

Determinación de antioxidantes durante el proceso de elaboración en panes artesanales fermentados

Determination of antioxidants during the elaboration process of fermented artisanal breads

Mariana Delgadillo-Díaz^{1*},
Alejandra Álvarez-Romero¹,
Karla V. Baleón-Ortega¹,
Francisco Ortiz-Salazar¹

¹Escuela de Ciencias de la Salud. Universidad Marista de Mérida. Periférico Norte; Tablaje Catastral 13941. Carretera Mérida-Progreso, CP. 97300. Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia:
mdelgadillo@marista.edu.mx

Nota científica

Recibida: 28 de marzo 2023

Aceptada: 22 de noviembre 2023

Como citar: Delgadillo-Díaz M, Álvarez-Romero A, Baleón-Ortega KV, Ortiz-Salazar F (2023) Determinación de antioxidantes durante el proceso de elaboración en panes artesanales fermentados. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* Núm. Esp. III: e3707. DOI: 10.19136/era.a10nIII.3707

RESUMEN. Determinar los compuestos bioactivos durante la elaboración de panes artesanales permitirá identificar alternativas de alimentos saludables que sustituyan a los productos ultraprocesados, que provocan riesgos a la salud. Se prepararon cinco formulaciones, harina de trigo+agua (HT), harina de trigo integral+agua (HTI), harina de trigo integral+agua+cerveza (HTIC), harina de trigo integral+agua+cerveza+chile habanero (HTICH) y harina de trigo integral+agua+cerveza+chile serrano (HTICS). El pan HTIC fue el más esponjoso y los panes HT y HTI fueron los más ácidos. En el proceso de elaboración de pan, la cantidad de fenoles totales fue mayor en la masa madre HTICS (33.74 ± 0.03 mg EAG/100 g), mientras que el pan HT tuvo el mayor contenido de flavonoides totales (13.32 ± 0.06 mg EQ/100 g). El pan artesanal fermentado con harina de trigo sin cultivo iniciador y sustrato vegetal puede considerarse como un alimento funcional con un mayor contenido de compuestos bioactivos que beneficie la salud del ser humano.

Palabras clave: Masa madre, fermentación, antioxidantes, alimento funcional, pan artesanal.

ABSTRACT. Determining the bioactive compounds during the production of artisanal breads will allow us to identify healthy food alternatives that replace ultra-processed products, which cause health risks. Five formulations were prepared: wheat flour+water (WF), whole wheat flour+water (WWF), whole wheat flour+water+beer (WWFB), whole wheat flour+water+beer+habanero chili (WWFBH) and whole wheat flour+water+beer+serrano chili (WWFBS). The WWFB bread was the fluffiest, and the WF and WWF breads were the most acidic. During the bread-making process, the total phenol content was higher in the WWFBS sourdough (33.74 ± 0.03 mg GAE/100 g), while the WF bread had the highest total flavonoid content (13.32 ± 0.06 mg QE/100 g). Artisanal bread fermented with wheat flour without a starter culture and vegetable substrate can be considered a functional food with a higher content of bioactive compounds that benefits human health.

Key words: Sourdough, fermentation, antioxidants, functional food, artisan bread.

INTRODUCCIÓN

La prevalencia de obesidad y otras enfermedades crónico-degenerativas ha sido relacionada con el cambio de una dieta tradicional, que consiste en un alto consumo de alimentos de origen vegetal no procesados, como cereales, frutas, verduras, leguminosas, semillas oleaginosas y un bajo consumo de productos cárnicos (Martí *et al.* 2021). Esto ha provocado un cambio hacia una dieta alta en grasas saturadas, azúcares, alimentos procesados y proteínas de origen animal y baja en fibras y carbohidratos complejos (Peniche y Chávez 2022). El cambio ha sido influenciado por la producción masiva y un alcance económico en el mercado de los productos ultraprocesados, lo cual ha generado un desplazamiento significativo de los alimentos artesanales o naturales presentes en la dieta, al mismo tiempo el consumo de estos alimentos ha impactado en la salud del ser humano (Camacho-Vera *et al.* 2019). Sin embargo, el consumo de alimentos ricos en antioxidantes ha tomado un papel importante, ya que contribuyen a la prevención de enfermedades cardiovasculares y cáncer, debido a su acción contra el estrés oxidativo y el daño celular inducido por los radicales libres que pueden contribuir a los procesos cancerosos (Clemente-Suárez *et al.* 2023). Diferentes antioxidantes como los compuestos fenólicos, la luteína, las antocianinas, las vitaminas C y E abundan en frutas y verduras, pero también están presentes en cereales, legumbres y nueces (Clemente-Suárez *et al.* 2023).

En los últimos años el consumo de pan de masa madre ha incrementado, pues aporta una serie de características tanto tecnológicas como nutritivas (Ribet *et al.* 2023). Tradicionalmente la masa madre es una mezcla de harina y agua que es fermentada por un cultivo de bacterias ácido-lácticas (BAL) y levaduras (Arora *et al.* 2021). La interacción entre estos microorganismos y su ambiente generan una importante biotransformación en la masa utilizada, lo cual puede ofrecer grandes propiedades funcionales a los panes artesanales (Ribet *et al.* 2023). Además de mejorar la calidad del pan (textura, sabor, aroma), la fermentación de la masa madre permite incremen-

tar la bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes (Graça *et al.* 2021). El proceso fermentativo aplicado en la masa madre ayuda a la extracción y liberación de los compuestos fenólicos, que mayoritariamente están en forma de complejos con los arabinoxilanos y otros polisacáridos no digeribles, que disminuyen su valor biológico como antioxidantes (Dapčević-Hadnadev *et al.* 2022). Sin embargo, la actividad de los compuestos antioxidantes presentes en la masa madre puede depender de numerosos factores como la composición de la microbiota, los parámetros de fermentación, tiempos de refresco, así como de la composición de otros ingredientes añadidos (Lau *et al.* 2021). Por ejemplo, la adición de chiles, ya que contienen una amplia gama de antioxidantes como compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y capsaicinoides (Bal *et al.* 2022). De acuerdo con la información anterior, es necesario probar formulaciones con diferentes tipos de harina, cultivos iniciadores y sustratos vegetales que aumenten el contenido de compuestos antioxidantes en panes artesanales fermentados. Para ello, se planteó determinar el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides totales durante el proceso de elaboración en panes artesanales fermentados espontáneamente y con cultivos iniciadores que no alteren su calidad fisicoquímica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del experimento

La investigación se realizó en los laboratorios de ciencias químicas y en el laboratorio de alimentos de la Universidad Marista en Mérida, Yucatán. El proceso de fermentación, la elaboración de panes de masa madre, así como el presente estudio se realizaron durante los meses de junio-diciembre del año 2022. Las masas madres utilizadas se obtuvieron a partir de dos tipos de harina (trigo y trigo integral), un cultivo iniciador (cerveza de trigo) y dos sustratos vegetales ricos en antioxidantes (chiles habanero y serrano en juliana frescos), de los cuales se prepararon cinco tipos de formulaciones: 1) Harina de trigo + agua (HT), 2) Harina de trigo integral + agua (HTI), 3) Harina de trigo integral + agua y cerveza

(HTIC), 4) Harina de trigo integral + agua, cerveza y chile habanero (HTICH) y 5) Harina de trigo integral + agua, cerveza y chile serrano (HTICS). En la Figura 1 se muestra el diagrama de proceso de elaboración de los panes artesanales, donde se visualizan las tres etapas de elaboración de panes.

Las variables que se estudiaron en la etapa de la preparación de masa madre fueron: contenido de fenoles y flavonoides totales. En la etapa de la formulación de masas se determinó el contenido de fenoles y flavonoides totales. En la etapa de elaboración de panes artesanales se determinó el peso del pan, volumen específico, número de alvéolos, pH, acidez titulable, humedad, cenizas, contenido de fenoles y flavonoides totales. Para fines de comparación de antioxidantes, en el pan comercial se evaluó el contenido de fenoles y flavonoides totales.

Fermentación de masa madre con harina de trigo y de trigo integral

La fermentación de la masa madre se basó en mezclar 50% de harina (de trigo o trigo integral) y 50% de agua purificada en un frasco de vidrio, hasta obtener una mezcla semisólida, para iniciar la fermentación en presencia de oxígeno parcial, esta se cubrió con una tela y se dejó reposar por 12 h a temperatura ambiente (25-30 °C). Transcurrido el tiempo de reposo, se añadió la misma cantidad de agua y harina a la mezcla inicial y se homogeneizó hasta obtener la consistencia semisólida, nuevamente. Este proceso se repitió cada 24 h durante 10 días (Gobbetti y Gänzle 2013). Después, se tomó una muestra de cada masa madre (HT y HTI) para realizar los análisis.

Fermentación de masa madre con harina de trigo, cerveza y chiles

La preparación de masa madre se basó en una formulación de 52% harina de trigo integral, 36% cerveza de trigo y 11% chile habanero o serrano. La harina se hidrató con la cerveza hasta obtener una mezcla semisólida con el chile serrano picado para iniciar la fermentación en presencia de oxígeno parcial y se cubrió con una tela durante 24 h a temperatura ambiente (25-30 °C). Después se añadió

agua y harina a la mezcla inicial, y se homogeneizó hasta obtener una consistencia semisólida. Este proceso se repitió cada 24 h durante 10 días (Gobbetti y Gänzle 2013). Después, se tomó una muestra de cada masa madre (HTIC, HTICH y HTICS) para realizar los posteriores análisis.

Formulación y elaboración de panes artesanales

Se prepararon cinco masas para la elaboración de los panes a partir de cada formulación de masa madre. Las cantidades de los ingredientes para las formulaciones de las masas se calcularon de acuerdo con el 100% de las diferentes harinas utilizadas, teniendo una formulación de un 80% de harina de trigo, 20% de harina de trigo integral, 70% de agua purificada, 18% de masa madre y 2% de sal. Los panes se elaboraron a partir de la mezcla de la harina con el agua en recipientes hasta obtener una masa homogénea. Luego de dejar reposar por 30 min a temperatura ambiente (25-30 °C), se agregó la masa madre y la sal. Se realizaron pliegues de estiramiento con movimientos de afuera hacia adentro, cada 30 min por 3 h. La masa se moldeó y se colocó en un recipiente tapado con tela y harina para luego dejarla fermentar en refrigeración durante 12 h. Después de la fermentación, la masa se horneó en un recipiente para horno cerrado a 250 °C durante 20 min a 180 °C, y otros 20 min con el recipiente destapado para producir un color dorado en la superficie del pan. Se usó un control de pan artesanal de harina de trigo (PC) del que no se obtuvo muestra de la masa madre y formulación de la masa, debido a que se adquirió en una cafetería gourmet ubicada en el centro de la ciudad de Mérida, Yucatán. Después, se tomó una muestra de cada formulación de masas para pan y de cada pan artesanal elaborado (HT, HTI, HTIC, HTICH y HTICS) para realizar los posteriores análisis.

Determinación de características fisicoquímicas

El pH se determinó de acuerdo con el método 981.12 (AOAC 2005). Para lo cual se preparó una solución con 10 g de muestra y 100 mL de agua destilada (1:10 v/p). Posteriormente, la solución se filtró y se realizó la medición en un pH-metro (MM340, HACH, Iowa, EE. UU.). Para medir la

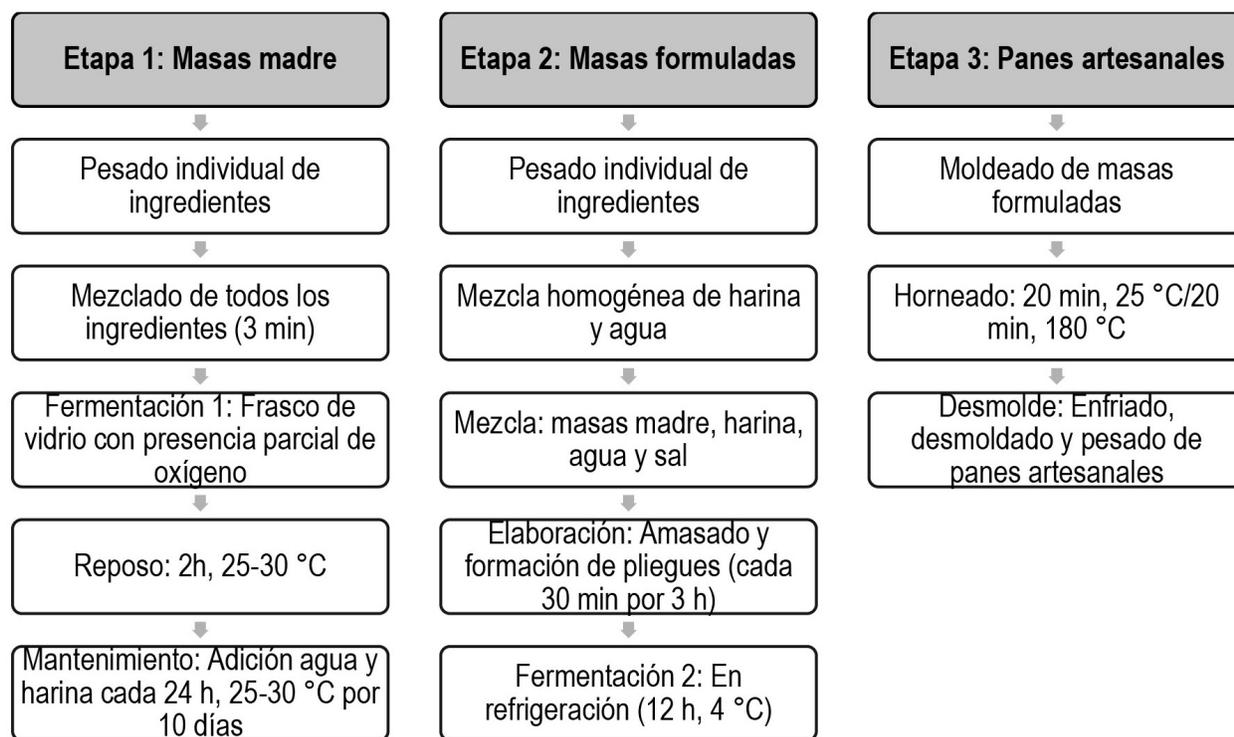


Figura 1. Etapas del proceso de la elaboración de panes artesanales.

acidez titulable se empleó el método 942.15 (AOAC 2005), se preparó una solución de 10 g de muestra de cada etapa y mezcló con 100 mL de agua destilada. La solución se filtró y mezcló con 0.5 mL de fenolftaleína al 1% y se tituló con NaOH 0.1 M; la acidez se expresó como porcentaje de ácido láctico. El peso, volumen específico y densidad del pan se determinaron mediante el método 10-05.01 de desplazamiento de colza (AACC 2000). Posteriormente el peso de cada pan se determinó para calcular el volumen específico de cada pan (cm^3/g) = volumen del pan/peso y la densidad de los mismos (g/cm^3) = peso del pan/volumen del pan. La humedad del pan se determinó por el método 925.10 (AOAC 2005), para lo cual se pesaron 10 g de muestra de cada pan, que se colocaron en crisoles y se dejaron secar en un horno de convección (Isotemp 637G, Fisher Scientific, Hampton, EE. UU.) por 2 h a 105 °C. Para luego calcular el contenido de humedad por el método de diferencia de pesos.

El número y porcentaje de alvéolos de pan

por cm^2 se calcularon con el programa Image J desarrollado por Wayne Rasband en el Instituto Nacional de Salud Mental en USA. Para lo cual se obtuvieron rebanadas de los panes horneados, se fotografiaron y digitalmente se marcó un área central para la determinación del número y porcentaje de alveolos de pan por cm^2 en cada muestra.

Determinación de compuestos antioxidantes

Se prepararon extractos metanólicos de cada muestra fresca obtenida de las etapas del proceso de elaboración del pan, masas madres, masa formulada para pan después de fermentar y pan artesanal. De las muestras de cada proceso se pesaron 10 g y mezclaron con 20 mL de metanol al 80% en tubos de ensayos, los cuales se cubrieron de papel aluminio y se resguardaron a 25-30 °C por 18 h. El extracto fue separado en una centrífuga (5702 R, Eppendorf, Hamburgo, Alemania) a 4 400 rpm por 20 min y se filtró con papel Whatman No. 1. Los volúmenes de extractos obtenidos se midieron y resguardaron a -20

°C para la determinación de fenoles y flavonoides totales.

El contenido de fenoles totales se determinó de acuerdo con el método Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi 1965); para lo cual se colocaron 50 μL de extracto y 3 mL de agua destilada en tubos de vidrio cubiertos con papel aluminio para proteger la mezcla de la luz. Posteriormente se añadieron 250 μL de reactivo de Folin-Ciocalteu 1N y luego de 8 min se adicionaron 750 μL de NaHCO_3 al 20% y 950 μL de agua destilada y se reservó por 30 min. La absorbancia se midió a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10S UV-VIS, Thermo Scientific, Massachusetts, EE. UU.). La concentración de fenoles totales se expresó como equivalentes de ácido gálico (EAG) por 100 g de muestra en base húmeda (BH) en función del patrón (1.25-60 mg L^{-1}) en metanol (80%). El contenido de flavonoides totales se determinó en base al método Zhishen *et al.* (1999), que consistió en colocar un volumen de 200 μL de extracto en tubos de vidrio y cubrirlos con papel aluminio para proteger la mezcla de la luz. Posteriormente se añadieron 60 μL de NaNO_2 al 5%, luego de 5 min 60 μL de AlCl_3 al 10% (en metanol 80%) y 1 min después 400 μL de NaOH 1M. La absorbancia se midió a 405 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10S UV-VIS, Thermo Scientific, Massachusetts, EE. UU.). La concentración de flavonoides totales se expresó como equivalentes de quercetina (EQ) por 100 g de muestra en base húmeda (BH) en función de la curva estándar (10-600 mg L^{-1}) en metanol (80%).

Análisis estadístico

Las variables fisicoquímicas se evaluaron por medio de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. La comparación de medias para evaluar las diferencias significativas se realizó a través de una prueba de Tukey HSD. Se utilizaron interacciones para evaluar el efecto principal entre la etapa del proceso y el tipo de formulación en el contenido de fenoles y flavonoides totales. Se estableció un nivel de significación $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SPSS, versión 24.0, IBM, EE. UU.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características fisicoquímicas de los cinco panes artesanales fermentados con los diferentes tipos de formulaciones (HT, HTI, HTIC, HTICH y HTICS) se presentan en la Tabla 1. De manera general, las variables número de alveolos/ cm^2 , pH, acidez titulable, humedad y cenizas mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los panes HT y HTI con HTIC, HTICH y HTICS. Las diferencias de estos resultados pueden atribuirse a los cambios o interacciones que pueden tener los componentes de cada pan según lo reportado por Patanè *et al.* (2004). En este caso, usar cerveza como cultivo iniciador para realizar el proceso de fermentación (Cho y Peterson 2010), así como la composición química de los chiles habanero y serrano como fuentes de antioxidantes (Howard *et al.* 2000). La primera característica física que se evalúa en el pan es el tamaño, el cual es proporcionado por el volumen. Al comparar los tratamientos, el volumen específico fue mayor en el pan elaborado con masa madre de harina de trigo integral (HTI). Esto puede ser atribuido a la red viscoelástica generada con el gluten para retener el gas de CO_2 en la fermentación y la liberación del vapor de agua durante el horneado, como lo reportan Calvo-Carrillo *et al.* (2020). En el caso de la estructura alveolar, la masa madre de harina de trigo integral y cerveza (HTIC) produjo el pan más esponjoso, ya que presentó el mayor número de alvéolos/ cm^2 que corresponde al $21.88 \pm 1.80\%$ de área/ cm^2 . La estructura alveolar representada por la esponjosidad del pan, la distribución y el tamaño de los alvéolos de los panes, puede ser atribuida al proceso de fermentación alcohólica desarrollada con el cultivo iniciador de cerveza de trigo añadido a la masa madre HTIC, tal como lo explican Cho y Peterson (2010).

Las variables de pH y acidez presentaron una tendencia de menor pH y mayor acidez en los panes elaborados con masas madres de harina de trigo (HT y HTI) en comparación con los panes elaborados con masas madres de harina de trigo integral y cerveza (HTIC, HTICH y HTICS). El bajo pH (de 3.11 a 3.24) de las masas madres HT y HTI puede ser atribuido al desarrollo de la fermentación espontánea que usa ha-

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de los panes elaborados con cinco formulaciones de masa madre.

Muestra	Peso (g)	Volumen específico (cm ³ /g)	Número de alvéolos/cm ² *	pH	Acidez titulable (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)
HT	272.00	2.20	22.67 ± 5.69 ^a	3.11 ± 0.11 ^a	0.35 ± 0.05 ^a	28.16 ± 3.87 ^a	2.02 ± 0.13 ^a
HTI	319.00	2.30	26.33 ± 1.15 ^{a,b}	3.24 ± 0.01 ^a	0.41 ± 0.05 ^a	29.09 ± 5.61 ^a	2.17 ± 0.06 ^a
HTIC	209.60	2.00	34.00 ± 3.00 ^b	4.41 ± 0.04 ^b	0.15 ± 0.02 ^b	40.50 ± 4.24 ^{a,b}	2.93 ± 0.08 ^b
HTICH	215.70	2.00	30.00 ± 4.00 ^{a,b}	4.53 ± 0.09 ^b	0.11 ± 0.03 ^b	36.22 ± 5.88 ^{a,b}	4.28 ± 0.10 ^{dc}
HTICS	205.60	1.00	26.33 ± 3.21 ^{a,b}	4.42 ± 0.01 ^b	0.15 ± 0.02 ^b	45.04 ± 0.34 ^b	3.48 ± 0.25 ^d
Valor p	-	-	0.34	<0.001	<0.001	0.005	<0.001

* = cm² de superficie de miga de pan. Media de datos ± desviación estándar (n = 3) expresada en BH. Diferentes letras representan diferencias significativas (p < 0.05). HT= Harina de trigo + agua, HTI = Harina de trigo integral + agua, HTIC = Harina de trigo integral + agua + cerveza, HTICH = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile habanero, HTICS = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile serrano, PC = Pan comercial.

rina de trigo como sustrato ideal para la proliferación de altas cantidades de bacterias ácido-lácticas (BAL) tal como lo describe De Vuyst *et al.* (2017). Según Arendt (2007), la harina de trigo contiene cierta cantidad de cenizas, esto tiene considerables efectos sobre las características ácidas de los panes artesanales. Dependiendo de la cantidad de harina utilizada, el pH de un pan artesanal puede variar entre 4.7 y 5.4. La acidificación de la masa madre y de la masa para la elaboración de pan impactará en la formación de la estructura del pan, como la formación del gluten, almidón y arabinoxilanos. La acidez siguió una tendencia inversa a la variación de pH en los panes. Los cambios menores de pH y acidez mostrados en los panes de masas madres preparadas con cerveza pueden deberse a una fermentación inducida por el cultivo iniciador (cerveza), en la cual posiblemente se producen una menor cantidad de ácidos láctico y acético y mayor CO₂, según Ogunsakin *et al.* (2015). El contenido de humedad indicó la frescura de los panes, el pan elaborado con masa madre HTICS fue el más fresco en comparación con el pan elaborado con solo masa madre preparada con harina de trigo, quien tuvo la mayor pérdida de agua después del horneado. Mientras que Zaidiyah *et al.* (2020) reportaron humedad entre 34.76 y 44.20% en sus panes de masa madre, calificados con un grado de frescura aceptable.

Para el contenido de fenoles y flavonoides totales se observaron diferencias significativas (p < 0.05) entre grupos e intra-grupos según el tipo de formulación y la etapa de proceso (Figura 2 y 3). En la Tabla 2 se señala que los efectos principales de la

etapa del proceso y el tipo de formulación, así como la interacción etapa del proceso × tipo de formulación tuvieron diferencias estadísticamente significativas (p < 0.05), es decir que influyeron en el contenido de fenoles y flavonoides totales. En el caso de fenoles totales, el efecto principal se observó en el tratamiento de masa madre con la formulación HTICS, mientras que, en flavonoides totales, el mejor tratamiento fue el pan artesanal con la formulación HT. La etapa de preparación de masas madres mostró el mayor contenido de fenoles totales, después siguió la etapa de panes artesanales horneados, mientras que la etapa de formulación de masas mostró los valores más bajos de fenoles totales. El mayor resultado de fenoles totales fue de 33.74 ± 0.03 mg EAG/100 g en BH para la muestra de masa madre de HTICS. En el caso del contenido de flavonoides totales, la muestra de pan artesanal elaborado con harina de trigo refinada (HT) mostró los mayores resultados significativos (p < 0.05) en comparación con los panes elaborados con harina de trigo integral (HTI), así como los panes elaborados con el cultivo iniciador y el sustrato vegetal (HTICH y (HTICS)). La cantidad de flavonoides totales contenida en la etapa de formulación de masas fue mayor que en los panes artesanales después del horneado, sin embargo, la etapa de elaboración de masas madres presentó la mayor cantidad de flavonoides totales con excepción de la masa madre HT. Los resultados del presente estudio son similares a los reportados por Dapčević-Hadnađev *et al.* (2022), quienes mencionan que los compuestos fenólicos aumentan en la fermentación de harinas debido a los mecanismos producidos por

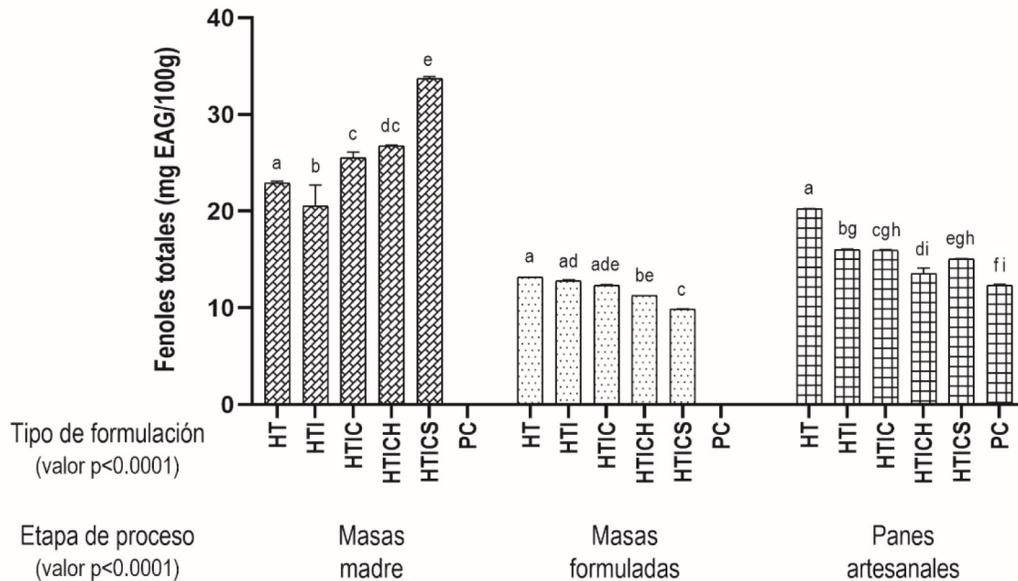


Figura 2. Contenido de fenoles totales en las diferentes etapas de elaboración del pan artesanal. EAG = equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra en BH. Las barras de error representan \pm desviación estándar ($n = 5$). Diferentes letras representan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre etapas del proceso con cada tipo de formulación. HT = Harina de trigo + agua, HTI= Harina de trigo integral + agua, HTIC = Harina de trigo integral + agua + cerveza, HTICH = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile habanero, HTICS = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile serrano, PC = Pan comercial.

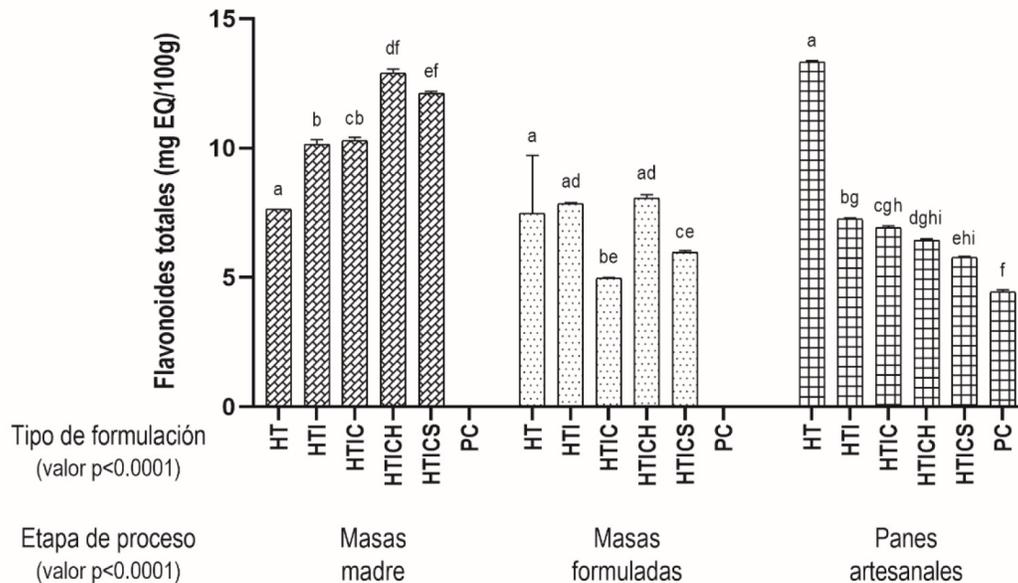


Figura 3. Contenido de flavonoides totales en las diferentes etapas de elaboración del pan artesanal. EQ = equivalentes de quercetina por 100 g de muestra en BH. Las barras de error representan \pm desviación estándar ($n = 5$). Diferentes letras representan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre etapas del proceso con cada tipo de formulación. HT = Harina de trigo + agua, HTI= Harina de trigo integral + agua, HTIC = Harina de trigo integral + agua + cerveza, HTICH = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile habanero, HTICS = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile serrano, PC = Pan comercial.

Tabla 2. Efectos principales e interacciones frente al contenido de fenoles y flavonoides totales.

		Valor F-Ratio (Valor p)	
		Fenoles totales	Flavonoides totales
Etapa de proceso (EP)	1. Masa madre (n = 25)	3676.72 (<0.001)	288.39 (<0.001)
	2. Formulación de masas para pan (n = 25)		
	3. Panes artesanales (n = 30)		
Tipo de formulación (TF)	1. HT = Harina de trigo + agua (n = 15)	86.91 (<0.001)	58.08 (<0.001)
	2. HTI = Harina de trigo integral + agua (n = 15)		
	3. HTIC = Harina de trigo integral + agua y cerveza (n = 15)		
	4. HTICH = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile habanero (n = 15)		
	5. HTICS = Harina de trigo integral + agua + cerveza + chile serrano (n = 15)		
	6. PC = Pan comercial (n = 5)		
Interacción EP × TF		203.21 (<0.001)	101.38 (<0.001)

BAL, ya que la actividad enzimática de las bacterias genera una hidrólisis de los compuestos fenólicos en sus formas complejas y glicosiladas, y en conjunto con la acidificación conduce a una mejor solubilización de compuestos fenólicos. La diferencia significativa ($p < 0.05$) observada en el contenido de fenoles y flavonoides totales de las masas formuladas y de los panes artesanales después del horneado coincide con los resultados obtenidos por Han y Koh (2011) y Abdel-Aal y Rabalski (2013), quienes reportan que la cantidad de compuestos fenólicos presente en la etapa de cocción del pan artesanal puede atribuirse a mayores tiempos y temperaturas de horneado y al tipo de pan, por lo que el horneado puede tener un efecto en la liberación y disponibilidad de los compuestos fenólicos conjugados. Mientras que Ktenioudaki *et al.* (2015) mencionan que la reacción de maillard producida durante el horneado, puede aumentar el contenido de compuestos fenólicos en panes elaborados con harina de trigo refinada. Lo que puede atribuirse a los resultados obtenidos del pan artesanal elaborado con harina de trigo refinada (HT), ya que presentó el mayor contenido de fenoles

(20.25 ± 0.03 mg EAG/100 g) y flavonoides totales (13.32 ± 0.06 mg EQ/100 g) en comparación con los otros panes elaborados en el presente estudio. Por lo que la variación de fenoles y flavonoides totales en las diferentes etapas del proceso puede atribuirse al proceso de fermentación durante la elaboración de las masas madres y formulación de las masas, así como a tiempos, temperaturas y reacciones involucradas en el horneado.

El uso de diferentes formulaciones, tipos de harina, cultivos iniciadores y sustratos vegetales pueden influir en las características fisicoquímicas y en el contenido de los compuestos antioxidantes presentes en el pan. La elaboración de las masas madres, fue la etapa en que se identificó el mayor contenido de fenoles y flavonoides totales. Aunque estos compuestos antioxidantes disminuyeron después del horneado del pan, se obtuvieron cantidades significativas en los panes artesanales. El pan artesanal fermentado con harina de trigo sin cultivo iniciador y sustrato vegetal puede considerarse como un alimento funcional con un mayor contenido de compuestos bioactivos que beneficie la salud del ser humano.

LITERATURA CITADA

- AACC (2000) International Approved Methods of Analysis. 10th Edition. AACC International. 1200p.
- Abdel-Aal ESM, Rabalski I (2013) Effect of baking on free and bound phenolic acids in wholegrain bakery products. *Journal of Cereal Science* 57: 312-318.
- AOAC (2005) Association of Official Analytical Chemistry. 18th Edition. AOAC International. 1650p.
- Arendt EK, Ryan LAM, Dal Bello F (2007) Impact of sourdough on the texture of bread. *Food Microbiology* 24: 165-174.

- Arora K, Ameer H, Polo A, Di Cagno R, Rizzello CG, Gobbetti, M (2021) Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: a systematic Review. *Trends in Food Science & Technology*. 108: 71-83. DOI: 10.1016/J.Tifs.2020.12.008.
- Bal S, Sharangi AB, Upadhyay TK, Khan F, Pandey P, Siddiqui S, Saeed M, Lee HJ, Yadav DK (2022) Biomedical and antioxidant potentialities in chilli: Perspectives and way forward. *Molecules* 27: 6380. DOI: 10.3390/molecules27196380.
- Calvo-Carrillo M de la C, López-Méndez OX, Carranco-Jáuregui ME, Marines J (2020) Evaluación fisicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*Triticum* spp.) y chícharo (*Pisum sativum* L.). *Biotecnia* 22: 116-124.
- Camacho-Vera JH, Cervantes-Escoto F, Cesín-Vargas A, Palacios-Rangel MI (2019) Los alimentos artesanales y la modernidad alimentaria. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional* 29: 1-18. DOI: 10.24836/es.v29i53.700.
- Cho IH, Peterson DG (2010) Chemistry of bread aroma: A review. *Food Science and Biotechnology* 19: 575-582.
- Clemente-Suárez VJ, Beltrán-Velasco AI, Redondo-Flórez L, Martín-Rodríguez A, Tornero-Aguilera JF (2023) Global impacts of western diet and its effects on metabolism and health: A narrative review. *Nutrients* 15: 2749. DOI: 10.3390/nu15122749.
- Dapčević-Hadnađev T, Stupar A, Stevanović D, Škrobot D, Maravić N, Tomić J, Hadnađev M (2022) Ancient wheat varieties and sourdough fermentation as a tool to increase bioaccessibility of phenolics and antioxidant capacity of bread. *Foods* 11: 3985. DOI: 10.3390/foods11243985.
- De Vuyst L, Van Kerrebroeck S, Leroy F (2017) Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. *Advances in Applied Microbiology* 100: 49-160.
- Gobbetti M, Gänzle M (2013) *Handbook on sourdough biotechnology*. Springer. United States of America. 298p.
- Graça C, Lima A, Raymundo A, Sousa I (2021) Sourdough fermentation as a tool to improve the nutritional and health-promoting properties of its derived-products. *Fermentation* 7: 246. DOI: 10.3390/fermentation7040246.
- Han HM, Koh BK (2011) Effect of phenolic acids on the rheological properties and proteins of hard wheat flour dough and bread: Effect of phenolic acids on hard wheat flour dough and bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91: 2495-2499.
- Howard LR, Talcott ST, Brenes CH, Villalon B (2000) Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum* species) as influenced by maturity. *Journal of Agricultural of Food Chemistry* 48(5): 1713-1720.
- Ktenioudaki A, Alvarez-Jubete IL, Gallagher E (2015) A review of the process-induced changes in the phytochemical content of cereal grains: The breadmaking process. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 55: 611-619.
- Lau SW, Chong AQ, Chin NL, Talib RA, Basha RK (2021) Sourdough microbiome comparison and benefits. *Microorganisms* 9: 1355. DOI: 10.3390/microorganisms9071355.
- Martí A, Calvo C, Martínez A (2021) Consumo de alimentos ultraprocesados y obesidad: Una revisión sistemática. *Nutrición Hospitalaria* 38: 177-185.
- Ogunsakin OA, Banwo K, Ogunremi OR, Sanni AI (2015) Microbiological and physicochemical properties of sourdough bread from sorghum flour. *International Food Research Journal* 22: 2610-2618.

- Patanè C, Lacoconi E, Raccuia SA (2004) Physico-chemical characteristics, water absorption, soaking and cooking properties of some Sicilian populations of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 55: 547-554.
- Peniche CS, Chávez GP (2022) La transición alimentaria en México: Causas económicas y consecuencias para la salud humana y ambiental. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 35: 20-36.
- Ribet L, Dessalles R, Lesens C, Brusselaers N, Durand-Dubief M (2023) Nutritional benefits of sourdoughs: A systematic review. *Advances in Nutrition* 14: 22-29. DOI: 10.1016/j.advnut.2022.10.
- Singleton VL, Rossi JA (1965) Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16: 144-158.
- Zaidiyah, Lubis Y, Putri C, Rohaya S (2020) Physicochemical properties of sourdough bread made from local variety sweet potato and pineapple juice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 425: 012079. DOI: 10.1088/1755-1315/425/1/012079.
- Zhishen J, Mengcheng T, Jianming W (1999) The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry* 64: 555-559.