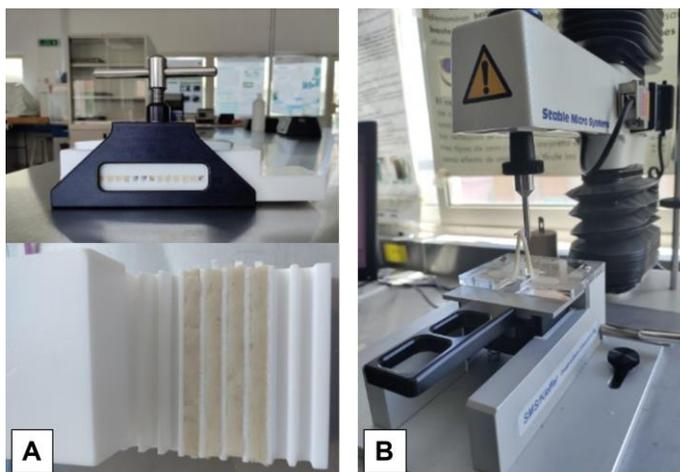
[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 6.** Piezas de pan luego de la fermentación, antes de hornear.

### 3.7 Influencia en las Propiedades de la Masa

#### 3.7.1 Extensibilidad de la Masa

El análisis de la masa se realizó mediante un Texturómetro Stable Micro Systems modelo TA.XT. Plus, con el kit de extensibilidad de masa y gluten de Kieffer (Figura 7B).



[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 7.** Medición de la extensibilidad de la masa. (A) Prensado de la masa; (B) Kit de Kieffer.

Para esta prueba se mezclaron los ingredientes (harina, sal, AX y agua) y se dejaron reposar en la prensa (Figura 6A) durante 30 min para tomar la primera lectura, la masa se volvió a prensar durante 30 min para continuar con la segunda toma de datos, volviendo a dejar en reposo durante 30 min más para tomar la tercera toma de datos. La fuerza se expresó en Newton (N) y la distancia en milímetros (mm) (Ramírez-Cortez, 2022).

### 3.7.2 Capacidad de Absorción de Agua

La capacidad de absorción de agua (CAA) de la harina se determinó según lo descrito por Mau *et al.* (2020). Un gramo de la muestra se colocó en un tubo Falcon de 50 mL con 10 g de agua destilada. Se agitó durante 30 s cada 5 min durante un total de 30 min y luego se centrifugó a 3000 rpm por 30 min. El sobrenadante se decantó y se pesó el tubo. La capacidad de absorción de agua se expresó como gramos de H<sub>2</sub>O absorbido por un gramo de muestra y se calculó como:

$$CAA (g H_2O/g muestra) = \frac{(Peso\ final\ de\ la\ muestra - Peso\ de\ la\ muestra\ original)}{Peso\ de\ la\ muestra\ original}$$

## 3.8 Evaluación de las Características de los Panes

### 3.8.1 Pérdida de Peso Durante el Horneado

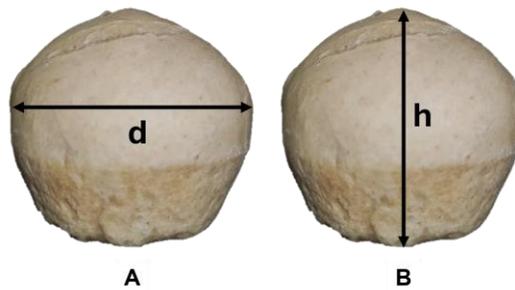
La pérdida de peso durante el horneado se calculó por la relación que existe entre el peso antes (P1) y después del horneado (P2) empleando la siguiente fórmula:

$$Pérdida\ de\ peso\ (\%) = \frac{(P1 - P2)}{P1} \times 100$$

### 3.8.2 Características Físicas

Las dimensiones de los panes diámetro (d) y altura (h) máximas se midieron utilizando un calibrador Vernier como se muestra en la Figura 8. El volumen de los panes (V) se determinó mediante el método de desplazamiento de las semillas de colza según el método 10-05.01 de la Asociación Americana de Químicos de Cereales, (AACC, 2001). El volumen específico (VE) se definió como la relación entre el volumen

del pan y su peso (Syu *et al.*, 2023).

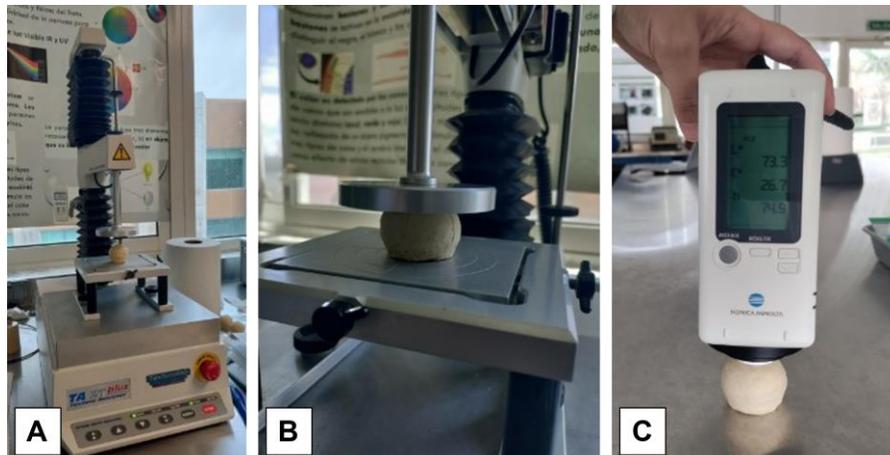


[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 8.** Dimensiones del pan. (A) diámetro máximo (mm); (B) altura máxima (mm).

### 3.8.3 Determinación de Color y Textura

El Análisis de Perfil de Textura (TPA) se realizó empleando un Texturómetro TA.XT2 Stable Micro Systems (Surrey, Inglaterra) con el programa “Texture Exponent”. Se evaluaron los parámetros de dureza, esponjosidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia tomando la pieza completa del pan y aplicando una presión correspondiente al 30 % de la altura de los panes, utilizando un plato de compresión de 75 mm de diámetro (Figura 9 A y B). Los parámetros de textura se midieron en los días 0, 3 y 6 desde la elaboración del pan para observar su comportamiento.



[Fuente: Sanfiel-Oliva, 2024]

**Figura 9.** Determinación de textura y color. (A y B) Análisis de Perfil de Textura; (C) Medición los parámetros cromáticos.

Se midió el color en la corteza de los panes utilizando un colorímetro Konica Minolta CR-20 (Tokyo, Japón) (Figura 9C). Los parámetros cromáticos se obtuvieron empleando los sistemas CIE-LAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) y CIELCH ( $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$ ). Donde el valor de  $L^*$  es luminosidad, (0 = negro, 100 = blanco),  $a^*$  indica rojo (a positiva) o verde (a negativo) y  $b^*$  define amarillez (b positiva) o azul (b negativa), C (croma, es el nivel de saturación de h) y h (es el ángulo de tono  $0^\circ$  = rojo,  $90^\circ$  amarilla,  $180^\circ$  = verde,  $270^\circ$  = azul). La imagen del color se obtuvo mediante el software en línea ColorHexa (ColorHexa software, 2024).

#### **3.8.4 Análisis de Imagen de la Miga**

El tamaño, forma y distribución de las celdas de aire se estudió a partir del análisis de imagen realizado a la sección transversal de los productos. Se seleccionaron rebanadas del centro de los panes, las cuales fueron escaneadas junto con una escala impresa en centímetros a tamaño real. Esta escala sirvió como referencia para el procesamiento y análisis posterior de las imágenes. La imagen se procesó con el programa ImageJ 1.54g (Instituto Nacional de Salud, EE. UU.). Se seleccionó un área cuadrada de  $4 \text{ cm}^2$  de la parte central para una mejor caracterización de los poros de la miga. La selección de los mejores parámetros de brillo y contraste se basó en la comparación visual entre la imagen mostrada por el programa y la muestra original, teniendo en cuenta que el número y forma de los poros fuese lo más cercano a lo real. (Rosell & Garzon, 2018). Se determinaron los valores de las variables: densidad de la miga (#celdas/ $\text{cm}^2$ ), área media de las celdas ( $\text{mm}^2$ ), porosidad (%) y circularidad. La porosidad representa el porcentaje de la miga que consiste en huecos o celdas de aire, la densidad indica el número de celdas por centímetro cuadrado, el área media de las celdas mide el tamaño promedio de las celdas de aire dentro de la miga y la circularidad brinda información sobre la forma de las celdas.

#### **3.8.5 Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante**

El extracto de compuestos fenólicos del pan se obtuvo disolviendo 500 mg de la muestra en 5 ml de NaOH 2 M y dejando en agitación orbital durante 2 h en oscuridad. Después se ajustó el pH a 2.0 con HCl concentrado, recuperando los compuestos

fenólicos con 5 ml de acetato de etilo y evaporando a sequedad. Los compuestos fenólicos fueron suspendidos en 2 ml de metanol al 80 % (Herrera-Balandrano, 2019).

Para la determinación de fenoles totales se empleó la misma metodología descrita para los extractos de AX. El resultado se expresó en miligramos equivalentes de ácido ferúlico por gramo de pan (mgFAE/g). La capacidad antioxidante se determinó mediante el ensayo de decoloración de radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) y la técnica ABTS, siguiendo la metodología empleada para los extractos de AX. Los resultados se expresaron en  $\mu\text{molET/g}$  de pan.

### **3.9 Análisis Estadístico**

El diseño experimental empleado para los tratamientos de extracción de AX fue un Diseño Completamente al Azar (DCA). Para la formulación de los panes, se utilizó un diseño factorial de dos factores: tipo de extracto (cuatro niveles) y porcentaje de AX (dos niveles). El análisis estadístico de los datos recolectados se llevó a cabo con el software Minitab versión 17.1.0. La significancia estadística entre las muestras se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) y las diferencias entre medias se analizaron utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey. Se consideraron estadísticamente significativos los valores de  $p \leq 0.05$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización del Salvado de Trigo

Los resultados bromatológicos obtenidos para la muestra de salvado de trigo analizada en este estudio muestran consistencia con los datos reportados en la base de datos de referencia FoodData Central (USDA, 2024). Los valores registrados en el Cuadro 4 indican que la calidad nutricional del salvado utilizado en la investigación se ajusta a los parámetros estándar de composición química establecidos para este subproducto. Esta concordancia respalda la fiabilidad de los procedimientos analíticos utilizados y la validez de los resultados obtenidos para su posterior aplicación en estudios relacionados con la formulación de alimentos y el aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

**Cuadro 4.** Composición química del salvado de trigo.

Componente	Peso en g por cada 100 g
<i>Humedad</i>	8.79 ± 0.40
<i>Cenizas</i>	6.33 ± 0.35
<i>Grasas</i>	4.34 ± 0.53
<i>Proteínas</i>	13.29 ± 0.33

Los valores están reportados como media ± desviación estándar (n=3)

Se llevó a cabo la determinación del contenido de fenoles totales en los extractos de compuestos fenólicos libres y ligados obtenidos de la muestra de salvado de trigo. Los compuestos fenólicos presentes en el salvado de algunos cereales, tales como los ácidos ferúlicos, vainílico, p-cumárico, cafeico y clorogénico, son conocidos por su abundancia en estos subproductos y se ha informado que contribuyen a la actividad antioxidante del salvado de trigo (Geyik *et al.*, 2023).

Los resultados mostraron que el contenido de fenoles totales en los extractos de compuestos fenólicos ligados fue significativamente mayor en comparación con los extractos de compuestos fenólicos libres. De manera consistente, los extractos fenólicos ligados también exhibieron una mayor capacidad antioxidante que los extractos libres ( $p \leq 0.05$ ), lo que sugiere una relación directa entre la cantidad de compuestos fenólicos ligados y la actividad antioxidante (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Evaluación del contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante del salvado de trigo.

	<b>FT-G</b> <b>(mgGAE/100g)</b>	<b>FT-F</b> <b>(mgFAE/100g)</b>	<b>DPPH</b> <b>(<math>\mu</math>molTE/100g)</b>	<b>ABTS</b> <b>(<math>\mu</math>molTE/100g)</b>
<i>FF</i>	5.41 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	2.79 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>	647.08 $\pm$ 70.25	1160.95 $\pm$ 41.39
<i>FB</i>	10.00 $\pm$ 1.70 <sup>a</sup>	7.21 $\pm$ 1.46 <sup>b</sup>	1795.00 $\pm$ 72.08	1789.52 $\pm$ 12.54
<i>FT</i>	15.41 $\pm$ 1.77 <sup>a</sup>	10.00 $\pm$ 1.55 <sup>b</sup>	2442.08 $\pm$ 127.68	2950.48 $\pm$ 53.73

FF=compuestos fenólicos libres del salvado, FB=compuestos fenólicos ligados del salvado, FT=compuestos fenólicos totales, FT-G= contenido de fenoles totales expresado como miligramos de ácido gálico equivalentes por 100 g de salvado (mgGAE/100g), FT-F=contenido de fenoles totales expresado como miligramos de ácido ferúlico equivalentes por 100 g de muestra (mgFAE/100g)

<sup>a-b</sup> Diferentes letras en una misma fila indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

Al comparar los resultados de la cuantificación de fenoles totales utilizando ácido ferúlico y ácido gálico como estándares para la obtención de las curvas de calibración, se encontraron diferencias significativas entre ambos métodos ( $p \leq 0.05$ ), lo cual indica que el estándar seleccionado puede influir en la precisión de la estimación de los fenoles totales en los extractos analizados. El principal compuesto fenólico presente en el salvado de trigo es el ácido ferúlico (Liu *et al.*, 2020; Geyik *et al.*, 2023), por lo cual, al utilizar una solución estándar diferente, como el ácido gálico, puede producirse una sobreestimación de los resultados, por lo cual se empleó el ácido ferúlico como estándar en el resto del estudio.

#### 4.2 Caracterización de los Extractos de AX

Una vez obtenidos los extractos, estos presentan un aspecto de polvo blanco, como se observa en la Figura 10. Se procedió a su caracterización en términos de rendimiento y propiedades funcionales.



**Figura 10.** Imagen de los extractos de AX

### 4.2.1 Rendimiento

La eficiencia de la extracción de AX del salvado de trigo utilizando soluciones alcalinas está determinada principalmente por la concentración de la solución alcalina, la temperatura y el tiempo de extracción (Kale *et al.*, 2013; Mense & Shi, 2018; Yilmaz-Turan *et al.*, 2020; Schmidt *et al.*, 2021). Los pretratamientos y las condiciones específicas del proceso de extracción influyen significativamente en el rendimiento y la calidad de los AX (Aguedo *et al.*, 2014; Hell *et al.*, 2015).

Los AX recuperados de los diferentes tratamientos de extracción fueron secados mediante liofilización, registrándose su peso para calcular el rendimiento en función de 100 g de salvado de trigo (Cuadro 6). Los tiempos de extracción más prolongados (4.5 y 6.0 h) proporcionaron un mayor rendimiento del proceso ( $p \leq 0.05$ ). Los tiempos de extracción prolongados pueden mejorar el rendimiento y la pureza de los AX; Xiao-na (2008) plantea un tiempo de extracción óptimo de alrededor de 200 min para maximizar el rendimiento.

**Cuadro 6.** Rendimiento de los extractos de AX.

Tratamiento	Rendimiento (%)
1.5 h	7.51±0.72 <sup>b</sup>
3.0 h	7.75±1.93 <sup>b</sup>
4.5 h	12.24±1.00 <sup>a</sup>
6.0 h	12.06±1.13 <sup>a</sup>
<i>p-value</i>	0.002

<sup>a-b</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

El NaOH es más eficaz que otros agentes alcalinos (Yan *et al.*, 2019). En un estudio realizado por Hussain *et al.* (2022), reportaron un rendimiento de 8.1 % para un tratamiento de 6 h utilizando hidróxido de potasio al 4.5 % y una temperatura de 30 °C. Por otro lado, se han documentado valores de rendimiento de extracción de AX en el rango de 2.8 a 3.8 %, empleando extracciones alcalinas con NaOH y tiempos de extracción entre 40 y 120 min (Berlanga-Reyes *et al.*, 2011; Khalighi *et al.*, 2019; Raza *et al.*, 2022)

#### 4.2.2 Contenido de Fenoles Totales

Las condiciones de extracción, como el tiempo, afectan el contenido de fenoles y la capacidad antioxidante de los extractos de AX. El contenido de fenoles totales en los AX disminuye con el aumento del tiempo de extracción (Herrera-Balandrano *et al.*, 2018). Los métodos de extracción, incluyendo el uso de soluciones alcalinas, afectan la composición fenólica de los AX. Los extractos alcalinos tienden a tener mayores niveles de ácidos fenólicos esterificados, lo que contribuye a una mayor capacidad antioxidante (Chen *et al.*, 2019; Weng *et al.*, 2023).

No se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los tratamientos de extracción en cuanto al contenido de compuestos fenólicos libres ni ligados (Cuadro 7). Sin embargo, el contenido de compuestos fenólicos totales fue significativamente mayor en el extracto obtenido en 1.5 h de tratamiento. Herrera-Balandrano *et al.* (2018) obtuvieron un resultado similar, los extractos obtenidos en 2 h de tratamiento de extracción alcalina mostraron un mayor contenido de fenoles en comparación con los obtenidos en 4 y 6 h.

**Cuadro 7.** Contenido de fenoles totales de los extractos de AX.

Tratamiento	Contenido de Fenoles Totales (mgEAF/100g)		
	Libres	Ligados	Total
1.5 h	1.97±0.33 <sup>a</sup>	2.14±0.24 <sup>a</sup>	4.12±0.17 <sup>a</sup>
3.0 h	2.66±1.12 <sup>a</sup>	-	2.66±1.12 <sup>b</sup>
4.5 h	1.20±0.15 <sup>a</sup>	2.06±0.14 <sup>a</sup>	3.26±0.28 <sup>b</sup>
6.0 h	1.23±0.17 <sup>a</sup>	2.09±0.16 <sup>a</sup>	3.32±0.32 <sup>b</sup>
<i>p-value</i>	0.051	0.849	0.012

mgEAF/100g = mg de equivalentes de ácido ferúlico por 100 g del extracto

<sup>a-b</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

El contenido de compuestos fenólicos está influenciado por varios factores, como el tipo de solvente, la concentración de este y el tiempo de extracción. Estudios previos demuestran que la elección de estos parámetros es determinante para maximizar la eficiencia de extracción (Wang *et al.*, 2008).

### 4.2.3 Capacidad Antioxidante de los Extractos

La relación entre los AX y los compuestos fenólicos es crucial, ya que los ácidos fenólicos unidos a la estructura de los AX permiten que estos actúen como antioxidantes eficaces. Según Demuth *et al.* (2020), el proceso de molienda puede incrementar hasta un 60 % el contenido de ácidos fenólicos libres, lo que favorece una mayor disponibilidad de estos compuestos para su acción antioxidante. La actividad antioxidante de los AX está altamente correlacionada con el contenido total de fenoles y la presencia de ácidos hidroxicinámicos como el ácido ferúlico (Ayala-Soto *et al.*, 2014; Bijalwan, *et al.*, 2016).

En los Cuadro 8 y 9 se muestra la capacidad antioxidante de los extractos de AX evaluada mediante los métodos DPPH y ABTS respectivamente. Se observa que la capacidad antioxidante de los AX también disminuye con el aumento del tiempo de extracción, lo cual está en línea con el contenido de ácido ferúlico (Herrera-Balandrano *et al.*, 2018). Al aumentar el tiempo de extracción aumenta la actividad antioxidante en los extractos de compuestos fenólicos libres y ocurre lo inverso en los extractos de compuestos fenólicos ligados ( $p \leq 0.05$ ).

El extracto obtenido en 1.5 h de tratamiento presentó la mayor capacidad antioxidante total en comparación con el resto ( $p \leq 0.05$ ), lo que corrobora que al aumentar el tiempo de extracción disminuye la capacidad antioxidante de los extractos de AX.

**Cuadro 8.** Capacidad antioxidante mediante DPPH de los extractos de AX.

Tratamiento	DPPH ( $\mu\text{molET}/100\text{g}$ )		
	Libres	Ligados	Total
1.5 h	97.41 $\pm$ 21.46 <sup>b</sup>	833.42 $\pm$ 11.51 <sup>a</sup>	930.83 $\pm$ 10.03 <sup>a</sup>
3.0 h	149.83 $\pm$ 30.42 <sup>b</sup>	180.65 $\pm$ 31.61 <sup>b</sup>	330.48 $\pm$ 52.98 <sup>c</sup>
4.5 h	319.22 $\pm$ 10.22 <sup>a</sup>	234.57 $\pm$ 29.71 <sup>b</sup>	553.79 $\pm$ 39.89 <sup>b</sup>
6.0 h	343.44 $\pm$ 12.41 <sup>a</sup>	202.23 $\pm$ 27.75 <sup>b</sup>	545.68 $\pm$ 38.54 <sup>b</sup>
<i>p-value</i>	0.000	0.000	0.000

$\mu\text{molET}/100\text{g}$  =  $\mu\text{mol}$  equivalentes de Trolox por 100 g del extracto

<sup>a-c</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

**Cuadro 9.** Capacidad antioxidante mediante ABTS de los extractos de AX.

Tratamiento	ABTS ( $\mu\text{molET}/100\text{g}$ )		
	Libres	Ligados	Total
1.5 h	622.44 $\pm$ 49.47 <sup>bc</sup>	483.21 $\pm$ 119.28 <sup>a</sup>	1105.66 $\pm$ 166.11 <sup>a</sup>
3.0 h	483.05 $\pm$ 57.28 <sup>c</sup>	158.91 $\pm$ 23.17 <sup>b</sup>	641.96 $\pm$ 64.88 <sup>b</sup>
4.5 h	732.80 $\pm$ 42.12 <sup>ab</sup>	142.49 $\pm$ 33.47 <sup>b</sup>	875.29 $\pm$ 64.61 <sup>ab</sup>
6.0 h	795.73 $\pm$ 10.77 <sup>a</sup>	67.03 $\pm$ 9.95 <sup>b</sup>	862.77 $\pm$ 18.33 <sup>ab</sup>
<i>p-value</i>	0.000	0.000	0.003

$\mu\text{molET}/100\text{g}$  =  $\mu\text{mol}$  equivalentes de Trolox por 100 g del extracto

<sup>a-c</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

### 4.3 CAA y Extensibilidad de la Masa

Los AX son polisacáridos complejos que se caracterizan por su alta capacidad de absorción de agua. Esta propiedad se debe a la estructura molecular de los AX, en la cual los grupos hidroxilo (OH) presentes en la cadena polimérica pueden formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua, favoreciendo la absorción y retención de humedad (Hou *et al.*, 2020). Esta capacidad de los AX es especialmente relevante en aplicaciones alimentarias, donde la humedad y la textura de los productos son aspectos clave para la calidad del producto final.

El Cuadro 10 presenta la CAA de los tratamientos en los que se añadió AX a la harina de trigo. Se evaluaron los AX obtenidos en los diferentes tiempos de extracción (1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 h) y dos concentraciones (1 y 2 %), comparándolos con un control sin adición de AX. Tanto la interacción entre el tiempo de extracción de los AX y su porcentaje en la masa como cada factor por sí solo tienen un efecto significativo en la CAA ( $p \leq 0.05$ ). En todos los casos, excepto en los AX obtenidos en 1.5 h añadidos al 1 %, la adición de AX incrementó significativamente la CAA de la masa. El valor de CAA del control es  $0.8358 \pm 0.0021$  g/g, el más bajo de todos los tratamientos. Esto indica que la adición de AX incrementa la CAA en comparación con la muestra control.

En general, la adición de 2 % de AX resultó en una mayor CAA en comparación con el 1 % en todos los tiempos de extracción. Por ejemplo, para 4.5 h, la CAA con 2 % de AX fue  $1.0222 \pm 0.0054$  g/g, el valor más alto registrado, mientras que con 1 % de AX fue  $0.8954 \pm 0.0050$  g/g. Esto sugiere que el aumento en la concentración de

AX favorece la absorción de agua en la masa.

**Cuadro 10.** Efecto de los AX en la capacidad de absorción de agua de la masa.

Tratamiento	CAA
Control	0.8358±0.0021 <sup>f</sup>
1.5 h	
1 %	0.8614±0.0021 <sup>ef</sup>
2 %	0.9656±0.0029 <sup>b</sup>
3.0 h	
1 %	0.8651±0.0106 <sup>e</sup>
2 %	0.9574±0.0123 <sup>b</sup>
4.5 h	
1 %	0.8954±0.0050 <sup>cd</sup>
2 %	1.0222±0.0054 <sup>a</sup>
6.0 h	
1 %	0.8920±0.0025 <sup>d</sup>
2 %	0.9191±0.0213 <sup>c</sup>
p-value	0.0000
T	0.0000
% AX	0.0000
T * %AX	0.0000

CAA (g de agua absorbida/g de muestra). T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-f</sup> Diferentes letras en indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

El tiempo de extracción también influye en la CAA. La mayor capacidad de absorción se alcanzó con un tratamiento de 4.5 h y 2 % de AX. Para los tratamientos de 1 % de AX, la CAA mostró un incremento gradual con el aumento del tiempo de extracción, alcanzando un máximo a las 4.5 h y luego disminuyendo ligeramente a las 6.0 h. En el caso de 2 % de AX, el valor también disminuyó después de alcanzar el máximo en 4.5 h, lo cual podría indicar un punto óptimo en la relación tiempo de extracción-concentración de AX para obtener implicaciones positivas en la calidad y las propiedades reológicas del pan elaborado con esta harina.

La relación entre el nivel de adición de AX y la absorción de agua ha sido objeto de diversos estudios que buscan optimizar las formulaciones en la industria panadera. Pietiäinen *et al.* (2024) encontraron que, al aumentar la proporción de AX en la masa,

la CAA se incrementa, lo cual puede mejorar la estabilidad de la masa durante el amasado y el horneado. La adición de AX en concentraciones del 1 % y 2 % provoca un aumento en la CAA, lo cual se atribuye principalmente a las características estructurales de los AX, como su masa molecular y el grado de sustitución, propiedades estructurales determinantes en el comportamiento reológico de las masas (Bukza *et al.*, 2014). En un 2.5 %, mejora significativamente la CAA en la masa de harina de trigo, lo que se traduce en una masa más hidratada y, por ende, en un producto final con una mejor estructura y suavidad (Zhu *et al.*, 2023).

En los Cuadros 11 y 12 se presentan los resultados correspondientes a los valores de fuerza y distancia, respectivamente, medidos en diferentes tiempos de reposo (30, 60 y 90 min). Estos datos se emplearon para evaluar la influencia de los AX en la extensibilidad de la masa.

**Cuadro 11.** Fuerza de la masa evaluada en diferentes tiempos de reposo.

Tratamiento	Fuerza (N)		
	30 min	60 min	90 min
Control	0.4824±0.0353 <sup>bcA</sup>	0.7346±0.2151 <sup>cdA</sup>	0.9045±0.0395 <sup>cdA</sup>
1 %			
1.5 h	0.6463±0.0387 <sup>abB</sup>	0.8232±0.0886 <sup>bcA</sup>	1.2013±0.1918 <sup>bcA</sup>
3.0 h	0.4255±0.0466 <sup>cdC</sup>	0.5533±0.0718 <sup>dB</sup>	0.9847±0.0678 <sup>cdA</sup>
4.5 h	0.4447±0.0558 <sup>cdC</sup>	1.1502±0.1589 <sup>abB</sup>	1.6096±0.2215 <sup>aA</sup>
6.0 h	0.3392±0.0180 <sup>dB</sup>	0.5989±0.0291 <sup>cdA</sup>	0.7760±0.1024 <sup>dA</sup>
2 %			
1.5 h	0.6596±0.0873 <sup>abB</sup>	0.9773±0.0455 <sup>abA</sup>	1.0129±0.2533 <sup>cdA</sup>
3.0 h	0.5563±0.0488 <sup>abC</sup>	0.9948±0.1239 <sup>abB</sup>	1.1460±0.1136 <sup>bcA</sup>
4.5 h	0.4482±0.0521 <sup>bcdC</sup>	1.0167±0.1239 <sup>abB</sup>	1.4279±0.2800 <sup>abA</sup>
6.0 h	0.4525±0.0544 <sup>bcB</sup>	1.0316±0.0911 <sup>abA</sup>	0.9906±0.0815 <sup>cdA</sup>
p-value	0.000	0.000	0.011
T	0.000	0.000	0.000
% AX	0.001	0.000	0.982
T * %AX	0.021	0.000	0.025

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=5)

<sup>A-C</sup> Diferentes letras mayúsculas en una misma fila indican diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ )

**Cuadro 12.** Distancia de extensión de la masa evaluada en diferentes tiempos de reposo.

Tratamiento	Distancia (mm)		
	30 min	60 min	90 min
Control	33.92±2.24 <sup>abA</sup>	35.02±4.57 <sup>abA</sup>	30.32±5.04 <sup>abA</sup>
1 %			
1.5 h	26.66±1.67 <sup>bA</sup>	28.84±4.85 <sup>bcA</sup>	25.96±1.68 <sup>abA</sup>
3.0 h	34.89±1.62 <sup>abA</sup>	27.83±2.28 <sup>bcdB</sup>	25.71±3.07 <sup>abB</sup>
4.5 h	35.89±4.09 <sup>abA</sup>	27.49±4.13 <sup>cdA</sup>	25.67±5.08 <sup>abA</sup>
6.0 h	42.88±1.86 <sup>aA</sup>	38.74±5.24 <sup>aAB</sup>	31.37±5.83 <sup>aB</sup>
2 %			
1.5 h	25.30±1.35 <sup>bA</sup>	23.66±1.74 <sup>cdA</sup>	27.76±5.60 <sup>abA</sup>
3.0 h	28.67±3.78 <sup>bA</sup>	21.38±1.98 <sup>dB</sup>	22.96±1.82 <sup>bB</sup>
4.5 h	43.39±4.20 <sup>aA</sup>	23.12±1.74 <sup>cdB</sup>	22.49±1.79 <sup>bB</sup>
6.0 h	34.17±5.66 <sup>abA</sup>	21.22±0.87 <sup>dB</sup>	24.25±2.07 <sup>abB</sup>
p-value	0.000	0.000	0.000
T	0.000	0.000	0.087
% AX	0.216	0.000	0.025
T * %AX	0.013	0.000	0.092

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=5)

<sup>A-C</sup> Diferentes letras mayúsculas en una misma fila indican diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ )

La extensibilidad de la masa se ve significativamente afectada ( $p \leq 0.05$ ) por el tiempo de extracción, la concentración de AX añadida y la interacción de ambos factores, así como por el tiempo de reposo de la masa. La incorporación de AX incrementa la resistencia de la masa a la extensión, y este efecto se intensifica durante el reposo. La extensibilidad de la masa, evaluada mediante los parámetros de fuerza y distancia, varía con el tiempo de reposo de la masa ( $p < 0.05$ ). La fuerza tiende a aumentar en algunos tratamientos con mayor tiempo de reposo, mientras que la distancia puede disminuir. Esto sugiere que los cambios en la red de gluten de la masa durante el reposo afectan su resistencia y extensibilidad.

En general, los tratamientos con un 2 % de AX tienden a presentar mayor resistencia que aquellos con un 1 %, lo que sugiere que mayores concentraciones de AX aumentan la resistencia de la masa. No se observa una tendencia claramente

definida en el comportamiento de la extensibilidad de la masa para los distintos tratamientos, según Meeus *et al.* (2021), los AX pueden alterar la distribución del agua en la masa, modificando su viscosidad y las propiedades reológicas tanto en condiciones lineales como no lineales. Los AX con mayor grado de hidrólisis pueden mejorar las propiedades reológicas y de procesamiento de la masa, favoreciendo la formación de una red proteica más densa y continua (Guo *et al.*, 2018).

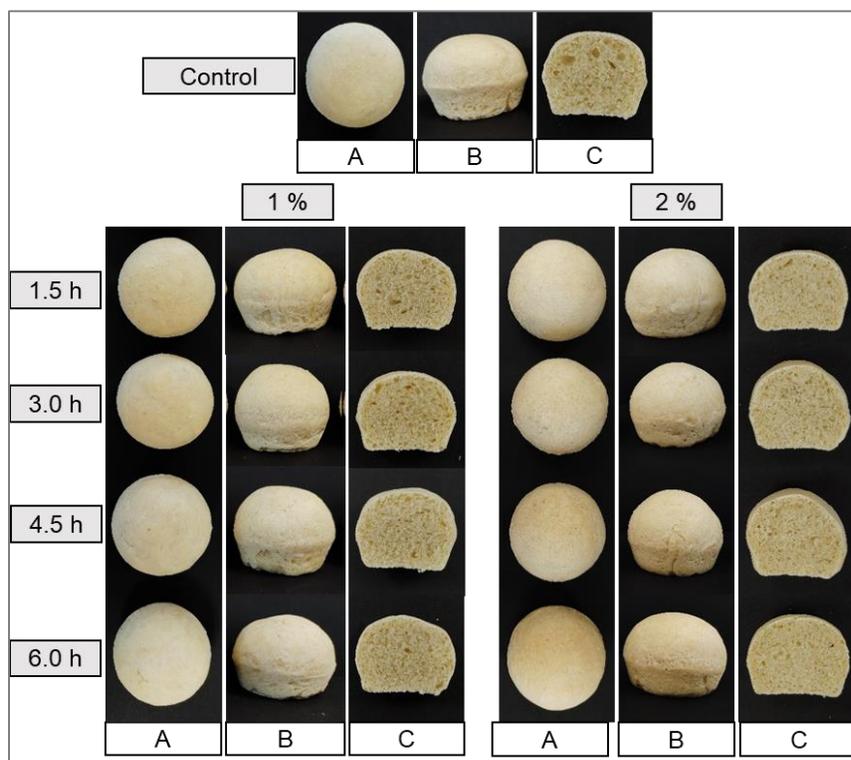
El ajuste de la cantidad de AX y del tiempo de reposo es fundamental para optimizar las propiedades reológicas de las masas usadas en panificación, ya que la solubilización de los AX es más acentuada durante el reposo que durante el proceso de mezcla, debido a la acción de las endoxilanasas presentes en la harina de trigo (Farkas *et al.*, 2021).

Estos resultados sugieren que la optimización de la cantidad de AX y el tiempo de reposo de la masa puede ser clave para mejorar las propiedades reológicas de las masas utilizadas en la panificación y resaltan la importancia de los AX no solo como agentes de retención de agua, sino también como componentes funcionales que pueden ser utilizados para modificar y mejorar las propiedades reológicas de la masa optimizando la calidad del producto final.

#### **4.4 Evaluación de los Parámetros de Calidad del Pan**

En la Figura 11 se presentan los panes elaborados en este estudio, observados desde distintos ángulos, incluyendo una vista de la rebanada. Estas imágenes muestran las características visuales de cada muestra, incluido el grupo de control sin adición de AX. Cada imagen permite una comparación directa de las variaciones en la formulación y su impacto en el aspecto final del producto.

La pérdida de peso durante el horneado del pan es un fenómeno influenciado por varios factores, incluyendo la temperatura del horno, el tiempo de horneado y la composición de los ingredientes, específicamente su capacidad de retención de agua. Este proceso no solo afecta la calidad final del pan, sino también su valor nutricional y características sensoriales (Khater & Bahnasawy, 2014; Zu *et al.*, 2021).



**Figura 11.** Imágenes de los panes elaborados. (A) Vista superior; (B) Vista lateral; (C) corte transversal a la pieza de pan para obtener la rebanada del centro.

En este trabajo es de interés lo relacionado a la adición de un nuevo ingrediente, los AX, y como puede influir en la pérdida de peso del pan. Por ejemplo, la incorporación de goma guar resulta en una menor pérdida de peso en comparación con el pan sin este aditivo (Golchin *et al.*, 2020). La adición de fibra dietética también puede provocar el mismo efecto y además mejorar las propiedades nutricionales del pan, como el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante (Niño-Medina *et al.*, 2019).

La pérdida de peso durante el horneado del pan varía significativamente según el tratamiento ( $p \leq 0.05$ ), debido a la influencia del tiempo de extracción del AX y su concentración la formulación (Cuadro 13). El control tiene una pérdida de peso de 11.7331 %, mientras que algunos tratamientos, como el de 1.5 h con 1 % de AX, presentan pérdidas de peso mayores (13.4518 %), lo que podría estar relacionado con la retención de humedad o la estructura de la miga. Los tratamientos de 4.5 y 6.0 h con 1 % de AX muestran las menores pérdidas de peso (8.9153 y 8.4347 %

respectivamente), lo que sugiere que estos tratamientos podrían favorecer una mejor retención de agua en el pan.

**Cuadro 13.** Características físicas del pan.

T	Pérdida de peso (%)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen específico (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )
C	11.73±0.43 <sup>bc</sup>	40.63±0.42 <sup>a</sup>	31.67±0.47 <sup>a</sup>	2.72±0.04 <sup>a</sup>
1.5 h				
1%	13.45±0.45 <sup>a</sup>	39.50±0.50 <sup>b</sup>	31.50±0.36 <sup>ab</sup>	2.47±0.08 <sup>bc</sup>
2%	11.38±0.24 <sup>c</sup>	39.10±0.10 <sup>b</sup>	29.93±1.03 <sup>b</sup>	2.36±0.09 <sup>c</sup>
3.0 h				
1%	12.97±1.32 <sup>ab</sup>	39.47±0.40 <sup>b</sup>	32.00±0.56 <sup>a</sup>	2.63±0.04 <sup>ab</sup>
2%	12.43±0.06 <sup>abc</sup>	39.40±0.26 <sup>b</sup>	32.40±0.78 <sup>a</sup>	2.42±0.12 <sup>4c</sup>
4.5 h				
1%	8.91±0.28 <sup>d</sup>	39.73±0.47 <sup>ab</sup>	32.33±0.40 <sup>a</sup>	2.64±0.08 <sup>ab</sup>
2%	12.38±0.25 <sup>a<sup>bc</sup></sup>	39.10±0.44 <sup>b</sup>	31.50±0.20 <sup>ab</sup>	2.42±0.02 <sup>c</sup>
6.0 h				
1%	8.43±0.50 <sup>d</sup>	39.57±0.21 <sup>b</sup>	31.63±0.21 <sup>a</sup>	2.54±0.04 <sup>abc</sup>
2%	12.75±0.20 <sup>a<sup>bc</sup></sup>	39.33±0.21 <sup>b</sup>	31.23±0.51 <sup>ab</sup>	2.52±0.04 <sup>bc</sup>
<i>p-value</i>	0.0000	0.0200	0.0200	0.0000
<i>T</i>	0.0000	0.879	0.002	0.028
<i>% AX</i>	0.0000	0.034	0.020	0.000
<i>T*%AX</i>	0.0000	0.562	0.056	0.082

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

Los AX influyen en la capacidad de retención de agua durante el horneado del pan (Ayala-Soto *et al.*, 2017). Su capacidad para ello depende de factores como su solubilidad y peso molecular (Li *et al.*, 2012; Leys *et al.*, 2020). Los AX solubles y de alto peso molecular son particularmente efectivos en mejorar la calidad del pan, resultando en una miga más suave y un mayor volumen (Leys *et al.*, 2020). Sin embargo, una excesiva absorción de agua por parte de los AX puede llevar a una migración de agua desde la red de gluten, afectando negativamente la calidad del pan (Li *et al.*, 2012). La relación arabinosa/xilosa es determinante, los AX con baja tasa de

sustitución exhiben una mayor capacidad de retención de agua (Gao *et al.*, 2021). Al limitar la movilidad del agua podrían contribuir a prolongar la vida útil del pan, ya que una mayor hidratación en la miga puede retardar el proceso de endurecimiento y mantener una textura más fresca por un período más prolongado (Mourão *et al.*, 2023).

En el Cuadro 13 se muestran los efectos de la adición de AX en algunas características físicas del pan. El diámetro del pan fue el parámetro menos sensible y solo se vio afectado significativamente por la influencia del porcentaje de AX añadido ( $p \leq 0.05$ ). Los valores no presentan grandes variaciones entre tratamientos, con valores que oscilan entre 39.1000 y 40.6333 cm.

La altura del pan varía entre los tratamientos, pero no difirieron del control (31.6667 mm) , con la excepción del tratamiento de 1.5 h con 2 % de AX, en el cual la altura es menor (29.9333 mm). Esto indica que, con tiempos de extracción más cortos y concentraciones más altas de los AX, la estructura del pan puede verse comprometida.

El volumen específico es mayor en el control ( $2.7190 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ), seguido por algunos tratamientos, como el de 3.0, 4.5 y 6.0 h con 1 % de AX ( $2.6301$ ,  $2.6350$  y  $2.5360 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  respectivamente), sin diferencias estadísticas significativa entre ellos.

Los tratamientos con 2 % de AX en general muestran volúmenes específicos más bajos que el control ( $p \leq 0.05$ ), lo que sugiere que una mayor concentración de AX puede reducir la capacidad del pan para retener el volumen durante el horneado, posiblemente debido a cambios en la estructura de la masa o en la retención de gas.

La proporción de adición de AX y los tiempos de extracción de estos afectan las características físicas del pan, especialmente la retención de humedad (pérdida de peso), la altura y el volumen específico. Los tratamientos con tiempos de extracción más prolongados y concentraciones más bajas de AX en la formulación parecen favorecer una mejor estructura del pan, lo que podría ser beneficioso para mejorar su calidad.

La adición de AX puede mantener o mejorar la calidad del pan, especialmente cuando se ajusta la absorción de agua al nivel óptimo en la fórmula o se aplican técnicas de remojo previo (Ayala-Soto *et al.*, 2017; Koegelenberg & Chimphango, 2017; Zhang *et al.*, 2019; Espinosa-Ramírez *et al.*, 2020). Además, incorporar enzimas

como la xilanasa puede mejorar la solubilidad de los AX, mejorando las propiedades de la masa y la calidad del pan (Messia *et al.*, 2016 Zhang *et al.*, 2022).

#### 4.5 Influencia en el Color

El Cuadro 14 presenta las características cromáticas de la corteza de los panes. Los parámetros evaluados incluyen L (luminosidad), C (croma o saturación del color), h (tono), a (componente rojo-verde), y b (componente amarillo-azul). Todos los parámetros cromáticos muestran diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ), lo que indica la adición de AX afecta las características de color de la corteza de los panes. Las interacciones entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX también son estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ), lo que sugiere que los efectos combinados de estas variables son importantes en el color final del pan.

**Cuadro 14.** Características cromáticas de la corteza del pan.

	L	C	h	a	b	
Control	81.13±0.12 <sup>a</sup>	19.47±0.51 <sup>d</sup>	81.73±0.42 <sup>a</sup>	2.83±0.21 <sup>d</sup>	19.27±0.51 <sup>d</sup>	
1.5 h						
1%	78.80±0.62 <sup>cd</sup>	22.00±0.72 <sup>bc</sup>	79.77±0.80 <sup>bc</sup>	3.93±0.45 <sup>bcd</sup>	21.63±0.68 <sup>bc</sup>	
2%	79.17±0.98 <sup>bc</sup>	21.23±0.97 <sup>cd</sup>	79.07±0.25 <sup>bc</sup>	4.03±0.25 <sup>bc</sup>	20.83±0.97 <sup>cd</sup>	
3.0 h						
1%	80.43±0.21 <sup>ab</sup>	20.60±0.76 <sup>cd</sup>	80.73±0.32 <sup>ab</sup>	3.37±0.25 <sup>cd</sup>	20.37±0.71 <sup>cd</sup>	
2%	77.37±0.49 <sup>de</sup>	23.73±0.84 <sup>b</sup>	78.10±0.36 <sup>c</sup>	4.90±0.35 <sup>b</sup>	23.27±0.81 <sup>b</sup>	
4.5 h						
1%	80.17±0.40 <sup>abc</sup>	19.93±0.12 <sup>d</sup>	80.37±0.25 <sup>ab</sup>	3.33±0.06 <sup>cd</sup>	19.60±0.10 <sup>d</sup>	
2%	79.60±0.36 <sup>bc</sup>	23.37±0.15 <sup>b</sup>	77.90±0.36 <sup>c</sup>	4.90±0.17 <sup>b</sup>	22.87±0.15 <sup>b</sup>	
6.0 h						
1%	80.47±0.42 <sup>ab</sup>	20.53±0.49 <sup>cd</sup>	80.73±0.38 <sup>ab</sup>	3.30±0.10 <sup>cd</sup>	20.23±0.49 <sup>cd</sup>	
2%	77.10±0.46 <sup>e</sup>	26.43±1.10 <sup>a</sup>	75.60±1.57 <sup>d</sup>	6.60±0.93 <sup>a</sup>	25.60±0.87 <sup>a</sup>	
p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
T	0.010	0.001	0.018	0.004	0.001	
AX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
T*%AX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-e</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

El valor de L indica cuán claro u oscuro es el pan. El control muestra la mayor

luminosidad (81.1333), lo que sugiere una corteza más clara en comparación con los tratamientos. A medida que aumenta el tiempo de extracción y la concentración de AX, la luminosidad tiende a disminuir, como se observa en el tratamiento de 6.0 h con 2 % de AX (77.1000), lo que indica que la corteza se vuelve más oscura.

El control tiene un valor de croma relativamente bajo (19.4667), mientras que la adición de AX aumenta los valores de C, especialmente con 2 % de AX, alcanzando el valor máximo en el tratamiento 6.0 h al 2 % (26.4333). Esto indica que la saturación del color de la corteza aumenta con mayores concentraciones de AX y tiempos de extracción, pero puede observarse efecto similar con los AX de 1.5 h al 1 %.

El control tiene un valor de tono de 81.7333, y los tratamientos con AX tienden a reducir este valor. El tratamiento de 6.0 h y 2 % de AX presenta el menor valor de h (75.6000), lo que sugiere un cambio hacia un tono más rojizo o marrón.

El componente a es más bajo en el control (2.8333), aumentando con la adición de AX. El tratamiento de 6.0 h y 2 % de AX tiene el valor más alto (6.6000), indicando un cambio hacia tonos más rojizos, lo que es típico en panes con cortezas más doradas u oscuras. Los valores de b son relativamente altos en todos los tratamientos, con un incremento notable en el tratamiento de 6.0 h y 2 % (25.6000), lo que indica una tendencia hacia un color más amarillento.

Las causas de los cambios de color en los panes con AX adicionados son aún motivo de diversos estudios. Se plantea que la presencia del ácido ferúlico unido al AX reduce significativamente la formación de acrilamida, un compuesto tóxico y potencialmente carcinogénico, y también suprime los compuestos volátiles de tipo Maillard, que contribuyen al color y sabor del pan (Mildner-Szkudlarz *et al.*, 2019), pero este efecto no se pudo observar en este estudio.

Zhang *et al.*, 2019 plantean que la fortificación de pan con fracciones enriquecidas de AX puede afectar el color del producto final, especialmente a niveles de fortificación superiores al 10 %, resultando en un color más oscuro del pan. Aunque los AX en su estado puro son incoloros, es complejo obtenerlos en una forma totalmente libre de impurezas y estas suelen ser responsables de los cambios de color observados en los panes que contienen AX (Bender *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019).

#### 4.6 Análisis del Perfil de Textura

En el Cuadro 15 se presenta el perfil de textura de los panes en el día de su elaboración, evaluando diferentes atributos de textura: dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y resiliencia. Los valores de dureza muestran una variabilidad significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre las muestras. A medida que aumenta el porcentaje de AX, se observa un incremento en la dureza de los panes, siendo el más alto en el grupo de 2% de AX con 1.5 h de extracción. Además, para el 1% de AX la dureza tiende a disminuir en las muestras con tiempos de extracción más largos.

**Cuadro 15.** Perfil de textura de los panes en el día de su elaboración (Día 0).

	Dureza	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad	Resiliencia
Control	12.46±1.83 <sup>cd</sup>	0.9317±0.0065 <sup>a</sup>	0.6023±0.0050 <sup>abc</sup>	7.10±0.92 <sup>cd</sup>	0.2677±0.0121 <sup>ab</sup>
1.5 h					
1%	15.90±1.67 <sup>abc</sup>	0.9247±0.0117 <sup>a</sup>	0.5793±0.0206 <sup>c</sup>	8.54±1.18 <sup>bcd</sup>	0.2470±0.0190 <sup>b</sup>
2%	20.97±2.31 <sup>a</sup>	0.9203±0.0073 <sup>a</sup>	0.6543±0.0047 <sup>a</sup>	12.63±1.46 <sup>a</sup>	0.3110±0.0078 <sup>a</sup>
3.0 h					
1%	15.46±1.74 <sup>bc</sup>	0.9100±0.0104 <sup>a</sup>	0.5883±0.0264 <sup>bc</sup>	8.28±1.03 <sup>bcd</sup>	0.2617±0.0119 <sup>ab</sup>
2%	17.48±2.09 <sup>abc</sup>	0.9177±0.0040 <sup>a</sup>	0.6073±0.0146 <sup>abc</sup>	9.76±1.46 <sup>abc</sup>	0.2777±0.0134 <sup>ab</sup>
4.5 h					
1%	9.97±1.10 <sup>d</sup>	0.9070±0.0161 <sup>a</sup>	0.6450±0.0338 <sup>ab</sup>	5.83±0.77 <sup>d</sup>	0.2877±0.0239 <sup>ab</sup>
2%	18.99±1.03 <sup>ab</sup>	0.9217±0.0035 <sup>a</sup>	0.6257±0.0265 <sup>abc</sup>	10.95±0.76 <sup>ab</sup>	0.2890±0.0332 <sup>ab</sup>
6.0 h					
1%	10.282±1.56 <sup>d</sup>	0.9120±0.0030 <sup>a</sup>	0.6080±0.0267 <sup>abc</sup>	5.72±1.08 <sup>d</sup>	0.2643±0.0205 <sup>ab</sup>
2%	19.16±2.26 <sup>ab</sup>	0.9303±0.0058 <sup>a</sup>	0.6103±0.0142 <sup>abc</sup>	10.89±1.40 <sup>ab</sup>	0.2793±0.0136 <sup>ab</sup>
p-value	0.000	0.024	0.008	0.000	0.026
T	0.005	0.238	0.067	0.014	0.367
% AX	0.000	0.023	0.054	0.000	0.008
T * %AX	0.010	0.169	0.015	0.050	0.062

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX. Resultados expresados en N

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media ± desviación estándar (n=3)

En la elasticidad no se observaron variaciones estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ). La cohesividad presenta pequeñas variaciones en función de la interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX, con diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). Sin embargo, estas variaciones se observaron entre los tratamientos con AX, pero no al compararlos con el control, misma tendencia que se observó en los valores

de resiliencia. La masticabilidad se ve notablemente afectada por el porcentaje de AX, siendo mayor en las muestras con 2% de AX y tiempos de extracción más cortos, especialmente a 1.5 h. Este aumento en masticabilidad puede atribuirse a una mayor dureza en estos panes, que también se observa en los resultados.

Los parámetros de textura de los panes elaborados se evaluaron nuevamente al tercer y sexto día de su producción, con el objetivo de analizar cómo varía la textura en función del tiempo y de estudiar la influencia de los AX en la vida útil del producto.

En este estudio, los Cuadros 16 y 17 presentan los resultados obtenidos en los días 3 y 6 respectivamente, proporcionando un análisis comparativo que permite visualizar las tendencias en la pérdida de suavidad y otros parámetros texturales clave en función de los días transcurridos desde la elaboración del pan.

**Cuadro 16.** Perfil de textura de los panes en el día 3 desde su elaboración

T/P	Dureza	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad	Resiliencia
C	39.04±2.48 <sup>bc</sup>	0.8840±0.0102 <sup>abc</sup>	0.5857±0.0031 <sup>a</sup>	20.22±1.33 <sup>bc</sup>	0.2780±0.0017 <sup>a</sup>
1.5 h					
1%	48.18±4.24 <sup>ab</sup>	0.8947±0.0105 <sup>abc</sup>	0.5953±0.0021 <sup>a</sup>	25.68±2.49 <sup>a</sup>	0.2783±0.0025 <sup>a</sup>
2%	47.61±3.97 <sup>ab</sup>	0.8810±0.0085 <sup>bcd</sup>	0.6050±0.0035 <sup>a</sup>	25.38±2.06 <sup>ab</sup>	0.2863±0.0051 <sup>a</sup>
3.0 h					
1%	45.05±2.12 <sup>ab</sup>	0.8750±0.0036 <sup>cd</sup>	0.5977±0.0142 <sup>a</sup>	23.54±1.03 <sup>ab</sup>	0.2803±0.0114 <sup>a</sup>
2%	41.27±5.73 <sup>ab</sup>	0.9067±0.0110 <sup>a</sup>	0.5837±0.0031 <sup>a</sup>	21.85±3.17 <sup>ab</sup>	0.2637±0.0040 <sup>a</sup>
4.5 h					
1%	27.33±1.66 <sup>d</sup>	0.8593±0.0040 <sup>de</sup>	0.5850±0.0182 <sup>a</sup>	13.73±0.65 <sup>d</sup>	0.2650±0.0156 <sup>a</sup>
2%	48.57±3.11 <sup>a</sup>	0.9030±0.0053 <sup>ab</sup>	0.5983±0.0158 <sup>a</sup>	26.28±2.49 <sup>a</sup>	0.2857±0.0156 <sup>a</sup>
6.0 h					
1%	31.52±1.17 <sup>cd</sup>	0.8477±0.0121 <sup>e</sup>	0.5900±0.0127 <sup>a</sup>	15.76±0.43 <sup>cd</sup>	0.2680±0.0110 <sup>a</sup>
2%	43.68±2.20 <sup>ab</sup>	0.9007±0.0067 <sup>ab</sup>	0.5943±0.0140 <sup>a</sup>	23.37±0.83 <sup>ab</sup>	0.2770±0.0132 <sup>a</sup>
p-value	0.000	0.000	0.359	0.000	0.109
T	0.000	0.015	0.519	0.000	0.366
% AX	0.000	0.000	0.509	0.000	0.258
T * %AX	0.000	0.000	0.250	0.000	0.058

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX. Resultados expresados en N

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

A medida que el pan envejece, los cambios en su textura pueden deberse en gran parte al proceso de retrogradación del almidón, que contribuye al endurecimiento de la miga (Hayes *et al.*, 2020; Korompokis *et al.*, 2021). El objetivo de realizar

mediciones en diferentes días es capturar estos cambios y evaluar si la presencia de AX puede reducir la velocidad de endurecimiento, mejorando así la vida útil del pan y manteniendo sus características sensoriales durante un período más prolongado.

**Cuadro 17.** Perfil de textura de los panes en el día 6 desde su elaboración

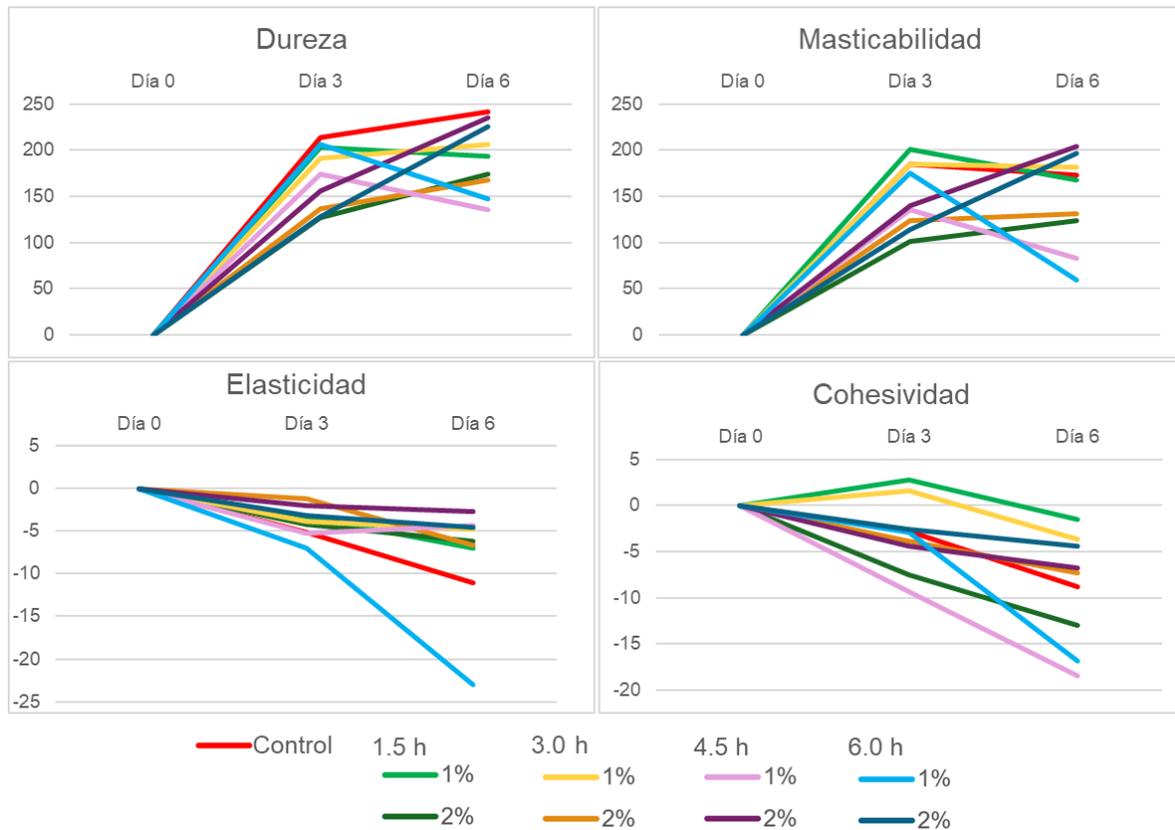
T/P	Dureza	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad	Resiliencia
C	42.54±1.24 <sup>c</sup>	0.8283±0.0093 <sup>ab</sup>	0.5493±0.0122 <sup>abc</sup>	19.34±0.39 <sup>c</sup>	0.2513±0.009 <sup>a</sup>
1.5 h					
1%	46.73±6.00 <sup>c</sup>	0.8597±0.0342 <sup>a</sup>	0.5707±0.0323 <sup>ab</sup>	22.83±2.35 <sup>bc</sup>	0.2573±0.0175 <sup>a</sup>
2%	57.58±3.69 <sup>ab</sup>	0.8630±0.0166 <sup>a</sup>	0.5690±0.0036 <sup>ab</sup>	28.29±2.18 <sup>ab</sup>	0.2553±0.0046 <sup>a</sup>
3.0 h					
1%	47.34±2.10 <sup>bc</sup>	0.8663±0.0162 <sup>a</sup>	0.5667±0.0061 <sup>ab</sup>	23.27±1.41 <sup>bc</sup>	0.2553±0.0092 <sup>a</sup>
2%	46.79±4.43 <sup>c</sup>	0.8567±0.0277 <sup>ab</sup>	0.5630±0.0050 <sup>ab</sup>	22.60±2.63 <sup>bc</sup>	0.2487±0.0040 <sup>a</sup>
4.5 h					
1%	23.44±3.01 <sup>d</sup>	0.8577±0.1465 <sup>ab</sup>	0.5260±0.0229 <sup>bc</sup>	10.65±2.06 <sup>d</sup>	0.2123±0.0127 <sup>b</sup>
2%	63.75±4.34 <sup>a</sup>	0.8967±0.0108 <sup>a</sup>	0.5833±0.0015 <sup>a</sup>	33.34±2.14 <sup>a</sup>	0.2743±0.0055 <sup>a</sup>
6.0 h					
1%	25.42±1.82 <sup>d</sup>	0.7027±0.0452 <sup>b</sup>	0.5057±0.0302 <sup>c</sup>	9.10±1.70 <sup>d</sup>	0.2013±0.0193 <sup>b</sup>
2%	62.29±3.46 <sup>a</sup>	0.8873±0.0202 <sup>a</sup>	0.5837±0.0055 <sup>a</sup>	32.27±2.32 <sup>a</sup>	0.2683±0.0055 <sup>a</sup>
p-value	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000
T	0.004	0.104	0.115	0.008	0.022
% AX	0.000	0.034	0.000	0.000	0.000
T * %AX	0.000	0.037	0.002	0.000	0.000

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX. Resultados expresados en N

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

Los gráficos en la Figura 12 se confeccionaron a partir de los datos de los Cuadros 15 y 16 como una herramienta para facilitar la comprensión de los cambios en los parámetros de textura. Muestran la variación de diferentes atributos de textura (dureza, masticabilidad, elasticidad o esponjosidad y cohesividad) en función del tiempo (día 0, 3 y 6) representada como porcentajes de incremento o decremento. Este gráfico muestra que la dureza de las muestras aumenta considerablemente del Día 0 al Día 3 en todos los tratamientos, estabilizándose o aumentando ligeramente hacia el Día 6. Todos los panes con AX muestran menores aumentos en la dureza en comparación con el control, lo que sugiere que los tratamientos pueden reducir el endurecimiento de las muestras con el tiempo, alargando su vida útil. Entre los tratamientos se observa que en los panes con 2 % de AX es menor el incremento de

la dureza hacia el tercer día.



**Figura 12.** Variación de las variables de textura, representada como porcentajes.

La masticabilidad sigue un patrón similar al de la dureza, solo los tratamientos de 1.5 y 3.0 h al 1 % muestran un aumento superior al control al tercer día. El tratamiento de 6.0 h y 1% muestra una menor masticabilidad en comparación con otros, lo cual podría indicar que el procesamiento más prolongado reduce la resistencia al masticado en las muestras.

La esponjosidad muestra una disminución a lo largo de los días para todos los tratamientos, especialmente en el tratamiento de 6.0 h al 1%, que presenta la mayor caída en esponjosidad incluso superior al control; el resto de los tratamientos presenta una disminución menor al control. Esto indica que la adición de AX impacta en la elasticidad de las muestras, posiblemente por una menor compactación o pérdida de aire en la estructura.

La cohesividad presenta variaciones moderadas, pero tiende a disminuir a medida que pasan los días, muestra una leve variación entre los días y tratamientos, manteniéndose cerca de la línea base en la mayoría de los casos, aunque se observa una disminución significativa en el Día 6 en algunos tratamientos. Esta disminución en cohesividad indica que las muestras tienden a perder integridad estructural con el tiempo, sobre todo cuando se emplean condiciones más intensas de procesamiento para la extracción del AX.

La adición de AX puede retardar el incremento de la dureza y masticabilidad y reducir la pérdida de la esponjosidad y cohesividad, lo que podría impactar positivamente en la calidad del producto en términos de textura y su conservación durante el almacenamiento.

Los AX son componentes de la fibra dietética no digerible que han demostrado tener efectos beneficiosos en la calidad del pan, especialmente en relación con su textura. Los panes fortificados con AX, especialmente los de alto peso molecular, presentan una miga más suave y menos firmeza durante el almacenamiento ((Wang *et al.*, 2019). Los AX inhiben parcialmente la gelatinización del almidón y reducen la retrogradación a corto plazo, lo que contribuye a una textura más suave del pan (Saeed *et al.*, 2011).

Este análisis es fundamental para la industria de panificación, ya que permite comprender la relación entre los ingredientes funcionales como los AX y la calidad de los productos a lo largo de su vida útil, favoreciendo así el desarrollo de productos de panificación más frescos y duraderos.

#### **4.7 Análisis de Imagen de la Miga**

El análisis de la estructura de la miga de los productos horneados mediante técnicas de imagen es una herramienta útil para la caracterización precisa de sus propiedades texturales y mecánicas (Moussawi *et al.*, 2014; Dewaest *et al.*, 2018; Onipe *et al.*, 2020). Este enfoque permite una caracterización detallada de la estructura celular de la miga, lo cual es fundamental para entender y controlar las propiedades texturales y mecánicas del pan y lograr la optimización de procesos de producción y el desarrollo de nuevos productos (Baravalle *et al.*, 2015; Scheuer *et al.*, 2015; Amigo *et*



**Cuadro 18.** Parámetros de la miga obtenidos mediante el análisis de imagen.

Rebanada	Porosidad (%)	Densidad (#Celdas/cm <sup>2</sup> )	Tamaño medio (mm <sup>2</sup> )
Control	17.50±1.57 <sup>a</sup>	5.25±0.43 <sup>a</sup>	3.37±0.38 <sup>a</sup>
1.5 h			
1%	11.26±1.59 <sup>abc</sup>	4.08±0.14 <sup>a</sup>	2.83±0.40 <sup>ab</sup>
2%	8.53±0.47 <sup>c</sup>	3.83±0.58 <sup>a</sup>	2.25±0.24 <sup>bc</sup>
3.0 h			
1%	15.18±3.23 <sup>ab</sup>	5.33±0.88 <sup>a</sup>	2.84±0.43 <sup>ab</sup>
2%	8.79±2.33 <sup>c</sup>	5.00±1.75 <sup>a</sup>	1.79±0.14 <sup>c</sup>
4.5 h			
1%	14.16±3.56 <sup>abc</sup>	6.00±0.90 <sup>a</sup>	2.34±0.29 <sup>bc</sup>
2%	8.77±2.52 <sup>c</sup>	4.08±1.44 <sup>a</sup>	2.18±0.22 <sup>bc</sup>
6.0 h			
1%	10.73±1.39 <sup>bc</sup>	4.58±0.88 <sup>a</sup>	2.36±0.14 <sup>bc</sup>
2%	10.92±0.88 <sup>bc</sup>	4.92±0.14 <sup>a</sup>	2.23±0.24 <sup>bc</sup>
p-value	0.001	0.174	0.000
T	0.434	0.189	0.333
% AX	0.001	0.200	0.001
T * %AX	0.090	0.275	0.037

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-c</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

Los tratamientos con 1 % de AX de menor tiempo de extracción muestran una porosidad menor que el control, pero aún moderada y sin diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ); el tratamiento al 1 % para 6.0 h ya difiere del control. Por otro lado, todos los tratamientos con 2 % reducen significativamente la porosidad para todos los tiempos de extracción. Esto sugiere que una mayor concentración de AX comprime la estructura de la miga, haciéndola menos aireada.

El tamaño de las celdas varía en función de la interacción entre los factores y el porcentaje de AX. A partir de un 1 % de AX, se observó una disminución progresiva en el tamaño de las celdas. Los tratamientos con 2 % de AX generaron celdas considerablemente más pequeñas en todos los tiempos ( $p \leq 0.05$ ), lo cual sugiere una menor expansión durante la elaboración del pan. El tratamiento de 3.0 h con 2 %

presenta uno de los tamaños más pequeños, lo que indica una compresión más marcada de la miga con menor contenido de aire. Estas observaciones pueden ser útiles en la optimización de la formulación y el proceso de productos horneados, dependiendo de si se busca una miga más esponjosa o compacta.

Los AX interactúan con las proteínas y el almidón durante la cocción, formando complejos que pueden influir en la estructura de la miga del pan. Estas interacciones pueden mejorar o dificultar la calidad del pan dependiendo de la masa molecular del AX y solubilidad (Buksa, 2016; Döring *et al.*, 2017; Buksa & Krystyjan, 2019; Espinosa-Ramírez *et al.*, 2020).

#### 4.8 Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante del Pan

El Cuadro 19 muestra el contenido de fenoles totales en función de los extractos de compuestos fenólicos libres, ligados y totales para los diferentes tratamientos.

**Cuadro 19.** Contenido de fenoles totales del pan

Tratamiento	Contenido de fenoles totales (mgEAF/100g)		
	Fenoles Libres	Fenoles Ligados	Fenoles Totales
Control	2.7122±0.1044 <sup>b</sup>	0.1094±0.0029 <sup>e</sup>	2.8216±0.1072 <sup>d</sup>
1.5 h			
1%	2.3892±0.1181 <sup>b</sup>	0.4318±0.0278 <sup>abc</sup>	2.8210±0.1181 <sup>d</sup>
2%	3.7788±0.4155 <sup>a</sup>	0.3030±0.0093 <sup>cd</sup>	4.0818±0.4102 <sup>a</sup>
3.0 h			
1%	2.7276±0.1759 <sup>b</sup>	0.5120±0.0058 <sup>ab</sup>	3.2395±0.1817 <sup>cd</sup>
2%	3.4659±0.0619 <sup>a</sup>	0.4083±0.0193 <sup>bc</sup>	3.8742±0.0790 <sup>ab</sup>
4.5 h			
1%	2.6008±0.0181 <sup>b</sup>	0.2968±0.0201 <sup>cd</sup>	2.8976±0.0306 <sup>d</sup>
2%	3.5558±0.1795 <sup>a</sup>	0.4579±0.0352 <sup>abc</sup>	4.0136±0.1932 <sup>a</sup>
6.0 h			
1%	2.7864±0.2456 <sup>b</sup>	0.5821±0.1671 <sup>a</sup>	3.3685±0.2247 <sup>bcd</sup>
2%	3.5434±0.0936 <sup>a</sup>	0.1698±0.0054 <sup>de</sup>	3.7131±0.0931 <sup>abc</sup>
p-value	0.000	0.000	0.000
T	0.781	0.065	0.065
% AX	0.000	0.000	0.000
T * %AX	0.022	0.000	0.000

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-e</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

El análisis estadístico muestra que la interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje AX tiene efectos significativos ( $p \leq 0.05$ ) en los fenoles libres, ligados y totales. Los resultados sugieren que un mayor porcentaje de AX es el factor más influyente en el contenido de fenoles totales, especialmente en los fenoles libres.

El contenido de fenoles libres aumenta significativamente ( $p \leq 0.05$ ) al aumentar el porcentaje de AX, los tratamientos de 2% de adición tienden a mostrar valores más altos de fenoles libres comparados con los de 1% y el control. Todos los tratamientos presentaron mayor contenido de fenoles ligados respecto al control. En cuanto al contenido de fenoles totales, en todos los panes con AX fue mayor al control, especialmente en los tratamientos con 2 % de AX.

Los Cuadros 20 y 21 presentan la capacidad antioxidante de los tratamientos de pan evaluada mediante el método DPPH y ABTS, respectivamente, para los extractos de fenoles libres y fenoles ligados, así como su totalidad.

**Cuadro 20.** Capacidad antioxidante mediante el método DPPH

Tratamiento	DPPH ( $\mu\text{mol ET}/100\text{g de salvado}$ )		
	Fenoles Libres	Fenoles Ligados	Fenoles Totales
Control	181.89 $\pm$ 9.98 <sup>d</sup>	67.95 $\pm$ 8.02 <sup>cd</sup>	249.83 $\pm$ 13.74 <sup>c</sup>
1.5 h			
1%	228.83 $\pm$ 6.59 <sup>cd</sup>	162.43 $\pm$ 2.88 <sup>ab</sup>	391.27 $\pm$ 5.18 <sup>b</sup>
2%	369.50 $\pm$ 18.03 <sup>ab</sup>	91.17 $\pm$ 12.58 <sup>bcd</sup>	460.67 $\pm$ 28.87 <sup>ab</sup>
3.0 h			
1%	231.09 $\pm$ 12.44 <sup>cd</sup>	183.00 $\pm$ 6.26 <sup>a</sup>	414.10 $\pm$ 16.93 <sup>ab</sup>
2%	374.50 $\pm$ 17.32 <sup>a</sup>	97.83 $\pm$ 14.63 <sup>bcd</sup>	472.33 $\pm$ 16.07 <sup>ab</sup>
4.5 h			
1%	265.66 $\pm$ 17.92 <sup>bc</sup>	90.04 $\pm$ 7.59 <sup>bcd</sup>	355.70 $\pm$ 25.02 <sup>b</sup>
2%	401.17 $\pm$ 2.89 <sup>a</sup>	134.50 $\pm$ 31.23 <sup>abc</sup>	535.67 $\pm$ 34.03 <sup>a</sup>
6.0 h			
1%	264.93 $\pm$ 10.05 <sup>bcd</sup>	150.57 $\pm$ 7.99 <sup>ab</sup>	415.51 $\pm$ 2.87 <sup>ab</sup>
2%	382.83 $\pm$ 7.64 <sup>a</sup>	42.83 $\pm$ 30.55 <sup>d</sup>	425.67 $\pm$ 32.53 <sup>ab</sup>
p-value	0.000	0.000	0.003
T	0.001	0.003	0.197
% AX	0.000	0.000	0.000
T * %AX	0.341	0.000	0.000

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-d</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar (n=3)

**Cuadro 21.** Capacidad antioxidante mediante el método ABTS

Tratamiento	ABTS ( $\mu\text{mol ET}/100\text{g de salvado}$ )		
	Fenoles Libres	Fenoles Ligados	Fenoles Totales
Control	458.67 $\pm$ 17.60 <sup>e</sup>	146.79 $\pm$ 11.00 <sup>cd</sup>	605.46 $\pm$ 15.40 <sup>f</sup>
1.5 h			
1%	558.46 $\pm$ 5.89 <sup>d</sup>	290.64 $\pm$ 14.31 <sup>a</sup>	849.10 $\pm$ 8.42 <sup>e</sup>
2%	946.94 $\pm$ 15.49 <sup>ab</sup>	193.61 $\pm$ 11.71 <sup>bc</sup>	1140.56 $\pm$ 21.10 <sup>b</sup>
3.0 h			
1%	553.21 $\pm$ 18.91 <sup>d</sup>	329.88 $\pm$ 22.52 <sup>a</sup>	883.08 $\pm$ 40.44 <sup>de</sup>
2%	961.94 $\pm$ 10.05 <sup>b</sup>	224.72 $\pm$ 6.74 <sup>b</sup>	1186.67 $\pm$ 7.26 <sup>ab</sup>
4.5 h			
1%	617.82 $\pm$ 8.46 <sup>c</sup>	229.04 $\pm$ 10.18 <sup>b</sup>	846.86 $\pm$ 9.57 <sup>e</sup>
2%	975.28 $\pm$ 9.18 <sup>a</sup>	230.28 $\pm$ 28.00 <sup>b</sup>	1205.56 $\pm$ 32.59 <sup>a</sup>
6.0 h			
1%	621.66 $\pm$ 2.91 <sup>c</sup>	288.25 $\pm$ 15.06 <sup>a</sup>	909.90 $\pm$ 13.34 <sup>d</sup>
2%	933.06 $\pm$ 8.22 <sup>b</sup>	128.06 $\pm$ 18.43 <sup>d</sup>	1061.11 $\pm$ 13.47 <sup>c</sup>
p-value	0.000	0.000	0.000
T	0.000	0.000	0.003
% AX	0.000	0.000	0.000
T * %AX	0.000	0.000	0.000

T = tiempo de extracción. % AX = porcentaje de AX. T \* %AX = interacción entre el tiempo de extracción y el porcentaje de AX.

<sup>a-f</sup> Diferentes letras en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los valores están reportados como media  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ )

Los resultados obtenidos mediante ambos métodos muestran una correspondencia entre sí; sin embargo, el método ABTS se destacó por su mayor sensibilidad en la detección de la capacidad antioxidante. Esta precisión adicional permitió definir con mayor claridad los niveles de antioxidantes en cada tratamiento, al detectar diferencias significativas entre tratamientos de manera más marcada. Esto permitió realizar una comparación detallada y determinar las condiciones óptimas para maximizar la actividad antioxidante en las muestras analizadas.

La interacción del tiempo de extracción de los AX con su porcentaje de adición en la formulación fue determinante en la capacidad antioxidante de los panes ( $p \leq 0.05$ ). Los valores de fenoles libres aumentan significativamente cuando se incrementa el porcentaje de adición de AX y el tiempo de tratamiento. Los resultados sugieren que un mayor tiempo de extracción, alcanzando el valor óptimo a las 4.5 h, y un mayor porcentaje de adición favorecen la liberación de compuestos fenólicos libres. El mayor

valor se obtuvo en el tratamiento con 2% de extracción durante 4.5 h ( $975.28 \pm 9.17$   $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ ), mientras que el valor más bajo se observó en el control sin tratamiento ( $458.67 \pm 17.60$   $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ ).

Los fenoles ligados presentan una capacidad antioxidante menor que los fenoles libres en todos los tratamientos. Los fenoles ligados varían dependiendo del tratamiento, con los valores más altos observados en el tratamiento de 1% de extracción a 3.0 h ( $329.88 \pm 22.51$   $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ ). A diferencia de los fenoles libres, el aumento del porcentaje de adición no siempre resultó en un incremento significativo en los fenoles ligados; de hecho, los valores más altos en algunos casos se observaron con el 1%. Esto sugiere que los fenoles ligados podrían ser menos susceptibles a cambios en el porcentaje de adición.

El tratamiento con 2 % de AX obtenido en 4.5 h alcanza el valor máximo de la capacidad antioxidante total ( $1205.5556 \pm 32.5889$   $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ ) mostrando una mejora significativa en comparación con el control ( $605.4558 \pm 15.4027$   $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ ). Los resultados indican que ajustar la cantidad de AX añadida y el tiempo de extracción son factores esenciales para potenciar la capacidad antioxidante del pan.

## CONCLUSIONES

1. El aumento del tiempo de extracción de los AX incrementa el rendimiento del proceso, pero disminuye su funcionalidad. Los AX obtenidos en 1.5 h presentan el mayor contenido de fenoles y capacidad antioxidante pero el menor rendimiento, mientras que con 4.5 h de extracción se obtiene AX con elevado rendimiento y buena funcionalidad.

2. La CAA se incrementa al aumentar el porcentaje de AX, alcanzando su valor máximo con el tratamiento de 4.5 h.

3. Los tratamientos con AX de menor tiempo de extracción en mayor concentración presentan mayores pérdidas de peso durante el horneado, lo que sugiere menor retención de humedad y alteración en la miga. En cambio, con tiempos de extracción más largos en concentraciones más bajas del AX mejora la retención de agua y la estabilidad de la estructura, optimizando la calidad del pan.

4. Al aumentar la concentración de AX, la corteza del pan tiende a volverse más oscura, con tonos más saturados y rojizos.

5. El porcentaje de AX tiene un impacto importante en la dureza y masticabilidad del pan. La adición de AX puede retardar el incremento de la dureza y masticabilidad y reducir la pérdida de la esponjosidad y cohesividad en el tiempo, lo que impacta positivamente en la calidad del producto en términos de textura y su conservación durante el almacenamiento.

6. La porosidad y el tamaño de las celdas de la miga del pan dependen de la concentración y el tiempo de extracción de los AX. Una mayor concentración de AX tiende a comprimir la estructura de la miga, reduciendo la expansión y la retención de aire.

7. La adición de AX incrementa el contenido de fenoles totales y potencia la capacidad antioxidante del pan, especialmente con los AX obtenidos en 4.5 h añadidos al 2 %.

## RECOMENDACIONES

- La adición de AX mejora la CAA en la masa, sin embargo, es necesario ajustar la cantidad de agua y el tiempo de reposo de la masa para optimizar las propiedades reológicas y mejorar los atributos de calidad del pan.
- Realizar estudios de la vida de anaquel en relación con la variación de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante del pan, así como en el perfil microbiológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguedo, M., Fournies, C., Dermience, M., & Richel, A. (2014). Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained.. *Carbohydrate polymers*, 105, 317-24. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.096>.
- Aguiar, S., Estrella, M. E., & Cabadiana, H. U. (2022). *Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento*. AXIOMA, 1(27), 5-11.
- Alimentarius, C. (2010). Codex alimentarius commission. *Toxicological evaluation of certain veterinary drug residues in food*. Disponible em:< <http://www.codexalimentarius.net/web/jecfa.jsp>>. Acesso em, 28.
- Amicucci, M., Nandita, E., Galermo, A., Castillo, J., Chen, S., Park, D., Smilowitz, J., German, J., Mills, D., & Lebrilla, C. (2020). *A nonenzymatic method for cleaving polysaccharides to yield oligosaccharides for structural analysis*. *Nature Communications*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17778-1>.
- Amigo, J., Olmo, A., Engelsen, M., Lundkvist, H., & Engelsen, S. (2021). *Staling of white wheat bread crumb and effect of maltogenic  $\alpha$ -amylases. Part 3: Spatial evolution of bread staling with time by near infrared hyperspectral imaging*. *Food chemistry*, 353, 129478 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129478>.
- Andersson, R., Fransson, G., Tietjen, M., & Åman, P. (2009). Content and molecular-weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 2004-2008.
- AOAC 2000, Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed.; Association of Official Analytical Chemistry: Gaithersburg, MD.
- Arciniegas-Cabrera, V. (2020). *Recuperación de compuestos bioactivos de subproductos de la industria alimentaria mediante el empleo de mezclas*

*etanol/agua presurizada* (Trabajo de fin de Máster, Universidad de Burgos).  
Repositorio Institucional – Universidad de Burgos.

Arroyo, S. (2016). *Consumo de fibra dietética en personas que padecen diabetes tipo 2 y son asistidos durante el mes de febrero del año 2016 en el servicio para la atención médica de la comunidad (SAMCO) Los Cardos* (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción del Uruguay--CRR).

Ayala-Soto, F., Serna-Saldívar, S., & Welti-Chanes, J. (2017). *Effect of arabinoxylans and laccase on batter rheology and quality of yeast-leavened gluten-free breads*. *Journal of Cereal Science*, 73, 10-17.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCS.2016.11.003>.

Ayala-Soto, F., Serna-Saldívar, S., García-Lara, S., & Pérez-Carrillo, E. (2014). *Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources*. *Food Hydrocolloids*, 35, 471-475. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2013.07.004>.

Balandrán-Quintana, R., Mercado-Ruiz, J., & Mendoza-Wilson, A. (2015). *Wheat Bran Proteins: A Review of Their Uses and Potential*. *Food Reviews International*, 31, 279 - 293. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1015137>.

Baravalle, R., Delrieux, C., & Gómez, J. (2015). *Multifractal characterisation and classification of bread crumb digital images*. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13640-015-0063-8>.

Bender, D., Regner, M., D'Amico, S., Jäger, H., Tömösközi, S., & Schoenlechner, R. (2018). *Effect of differently extracted arabinoxylan on gluten-free sourdough-bread properties*. *Journal of food quality*, 2018.

Berlanga-Reyes, C. M., Carvajal-Millan, E., Lizardi-Mendoza, J., Islas-Rubio, A. R., & Rascón-Chu, A. (2011). *Enzymatic cross-linking of alkali extracted arabinoxylans: Gel rheological and structural characteristics*. *International*

journal of molecular sciences, 12(9), 5853-5861.

- Bernal-Castro, C. A., Díaz-Moreno, C., & Gutiérrez-Cortés, C. (2017). Probióticos y prebióticos en matrices de origen vegetal: Avances en el desarrollo de bebidas de frutas. *Revista chilena de nutrición*, 44(4), 383-392.
- Bieniek, A., & Buksa, K. (2024). *The Influence of Arabinoxylans on the Properties of Wheat Bread Baked Using the Postponed Baking Method*. *Molecules*, 29(4), 904.
- Bijalwan, V., Ali, U., Kesarwani, A., Yadav, K., & Mazumder, K. (2016). Hydroxycinnamic acid bound arabinoxylans from millet brans-structural features and antioxidant activity.. *International journal of biological macromolecules*, 88, 296-305 . <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.03.069>.
- Birch, C. S., & Bonwick, G. A. (2019). Ensuring the future of functional foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(5), 1467-1485.
- Buksa, K. (2016). *Application of model bread baking in the examination of arabinoxylan-protein complexes in rye bread*. *Carbohydrate polymers*, 148, 281-9 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.071>.
- Buksa, K., & Krystyan, M. (2019). *Arabinoxylan-starch-protein interactions in specially modified rye dough during a simulated baking process*. *Food chemistry*, 287, 176-185 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.077>.
- Buksa, K., Ziobro, R., Nowotna, A., Adamczyk, G., Sikora, M., & Żylewski, M. (2014). Water Binding Capacity of Rye Flours with the Addition of Native and Modified Arabinoxylan Preparations. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 1083-1095.
- Chaquilla-Quilca, G., Balandrán-Quintana, R. R., Mendoza-Wilson, A. M., & Mercado-Ruiz, J. N. (2018). *Propiedades y posibles aplicaciones de las proteínas de*

*salvado de trigo*. CienciaUAT, 12(2), 137-147.

- Chen, H., Chen, Z., Fu, Y., Liu, J., Lin, S., Zhang, Q., Liu, Y., Wu, D., Lin, D., Han, G., Wang, L., & Qin, W. (2019). *Structure, Antioxidant, and Hypoglycemic Activities of Arabinoxylans Extracted by Multiple Methods from Triticale*. *Antioxidants*, 8. <https://doi.org/10.3390/antiox8120584>.
- Chinma, C. E., Ezeocha, V. C., Adedeji, O. E., Ayo-Omogie, H. N., Oganah-Ikujenyo, B. C., Anumba, N. L., & Adebo, O. A. (2023). Germinated Bambara groundnut (*Vigna subterranea*) flour as an ingredient in wheat bread: Physicochemical, nutritional, and sensory properties of bread. *Journal of Food Science*, 88(6), 2368-2384.
- Cuba Cuba, B., & Huicho Miguel, G. Y. (2024). Efecto de harina de trigo (*Triticum aestivum*), harina de chía (*Salvia hispanica* L.) y puré de plátano variedad seda (*Musa acuminata*) en la calidad de galletas enriquecidas (Tesis de grado, Universidad Nacional de San Cristóbal De Huamanga) <https://repositorio.unsch.edu.pe/>
- De Man, W., Chandran, C., Wouters, A., Radhakrishnan, S., Martens, J., Breynaert, E., & Delcour, J. (2022). Hydration of Wheat Flour Water-Unextractable Cell Wall Material Enables Structural Analysis of Its Arabinoxylan by High-Resolution Solid-State <sup>13</sup>C MAS NMR Spectroscopy.. *Journal of agricultural and food chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04087>.
- de Vries, H. P., Veer, E., & de Vries, K. V. (2018). An examination of SME social media use in the food industry. *Small Enterprise Research*, 25(3), 227-238.
- Delbianco, M., Kononov, A., Poveda, A., Yu, Y., Diercks, T., Jiménez-Barbero, J., & Seeberger, P. (2018). *Well-Defined Oligo- and Polysaccharides as Ideal Probes for Structural Studies*. *Journal of the American Chemical Society*, 140(16), 5421-5426 . <https://doi.org/10.1021/jacs.8b00254>.
- Demuth, T., Betschart, J., & Nyström, L. (2020). Structural modifications to water-

soluble wheat bran arabinoxylan through milling and extrusion.. Carbohydrate polymers, 240, 116328 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116328>.

Dewaest, M., VILLEMEJANE, C., BERLAND, S., NÉRON, S., CLEMENT, J., VÉREL, A., & MICHON, C. (2018). *Effect of crumb cellular structure characterized by image analysis on cake softness*. Journal of texture studies, 49 3, 328-338 . <https://doi.org/10.1111/jtxs.12303>.

Döring, C., Hussein, M., Jekle, M., & Becker, T. (2017). *On the assessments of arabinoxylan localization and enzymatic modifications for enhanced protein networking and its structural impact on rye dough and bread*. Food chemistry, 229, 178-187 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.053>.

Durmus, Y., Whitney, K., Anil, M., & Simsek, S. (2023). Enrichment of sourdough bread with hazelnut skin, cross-linked starch, or oxidized starch for improvement of nutritional quality. *Journal of Food Process Engineering*, e14361.

Espinosa-Ramírez, J., Garzón, R., Serna-Saldívar, S., & Rosell, C. (2020). *Exploring the potential of arabinoxylan as structuring agent in model systems for gluten-free yeast-leavened breads*. Journal of Cereal Science, 95, 103080. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103080>.

FAO (2023). Despilfarro de alimentos: datos y cifras clave. Disponible en: <https://www.fao.org/news/story/es/item/196450/icode/> (consultado el 10 de junio del 2024).

FAO (2024). Datos para el desarrollo: Cuaderno estadístico de la FAO 2024. Disponible en línea: <http://www.fao.org/publications/highlights-detail/en/c/1164465/> (consultado el 7 de abril del 2024).

FAO y OMS (2020). Dietas saludables sostenibles - Principios rectores. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca6640es> (consultado el 10 de junio del 2024).

Farkas, A., Szepesvári, P., Németh, R., Bender, D., Schoenlechner, R., & Tömösközi,

- S. (2021). Comparative study on the rheological and baking behaviour of enzyme-treated and arabinoxylan-enriched gluten-free straight dough and sourdough small-scale systems. *Journal of Cereal Science*, 101, 103292. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2021.103292>.
- Farooqui, A. A. (2015). Importance and Roles of Fiber in the Diet. *High Calorie Diet and the Human Brain: Metabolic Consequences of Long-Term Consumption*, 193-218.
- Fidalgo, A., & Miranda, J. (2023). Innovation in the Commercial System of the Small Bakery Industry. In *Baking Business Sustainability Through Life Cycle Management* (pp. 261-275). Cham: Springer International Publishing.
- Fuentes-Berrio, L., Acevedo-Correa, D., & Gelvez-Ordóñez, V. (2015). Alimentos funcionales: impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 13(2), 140-149.
- Gao, X., Ying, R., & Huang, M. (2021). Effects of lamellar organization and arabinoxylan substitution rate on the properties of films simulating wheat grain aleurone cell wall. *Carbohydrate polymers*, 270, 117819. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.117819>.
- Garmendia-Belascoain, M. (2021). *Estimación de la generación de residuos y subproductos en la industria alimentaria en Navarra* (Tesis de Grado, Universidad Pública de Navarra) <https://academica-e.unavarra.es/>
- Geyik, Ö. G., Tekin-Cakmak, Z. H., Shamanin, V. P., Karasu, S., Pototskaya, I. V., Shepelev, S. S & Koxsel, H. (2023). *Effects of phenolic compounds of colored wheats on colorectal cancer cell lines*. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 15(4), 21-31.
- Ghiasi, F., Golmakani, M., Eskandari, M., & Hosseini, S. (2020). *A new approach in the hydrophobic modification of polysaccharide-based edible films using*

*structured oil nanoparticles*. *Industrial Crops and Products*.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112679>.

Gill, S. K., Rossi, M., Bajka, B., & Whelan, K. (2021). Dietary fibre in gastrointestinal health and disease. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(2), 101-116.

Golchin, F., Movahhed, S., Eshaghi, M., & Chenarbon, H. (2020). *Mathematical modeling of weight loss and crust temperature of toast bread containing guar gum during baking process*. *Food Science & Nutrition*, 9, 272 - 281.  
<https://doi.org/10.1002/fsn3.1993>.

González-Martínez, M. F., González-Martínez, K. P., González-Cabello, M. D., Plascencia-Esquivias, Y. Y., Chávez-Esparza, A., Ramírez-Herna, L. A., & del Campo Cervantes, J. M. (2022). *Efecto de una barra alimenticia sobre los niveles séricos de glucosa*. *Lux Médica*, 17(49).

Guiné, R. P., Florença, S. G., Barroca, M. J., & Anjos, O. (2020). The link between the consumer and the innovations in food product development. *Foods*, 9(9), 1317.

Guo, M., Du, J., Zhang, K., & Jin, Y. (2014). Content and molecular weight of water-extractable arabinoxylans in wheat malt and wheat malt-based wort with different Kolbach indices.. *Journal of the science of food and agriculture*, 94 13, 2794-800 . <https://doi.org/10.1002/jsfa.6631>.

Guo, R., Xu, Z., Wu, S., Li, X., Li, J., Hu, H., Wu, Y., & Ai, L. (2019). Molecular properties and structural characterization of an alkaline extractable arabinoxylan from hull-less barley bran.. *Carbohydrate polymers*, 218, 250-260 .  
<https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.04.093>.

Guo, X., Yang, S., & Zhu, K. (2018). Impact of arabinoxylan with different molecular weight on the thermo-mechanical, rheological, water mobility and microstructural characteristics of wheat dough. *International Journal of Food*

Science & Technology, 53, 2150–2158. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13802>.

Hayes, A., Okoniewska, M., Martinez, M., Zhao, B., & Hamaker, B. (2020). Investigating the potential of slow-retrograding starches to reduce staling in soft savory bread and sweet cake model systems.. *Food research international*, 138 Pt A, 109745 . <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109745>.

He, H., Qiao, J., Liu, Y., Guo, Q., Ou, X., & Wang, X. (2021). *Isolation, Structural, Functional, and Bioactive Properties of Cereal Arabinoxylan - A Critical Review*. Journal of agricultural and food chemistry. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04506>.

Hell, J., Donaldson, L., Michlmayr, H., Kraler, M., Kneifel, W., Potthast, A., Rosenau, T., & Böhmendorfer, S. (2015). Effect of pretreatment on arabinoxylan distribution in wheat bran.. *Carbohydrate polymers*, 121, 18-26 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.007>.

Hemdane, S., Jacobs, P., Dornez, E., Verspreet, J., Delcour, J., & Courtin, C. (2016). *Wheat (Triticum aestivum L.) Bran in Bread Making: A Critical Review*. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15 (1), 28-42 . <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12176>.

Hernández-Espinosa, N., Romano, G., Crespo-Herrera, L., Singh, R., Guzmán, C., & Ibba, M. (2020). Endogenous arabinoxylans variability in refined wheat flour and its relationship with quality traits. *Journal of Cereal Science*, 95, 103062. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103062>.

Herrera-Balandrano, D. D. (2019). Evaluación funcional y antioxidante de arabinoxilanos ferulados extraídos de pericarpio de maíz (*zea mays* L.) obtenidos bajo diferentes condiciones de extracción alcalina (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma Nuevo León).

Herrera-Balandrano, D., Báez-González, J., Carvajal-Millan, E., Muy-Rangel, D., Urías-Orona, V., Martínez-López, A., Marquez-Escalante, J., Heredia, J.,

- Beta, T., & Niño-Medina, G. (2018). Alkali-Extracted Feruloylated Arabinoxylans from Nixtamalized Maize Bran Byproduct: A Synonymous with Soluble Antioxidant Dietary Fiber. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 403-409. <https://doi.org/10.1007/S12649-018-0462-Z>.
- Hipolito, C. A. G., & Caballero, B. L. (2022). *Métodos de extracción de proteína y sus aplicaciones en el mejoramiento nutricional de productos Agroindustriales*. *Journal of Agro-industry Sciences*, 4(3), 133-140.
- Hou, C., Zhao, X., Tian, M., Zhou, Y., Yang, R., Gu, Z., & Wang, P. (2020). Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food chemistry*, 318, 126477.
- Huang, M., Bai, J., Buccato, D., Zhang, J., He, Y., Zhu, Y., Yang, Z., Xiao, X., & Daglia, M. (2024). Cereal-Derived Water-Unextractable Arabinoxylans: Structure Feature, Effects on Baking Products and Human Health. *Foods*, 13. <https://doi.org/10.3390/foods13152369>.
- Hussain, M., Saeed, F., Niaz, B., Imran, A., & Tufail, T. (2022). *Biochemical and Structural Characterization of Ferulated Arabinoxylans Extracted from Nixtamalized and Non-Nixtamalized Maize Bran*. *Foods*, 11. <https://doi.org/10.3390/foods11213374>.
- INEGI (2023). Encuesta mensual de la industria manufacturera (EMIM). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/>
- Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. Por un plan de rescate para las personas y el planeta (2023). Disponible en: [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf)
- Izydorczyk, M., & Biliaderis, C. (1995). Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 28, 33-48.

[https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00077-1).

- Kale, M., Hamaker, B., & Campanella, O. (2013). Alkaline extraction conditions determine gelling properties of corn bran arabinoxylans. *Food Hydrocolloids*, 31, 121-126. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2012.09.011>.
- Kale, M., Yadav, M., Chau, H., & Hotchkiss, A. (2018). Molecular and functional properties of a xylanase hydrolysate of corn bran arabinoxylan.. *Carbohydrate polymers*, 181, 119-123 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.008>.
- Kamel, R., Afifi, S., Kassem, I., Elkasabgy, N., & Farag, M. (2020). *Arabinoxylan and rhamnogalacturonan mucilage: Outgoing and potential trends of pharmaceutical, environmental, and medicinal merits*. *International journal of biological macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.175>.
- Katilevičiūtė, A., Plakys, G., Budrevičiūtė, A., Onder, K., Damiani, S., & Kodzius, R. (2019). *A Sight to Wheat Bran: High Value-Added Products*. *Biomolecules*, 9. <https://doi.org/10.3390/biom9120887>.
- Katsirma, Z., Dimidi, E., Rodriguez-Mateos, A., & Whelan, K. (2021). Fruits and their impact on the gut microbiota, gut motility and constipation. *Food & function*, 12(19), 8850-8866.
- Khalighi, S., Berger, R. G., & Ersoy, F. (2019). Cross-linking of wheat bran arabinoxylan by fungal laccases yields firm gels. *Processes*, 8(1), 36.
- Khater, E., & Bahnasawy, A. (2014). *Heat and Mass Balance for Baking Process*. *Journal of bioprocessing & biotechniques*, 4, 1-6. <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000190>.
- Koegelenberg, D. (2016). *Arabinoxylan as partial flour replacer: The effect on bread properties and economics of bread making* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Koegelenberg, D., & Chimphango, A. (2017). *Effects of wheat-bran arabinoxylan as*

*partial flour replacer on bread properties*. *Food chemistry*, 221, 1606-1613 .  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.130>.

Korompokis, K., Deleu, L., Brier, N., & Delcour, J. (2021). Investigation of starch functionality and digestibility in white wheat bread produced from a recipe containing added maltogenic amylase or amylomaltase.. *Food chemistry*, 362, 130203 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130203>.

Królak, M., Górská-Warsewicz, H., Mądra-Sawicka, M., Rejman, K., Żakowska-Biemans, S., Szlachciuk, J., & Wojtaszek, M. (2022). Towards sustainable innovation in the bakery Sector—An example of fibre-enriched bread. *Sustainability*, 14(5), 2743.

Kumar, N., & Goel, N. (2019). *Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications*. *Biotechnology Reports*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00370>.

Küster-Boluda, I., & Vidal-Capilla, I. (2017). Consumer attitudes in the election of functional foods. *Spanish Journal of Marketing-ESIC*, 21, 65-79.

Laddomada, B., Caretto, S., & Mita, G. (2015). *Wheat Bran Phenolic Acids: Bioavailability and Stability in Whole Wheat-Based Foods*. *Molecules*, 20, 15666 - 15685. <https://doi.org/10.3390/molecules200915666>.

Lee, Z. J., Xie, C., Duan, X., Ng, K., & Suleria, H. A. (2024). Optimization of Ultrasonic Extraction Parameters for the Recovery of Phenolic Compounds in Brown Seaweed: Comparison with Conventional Techniques. *Antioxidants*, 13(4), 409.

Leys, S., Bondt, Y., Bosmans, G., & Courtin, C. (2020). *Assessing the impact of xylanase activity on the water distribution in wheat dough: A <sup>1</sup>H NMR study*. *Food chemistry*, 325, 126828. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126828>.

- Li, J., Kang, J., Wang, L., Li, Z., Wang, R., Chen, Z., & Hou, G. (2012). *Effect of water migration between arabinoxylans and gluten on baking quality of whole wheat bread detected by magnetic resonance imaging (MRI)*. Journal of agricultural and food chemistry, 60 26, 6507-14 . <https://doi.org/10.1021/jf301195k>.
- Li, L., , S., Fan, L., Zhang, C., Xiaoqing, P., Zheng, X., & Wang, X. (2016). The influence of ultrasonic modification on arabinoxylans properties obtained from wheat bran. International Journal of Food Science and Technology, 51, 2338-2344. <https://doi.org/10.1111/IJFS.13239>.
- Li, L., Wang, Y., Zhang, T., Zhang, J., Pan, M., Huang, X., Yin, J., & Nie, S. (2020). Structural characteristics and rheological properties of alkali-extracted arabinoxylan from dehulled barley kernel.. Carbohydrate polymers, 249, 116813 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116813>.
- Lin, S., Agger, J. W., Wilkens, C., & Meyer, A. S. (2021). Feruloylated arabinoxylan and oligosaccharides: chemistry, nutritional functions, and options for enzymatic modification. Annual review of food science and technology, 12(1), 331-354.
- Liu, L., Sun, Y., Yue, Y., Yang, J., Chen, L., Ashraf, J., Wang, L., Zhou, S., & Tong, L. (2020). Composition and foam properties of whole wheat dough liquor as affected by xylanase and glucose oxidase. Food Hydrocolloids, 108, 106050. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106050>.
- Maes, C., & Delcour, J. (2002). Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran.. Journal of Cereal Science, 35, 315-326. <https://doi.org/10.1006/JCRS.2001.0439>.
- Maity, G., Maity, P., Dasgupta, A., Acharya, K., Dalai, S., & Mondal, S. (2019). *Structural and antioxidant studies of a new arabinoxylan from green stem Andrographis paniculata (Kalmegh)*. Carbohydrate polymers, 212, 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.051>.
- Marcotuli, I., Hsieh, Y., Lahnstein, J., Yap, K., Burton, R., Blanco, A., Fincher, G., &

- Gadaleta, A. (2016). Structural Variation and Content of Arabinoxylans in Endosperm and Bran of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L.).. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64 14, 2883-92 .  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00103>.
- Marquez-Escalante, J., Carvajal-Millan, E., Martínez-López, A., Martínez-Robinson, K., Campa-Mada, A., & Rascón-Chu, A. (2023). *Fine structural features and antioxidant capacity of ferulated arabinoxylans extracted from nixtamalized maize bran*. *Journal of the science of food and agriculture*.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.12531>.
- Marquez-Escalante, J., Carvajal-Millan, E., Yadav, M., Kale, M., Rascón-Chu, A., Gardea, A., Valenzuela-Soto, E., López-Franco, Y., Lizardi-Mendoza, J., & Faulds, C. (2018). Rheology and microstructure of gels based on wheat arabinoxylans enzymatically modified in arabinose to xylose ratio.. *Journal of the science of food and agriculture*, 98 3, 914-922 .  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.8537>.
- Matsumura, Y., Kitabatake, M., Kayano, S., & Ito, T. (2023). *Dietary Phenolic Compounds: Their Health Benefits and Association with the Gut Microbiota*. *Antioxidants*, 12. <https://doi.org/10.3390/antiox12040880>.
- Mau, J. L., Lee, C. C., Yang, C. W., Chen, R. W., Zhang, Q. F., & Lin, S. D. (2020). Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of bread partially substituted with aerial parts of sweet potato. *LWT*, 117, 108602.
- Meléndez-Sosa, M. F., García-Barrales, A. M., & Ventura-García, N. A. (2020). Perspectivas e impacto en la salud del consumo de los alimentos funcionales y nutraceuticos en México. *RD-ICUAP*, 6(1), 114-136.
- Mense, A., & Shi, Y. (2018). Dissolution of Wheat Bran by NaOH/Urea Solutions and Structure of Soluble Materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B04707>.

- Messia, M., Reale, A., Maiuro, L., Candigliota, T., Sorrentino, E., & Marconi, E. (2016). *Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics*. Journal of Cereal Science, 69, 138-144. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2016.03.004>.
- Mickiewicz, B., & Britchenko, I. (2022). *Main trends and development forecast of bread and bakery products market*. VUZF Review. <https://doi.org/10.38188/2534-9228.22.3.11>.
- Mildner-Szkudlarz, S., Róžańska, M., Piechowska, P., Waśkiewicz, A., & Zawirska-Wojtasiak, R. (2019). *Effects of polyphenols on volatile profile and acrylamide formation in a model wheat bread system*. Food chemistry, 297, 125008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125008>.
- Minta-Quiroga, M. G. (2024). *Evaluación del comportamiento agronómico de cuatro líneas promisorias y una variedad de trigo (triticum aestivum l.) del INIAP (segundo año) bajo las condiciones agroclimáticas de la Universidad Técnica de Cotopaxi 2023-2024* (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- Miteluț, A., Popa, E., Popescu, P., & Popa, M. (2021). *Trends of innovation in bread and bakery production*. Agricultural and Food Sciences, 199-226. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821048-2.00007-6>.
- Morales-Ortega, A., Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Gardea-Béjar, A., Torres-Chávez, P., López-Franco, Y. & Lizardi-Mendoza, J. (2013). *Los arabinoxilanos ferulados de cereales: Una revisión de sus características fisicoquímicas y capacidad gelificante*. Revista fitotecnia mexicana, 36(4), 439-446.
- Mosińska, P., Martín-Ruiz, M., González, A., López-Miranda, V., Herradón, E., Uranga, J. A., & Abalo, R. (2019). Changes in the diet composition of fatty acids and fiber affect the lower gastrointestinal motility but have no impact on

cardiovascular parameters: In vivo and in vitro studies. *Neurogastroenterology & Motility*, 31(9), e13651.

Mourão, L., Mendes, F., Sousa, F., Moreira, A., Medeiros, S., Bastos, M., Saraiva, G., Teixeira, A., & Moreira, R. (2023). Effect of Added Plant Hemicelluloses on the Stability of Frozen Bread Dough. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1155/2023/8893925>.

Moussawi, A., Xu, J., Nouri, H., Guessasma, S., & Lubineau, G. (2014). *Volume digital image correlation to assess displacement field in compression loaded bread crumb under X-ray microtomography*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 25, 78-87. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2014.02.002>.

Mudgil, D. (2017). The interaction between insoluble and soluble fiber. In *Dietary fiber for the prevention of cardiovascular disease* (pp. 35-59). Academic Press.

Nicolosi, A., Laganà, V. R., & Di Gregorio, D. (2023). Habits, Health and Environment in the Purchase of Bakery Products: Consumption Preferences and Sustainable Inclinations before and during COVID-19. *Foods*, 12(8), 1661.

Ning, L., Yao, Z., & Zhu, B. (2022). *Ulva (Enteromorpha) Polysaccharides and Oligosaccharides: A Potential Functional Food Source from Green-Tide-Forming Macroalgae*. *Marine Drugs*, 20. <https://doi.org/10.3390/md20030202>.

Niño-Medina, G., Carvajal-Millan, E., Rascón-Chu, A., Marquez-Escalante, J., Guerrero, V., & Salas-Muñoz, E. (2010). *Feruloylated arabinoxylans and arabinoxylan gels: structure, sources and applications*. *Phytochemistry Reviews*, 9, 111-120. <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9147-3>.

Niño-Medina, G., Muy-Rangel, D., Garza, A., Rubio-Carrasco, W., Pérez-Meza, B., Araujo-Chapa, A., Gutiérrez-Álvarez, K., & Urías-Orona, V. (2019). *Dietary Fiber from Chickpea (Cicer arietinum) and Soybean (Glycine max) Husk Byproducts as Baking Additives: Functional and Nutritional Properties*. *Molecules*, 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24050991>.

- Nishitsuji, Y., Whitney, K., Nakamura, K., Hayakawa, K., & Simsek, S. (2020). Changes in structure and solubility of wheat arabinoxylan during the breadmaking process. *Food Hydrocolloids*, 109, 106129.
- Novikova, Z., Sergeeva, S., & Mukhanov, E. (2021). *Design of bakery products for healthy nutrition using plant raw materials*. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-188-195>.
- Nurtiana, W., Najah, Z., & Syabana, M. A. (2023). The Effect of Beneng Taro Flour (*Xanthosoma undipes* K. Koch) and Rice Bran (*Oryza sativa* L.) Substitution on the Physical and Sensory Characteristics of Bread. *Journal of Nutrition Science*, 4(2), 74-82.
- Nweze, C. C., Nebechukwu, E. W., & Bawa, M. Y. (2021). Dietary fiber and risk of coronary heart diseases. *GSC Advanced Research and Reviews*, 9(3), 001-009.
- OMS (2022). Informe de las Naciones Unidas: las cifras del hambre en el mundo aumentaron hasta alcanzar los 828 millones de personas en 2021. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/06-07-2022-un-report--global-hunger-numbers-rose-to-as-many-as-828-million-in-2021> (consultado el 10 de junio del 2024).
- Onipe, O., Beswa, D., & Jideani, A. (2020). *Confocal Laser Scanning Microscopy and Image Analysis for Elucidating Crumb and Crust Microstructure of Bran-Enriched South African Fried Dough and Batter*. *Foods*, 9. <https://doi.org/10.3390/foods9050605>.
- ONU (2023) Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. Por un plan de rescate para las personas y el planeta (2023) Disponible en: [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf).

- Oracz, J., Nebesny, E., & Żyżelewicz, D. (2019). *Identification and quantification of free and bound phenolic compounds contained in the high-molecular weight melanoidin fractions derived from two different types of cocoa beans by UHPLC-DAD-ESI-HR-MSn*. *Food research international*, 115, 135-149 .  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.028>.
- Ordaz-Ortíz, J., & Saulnier, L. (2005). Structural variability of arabinoxylans from wheat flour. Comparison of water-extractable and xylanase-extractable arabinoxylans. *Journal of Cereal Science*, 42, 119-125.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCS.2005.02.004>.
- Ordaz-Rodríguez, S. B., Abadía-García, L., Femat-Díaz, A., & Mendoza-Sánchez, M. (2022). Aprendiendo a revalorizar los subproductos y su aplicación en productos cárnicos. *Epistemus (Sonora)*, 16(33), 55-62.
- Phimolsiripol, Y.; Schönlechner, R. (2023). Effect of Pomelo Albedo Dietary Fiber on the Quality of Bread. *Biology and Life Sciences Forum*, 26
- Pietiäinen, S., Jiménez-Quero, A., Moldin, A., Ström, A., Katina, K., & Langton, M. (2024). Feruloylation and hydrolysis of arabinoxylan extracted from wheat bran: Effect on bread quality and shelf-life. *Journal of Cereal Science*, 103920.
- Polizzi, C., Lynn, S. J., & Perry, A. (2020). Stress and coping in the time of COVID-19: Pathways to resilience and recovery. *Clinical neuropsychiatry*, 17(2), 59.
- Prakash, O., Baskaran, R., & Kudachikar, V. (2019). *Characterization, quantification of free, esterified and bound phenolics in Kainth (Pyrus pashia Buch.-Ham. Ex D.Don) fruit pulp by UPLC-ESI-HRMS/MS and evaluation of their antioxidant activity*. *Food chemistry*, 299, 125114 .  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125114>.
- Preciado-Saldaña, A. M., Ruiz-Canizales, J., Villegas-Ochoa, M. A., Domínguez-Avila, J. A., & González-Aguilar, G. A. (2022). *Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular*. *Revista*

Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 23(2), 92-99.

- Prueckler, M., Siebenhandl-Ehn, S., Apprich, S., Hoeltinger, S., Haas, C., Schmid, E., & Kneifel, W. (2014). *Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization*. *LWT-Food Science and Technology*, 56(2), 211-221.
- Ramírez Cortez, N. D. C. (2022). *Evaluación del comportamiento agronómico y calidad tecnológica de trigos (*Triticum aestivum* L. y *Triticum durum* L.) cultivados en La Ascensión, Aramberri, Nuevo León* (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Ramos-Enríquez, J. R. (2019). *Bioaccesibilidad del ácido ferúlico presente en salvado de trigo extrudido y su impacto sobre biomarcadores de obesidad asociados a inflamación en un modelo murino* (Tesis Doctoral, Universidad de Sonora).
- Rattan, O., Izydorczyk, M., & Biliaderis, C. (1994). Structure and Rheological Behaviour of Arabinoxylans from Canadian Bread Wheat Flours. *Lwt - Food Science and Technology*, 27, 550-555. <https://doi.org/10.1006/FSTL.1994.1108>.
- Raza, M. A., Saeed, F., Afzaal, M., Imran, A., Niaz, B., Hussain, M., ... & Al Jbawi, E. (2022). Comparative study of cross-and uncross-linked arabinoxylans extracted from maize bran with special reference to their structural and antioxidant potential. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2495-2504.
- Rizkaprilisa, W., Hapsari, M. W., Paramastuti, R., & Pebrianti, S. A. (2023). Improvement of Bread Nutrition With The Addition of Coffee Silverskin as a Source Of Dietary Fiber And Antioxidants. *Food ScienTech Journal*, 5(2), 166-176.
- Rodriguez-Salinas, P. A., Muy-Rangel, D., Urias-Orona, V., Zavala-Garcia, F., Suarez-Jacobo, A., Heredia, J. B. & Niño-Medina, G. (2019). Thermal processing effects on the microbiological, physicochemical, mineral, and nutraceutical

properties of a roasted purple maize beverage. *Farmacia*, 67(4), 587-595.

Rodriguez-Salinas, P. A., Zavala-Garcia, F., Urias-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., & Nino-Medina, G. (2020). Chromatic, nutritional and nutraceutical properties of pigmented native maize (*Zea mays* L.) genotypes from the northeast of Mexico. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 95-112.

Roels, S., Collado, M., Loosveld, A., Grobet, P., & Delcour, J. (1999). Variation in the degree of D-xylose substitution in water-extractable European durum wheat (*Triticum durum* desf.) semolina arabinoxylans.. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47 5, 1813-6 . <https://doi.org/10.1021/JF981130I>.

Rosa-Sibakov, N., Poutanen, K., & Micard, V. (2015). How does wheat grain, bran and aleurone structure impact their nutritional and technological properties?. *Trends in Food Science and Technology*, 41, 118-134. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.10.003>.

Rosell C. y Garzon, R. (2018). Microstructure and its relationship with quality of confectionary and bakery products. En S. Devahastin (ed.), *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability* (pp. 217-238). Cambridge: Woodhead Publishing.

Rudrapal, M., Khairnar, S., Khan, J., Dukhyil, A., Ansari, M., Alomary, M., Alshabrmi, F., Palai, S., Deb, P., & Devi, R. (2022). *Dietary Polyphenols and Their Role in Oxidative Stress-Induced Human Diseases: Insights Into Protective Effects, Antioxidant Potentials and Mechanism(s) of Action*. *Frontiers in Pharmacology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.806470>.

Saeed, F., Ahmad, N., Nadeem, M. T., Qamar, A., Khan, A. U., & Tufail, T. (2016). *Effect of arabinoxylan on rheological attributes and bread quality of spring wheats*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1164-1170.

Saeed, F., Arshad, M. U., Pasha, I., Suleria, H., Arshad, M. S., Qamar, A. & Sultan, S. (2015). *Effect of arabinoxylan and arabinogalactan on textural attributes of*

- bread*. Journal of Food Processing and Preservation, 39(6), 1070-1088.
- Saeed, F., Pasha, I., Anjum, F., & Sultan, M. (2011). *Arabinoxylans and Arabinogalactans: A Comprehensive Treatise*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 51, 467 - 476. <https://doi.org/10.1080/10408391003681418>.
- Saghir, S., Iqbal, M., Hussain, M., Koschella, A., & Heinze, T. (2008). Structure characterization and carboxymethylation of arabinoxylan isolated from Ispaghula (*Plantago ovata*) seed husk. Carbohydrate Polymers, 74, 309-317. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2008.02.019>.
- Samoggia, A., & Riedel, B. (2020). Assessment of nutrition-focused mobile apps' influence on consumers' healthy food behaviour and nutrition knowledge. *Food Research International*, 128, 108766.
- Sánchez Bastardo, N., & Alonso Sánchez, G. E. (2018). Fraccionamiento catalítico de hemicelulosas de salvado de trigo en agua caliente presurizada.
- Sarker, N., Ray, P., Pfau, C., Kalavacharia, V., Hossain, K., & Quadir, M. (2020). *Development of Functional Nanomaterials from Wheat Bran Derived Arabinoxylan for Nucleic Acid Delivery*. Journal of agricultural and food chemistry. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00029>.
- Scheuer, P., Ferreira, J., Mattioni, B., Miranda, M., & Francisco, A. (2015). *Optimization of image analysis techniques for quality assessment of whole-wheat breads made with fat replacer*. Food Science and Technology International, 35, 133-142. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6560>.
- Schmidt, M., Wiege, B., & Hollmann, J. (2021). Comparison of Alkaline/Oxidative and Hydrothermal Extraction of Wheat Bran Arabinoxylans. Foods, 10. <https://doi.org/10.3390/foods10040826>.
- Segovia-Huarcaya, J. J., Valentin-Soto, L. S., Herrera-Calderon, O., Fuertes-Ruitón, C.

M., Pari-Olarte, J. B., Loyola-Gonzales, E., & Mahmud, S. (2022). *Chemical Characterization, Antioxidant, and Antihyperglycemic Capacity of Ferulated Arabinoxylan Extracted from "Chicha de Jora" Bagasse: An Ancestral Fermented Beverage from Zea mays L.* *Journal of Food Quality*, 2022(1), 4015886.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). *Panorama Agroalimentario 2022*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/articulos/panorama-agroalimentario-2022-un-trabajo-de-analisis-que-evidencia-el-crecimiento-del-campo-mexicano>.

Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). *Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects - A review.* *Journal of Functional Foods*, 18, 820-897. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2015.06.018>.

Shakhray, T., Vorobyova, O., & Victorova, E. (2021). *Main trends of functional bakery products market development.* *New Technologies.* <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>.

Singh, A., Kim, J., & Lee, Y. (2022). *Phenolic Compounds in Active Packaging and Edible Films/Coatings: Natural Bioactive Molecules and Novel Packaging Ingredients.* *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27217513>.

Sisti, L., Gioia, C., Totaro, G., Verstichel, S., Cartabia, M., Camere, S., & Celli, A. (2021). *Valorization of wheat bran agro-industrial byproduct as an upgrading filler for mycelium-based composite materials.* *Industrial Crops and Products*, 170, 113742. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113742>.

Syu, P. C., Zhang, Q. F., & Lin, S. D. (2023). *Physicochemical, Antioxidant, Sensory, and Starch Digestibility Properties of Steamed Bread Fortified with Tamarillo Powder.* *Foods*, 12(12), 2306.

- Thilagavathi, T., Pandiyan, M., Suganyadevi, M., Sivaji, M., Yuvaraj, M., & Sasmitha, R. (2020). Dietary fibre-health benefits. *Biotica Research Today*, 2(6), 519-522.
- Topolska, K., Florkiewicz, A., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). Functional food— Consumer motivations and expectations. *International journal of environmental research and public health*, 18(10), 5327.
- Tse, T., & Schendel, R. (2023). *Cereal Grain Arabinoxylans: Processing Effects and Structural Changes during Food and Beverage Fermentations*. Fermentation. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100914>.
- Velasco Laiton, I. Y., Sana Pulido, W. A., Morillo Coronado, A. C., & Morillo Coronado, Y. (2022). Morphoagronomic characterization of accessions of *Triticum aestivum* L. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 39(SPE), 69-84.
- Viëtor, R., Angelino, S., & Voragen, A. (1992). Structural features of arabinoxylans from barley and malt cell wall material.. *Journal of Cereal Science*, 15, 213-222. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80120-3](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80120-3).
- Villaseñor-Mir, H. E., Rosa, H. S., Martínez-Cruz, E., Huerta-Espino, J., Espitia-Rangel, E., Solís-Moya, E., ... & Angeli, H. S. (2024). Grata S2022: nueva variedad de trigo suave galletero para áreas de riego en México. *Revista fitotecnica mexicana*, 47(1), 93-95.
- Vinkx, C., Stevens, I., Gruppen, H., Grobet, P., & Delcour, J. (1995). Physicochemical and Functional Properties of Rye Nonstarch Polysaccharides. VI. Variability in the Structure of Water-Unextractable Arabinoxylans. *Cereal Chemistry*, 72, 411-418.
- Wang, J., Bai, J., Fan, M., Li, T., Li, Y., Qian, H., Wang, L., Zhang, H., Qi, X., & Rao, Z. (2020). Cereal-derived arabinoxylans: Structural features and structure– activity correlations. *Trends in Food Science and Technology*, 96, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.016>.

- Wang, P., Hou, C., Zhao, X., Tian, M., Gu, Z., & Yang, R. (2019). *Molecular characterization of water-extractable arabinoxylan from wheat bran and its effect on the heat-induced polymerization of gluten and steamed bread quality*. Food Hydrocolloids. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.08.049>.
- Wang, X., Contreras, M., Xu, D., Jia, W., Wang, L., & Yang, D. (2021). *New insights into free and bound phenolic compounds as antioxidant cluster in tea seed oil: Distribution and contribution*. Lwt - Food Science and Technology, 136, 110315. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110315>.
- Wang, X., Contreras, M., Xu, D., Xing, C., Wang, L., & Yang, D. (2020). *Different distribution of free and bound phenolic compounds affects the oxidative stability of tea seed oil: A novel perspective on lipid antioxidation*. Lwt - Food Science and Technology, 129, 109389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109389>.
- Wang, Z., Li, S., Ge, S., & Lin, S. (2020). *A review of distribution, extraction methods and health benefits of bound phenolics in food plants*. Journal of agricultural and food chemistry. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06574>.
- Warrand, J., Michaud, P., Picton, L., Muller, G., Courtois, B., Ralainirina, R., & Courtois, J. (2005). Flax (*Linum usitatissimum*) seed cake: a potential source of high molecular weight arabinoxylans?. Journal of agricultural and food chemistry, 53(5), 1449-52. <https://doi.org/10.1021/JF048910D>.
- Weng, V., Cardeira, M., Bento-Silva, A., Serra, A., Brazinha, C., & Bronze, M. (2023). Arabinoxylan from Corn Fiber Obtained through Alkaline Extraction and Membrane Purification: Relating Bioactivities with the Phenolic Compounds. Molecules, 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28155621>.
- Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. (2020). Wheat-based food and feed. Wheat - An Exceptional Crop. Botanical Features, Chemistry, Utilization, Nutritional and Health Aspects. Woodhead Publishing (pp. 61-102).

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821715-3.00004-6>.

- Wolters, N., Schabronath, C., Schembecker, G., & Merz, J. (2016). *Efficient conversion of pretreated brewer's spent grain and wheat bran by submerged cultivation of *Hericium erinaceus**. *Bioresource technology*, 222, 123-129 .  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.121>.
- Wu, S., Shen, D., Wang, R., Li, Q., Mo, R., Zheng, Y., Zhou, Y., & Liu, Y. (2021). *Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel*. *Food chemistry*, 350, 129-217.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129217>.
- Wu, Y., Gao, H., Wang, Y., Peng, Z., Guo, Z., Ma, Y., Zhang, R., Zhang, M., Wu, Q., Xiao, J., & Zhong, Q. (2022). *Effects of different extraction methods on contents, profiles, and antioxidant abilities of free and bound phenolics of *Sargassum polycystum* from the South China Sea*. *Journal of Food Science*, 87, 968 - 981. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16051>.
- Xiao, M., Jia, X., Kang, J., Liu, Y., Zhang, J., Jiang, Y., ... & Guo, Q. (2024). *Unveiling the breadmaking transformation: Structural and functional insights into Arabinoxylan*. *Carbohydrate Polymers*, 330, 121845.
- Xiao-na, Z. (2008). Optimization of alkaline extraction conditions for arabinoxylan from wheat bran. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*.
- Xu, J., Li, Y., Zhao, Y., Wang, D., & Wang, W. (2021). *Influence of antioxidant dietary fiber on dough properties and bread qualities: A review*. *Journal of Functional Foods*, 80, 104434. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2021.104434>.
- Yadav, M., Kale, M., Hicks, K., & Hanah, K. (2017). *Isolation, characterization and the functional properties of cellulosic arabinoxylan fiber isolated from agricultural processing by-products, agricultural residues and energy crops*. *Food Hydrocolloids*, 63, 545-551.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2016.09.022>.

- Yan, J., Jia, X., Feng, L., Yadav, M., Li, X., Yin, L., & Yin, L. (2019). Rheological and emulsifying properties of arabinoxylans from various cereal brans. *Journal of Cereal Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102844>.
- Yan, M., Filieri, R., Raguseo, E., & Gorton, M. (2021). Mobile apps for healthy living: Factors influencing continuance intention for health apps. *Technological Forecasting and Social Change*, 166, 120644.
- Yilmaz-Turan, S., Jiménez-Quero, A., Menzel, C., Carvalho, D., Lindström, M., Sevastyanova, O., Moriana, R., & Vilaplana, F. (2020). *Bio-based films from wheat bran feruloylated arabinoxylan: Effect of extraction technique, acetylation and feruloylation*. *Carbohydrate polymers*, 250, 116916 . <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116916>.
- Yilmaz-Turan, S., Jiménez-Quero, A., Moriana, R., Arte, E., Katina, K., & Vilaplana, F. (2020). Cascade extraction of proteins and feruloylated arabinoxylans from wheat bran.. *Food chemistry*, 333, 127491 . <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127491>.
- Zannini, E., Núñez, Á., Sahin, A., & Arendt, E. (2022). *Arabinoxylans as Functional Food Ingredients: A Review*. *Foods*, 11. <https://doi.org/10.3390/foods11071026>.
- Zhang, L., Boven, A., Mulder, J., Grandia, J., Chen, X., Boom, R., & Schutyser, M. (2019). *Arabinoxylans-enriched fractions: From dry fractionation of wheat bran to the investigation on bread baking performance*. *Journal of Cereal Science*. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2019.02.005>.
- Zhang, Q., Cheng, Z., Wang, Y., & Fu, L. (2020). *Dietary protein-phenolic interactions: characterization, biochemical-physiological consequences, and potential food applications*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61, 3589 - 3615. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1803199>.
- Zhang, Y., Liu, C., Yang, M., Ou, Z., Lin, Y., Zhao, F., & Han, S. (2022).

- Characterization and application of a novel xylanase from Halolactibacillus miurensis in wholewheat bread making.* *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1018476>.
- Zhao, J., Xu, Y., Zhang, M., & Wang, D. (2020). *Integrating bran starch hydrolysates with alkaline pretreated soft wheat bran to boost sugar concentration.* *Bioresource technology*, 302, 122826. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122826>.
- Zhao, L., Ma, Z., Yin, J., Shi, G., & Ding, Z. (2021). *Biological strategies for oligo/polysaccharide synthesis: biocatalyst and microbial cell factory.* *Carbohydrate polymers*, 258, 117695. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117695>.
- Zhong, Y., Chen, Y., Pan, M., Wang, H., Sun, J., Chen, Y., Cai, J., Zhou, Q., Wang, X., & Jiang, D. (2023). *Insights into the Functional Components in Wheat Grain: Spatial Pattern, Underlying Mechanism and Cultivation Regulation.* *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12112192>.
- Zhu, Q., Wang, P., & Zhang, M. (2022). *Utilizing wheat arabinoxylans as a potent functional biomaterial for fabrication of hydrogels: A mini review.* *Journal of Biomedical Research*, 3(1), 30-36.
- Zhu, X. F., Tao, H., Wang, H. L., & Xu, X. M. (2023). *Impact of water soluble arabinoxylan on starch-gluten interactions in dough.* *LWT*, 173, 114289.
- Zingale, S., Spina, A., Ingrao, C., Fallico, B., Timpanaro, G., Anastasi, U., & Guarnaccia, P. (2023). *Factors Affecting the Nutritional, Health, and Technological Quality of Durum Wheat for Pasta-Making: A Systematic Literature Review.* *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12030530>.