UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD

LICENCIATURA EN NUTRICIÓN

TESIS

FUNCIONALIDAD, BIOACCESIBILIDAD Y FERMENTACIÓN COLÓNICA *IN VITRO* DE LA CÁSCARA DE GUANÁBANA *(ANNONA MURICATA* L.) A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA

Para obtener el título de
Licenciada en Nutrición

PRESENTA

P. L. N. Blanca Nazareth Silis Ambrosio

Directora:
Dra. Quinatzin Yadira Zafra Rojas

Codirectora:
Dra. Nelly del Socorro Cruz Cansino

Comité tutorial:
Dr. José Alberto Ariza Ortega
Dra. Esther Ramírez Moreno

San Agustín Tlaxiaca, Hgo., mayo de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD
ÁREA ACADÉMICA DE NUTRICIÓN

De acuerdo con el artículo 40 y 43 del Reglamento de Titulación vigente, el jurado de examen recepcional designado, autoriza para su impresión el trabajo de la Tesis titulada:

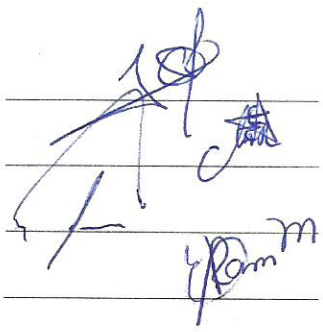
"FUNCIONALIDAD, BIOACCESIBILIDAD Y FERMENTACIÓN COLÓNICA *IN VITRO* DE LA CÁSCARA DE GUANÁBANA *(ANNONA MURICATA* L.*)* A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA"

Que para obtener el Título de Licenciada de Nutrición en la modalidad "Elaboración de tesis mediante examen recepcional" sustenta la Pasante

C. Blanca Nazareth Silis Ambrosio.

A T E N T A M E N T E
Pachuca de Soto, Hidalgo, 02 de mayo de 2025
"Amor, Orden y Progreso"

PRESIDENTE:	DR. JOSÉ ALBERTO ARIZA ORTEGA
SECRETARIO:	DRA. QUINATZIN YADIRA ZAFRA ROJAS
PRIMER VOCAL:	DRA. NELLY DEL SOCORRO CRUZ CANSINO
SUPLENTE	DRA. ESTHER RAMÍREZ MORENO



Agradecimientos

Gracias a Dios, por acompañarme en este camino, por darme la fuerza y la convicción para culminar este proyecto.

Doy gracias a mis padres, Eric y Doris, por su apoyo incondicional en todo momento, por darme ánimos y la oportunidad de perseguir mis sueños, ustedes lo hicieron posible, esto es más suyo que mío, gracias por todo.

A mis hermanos, Ariette y Alan, por ser los mejores amigos que la vida me pudo dar, por motivarme, escucharme cada viernes que llegaba cansada a casa, reír y darme ánimos para continuar.

A mis abuelos, Altagracia y Gonzalo, (mamá Chica y papá Chalo), por siempre confiar en mí, por siempre llamarme y preguntar por mi cuando me encontraba estudiando lejos de casa, cuando confiaban en mí y me daban para que me compara algo, este logro también es suyo.

A mis abuelos Cipriano y Natalia, por tener una inmensa confianza en mí, por motivarme a seguir estudiando, aun cuando eso significaba no verlos durante meses.

A mis tías, Linda, Hilda y Olga, han sido mi mayor ejemplo a seguir, por cuidarme, llamarme y estar cuando lo necesitaba y me encontraba tan lejos de casa, por aconsejarme, hacerme reír y compartir conmigo sus anécdotas, por ser un pilar en mi formación como persona y por tantas cosas que han hecho por mí.

A la Dra. Quinatzin y la Dra. Nelly, muchas gracias por confiar en mí, por enseñarme a tener paciencia cuando el experimental no salía a la primera y tenía que repetir las veces que fueran necesarias o cuando en la revisión siempre tenía que corregir algo por mínimo que fuera, por sus consejos y palabras de aliento, por guiarme y apoyarme a concluir este proyecto, las aprecio mucho. Gracias por tanto.

A mis amigos, Sebastián, Noemí, Alyss, Mariana, Daniela y Vania Palma, gracias por ser un rayito de esperanza, por compartir buenos momentos mientras estuvimos en el servicio y durante la carrera, por todas esas risas que me ayudaban a olvidar por un momento el estrés de llevar a cabo una investigación o cuando mi experimental no salía como quería, Daniela muchísimas gracias por prestarme tu cuenta para seguir investigando, te debo mucho, jaja.

A mis amigas del laboratorio, Vania Palma, Denisse, Vania Bautista y Andy por ayudarme en la parte experimental y quedarse hasta muy noche o llegar tan temprano incluso cuando ya quería acabar, por sus consejos, por sus pláticas divertidas y por motivarme a no desertar.

A mi mejor amiga, Vania Jael, por siempre estar, a pesar de la distancia siempre me apoyaste en todas mis decisiones y estuviste ahí para escucharme todas las veces que lo necesitaba.

A mi amigo Alejandro, por ser un apoyo emocional aun cuando estábamos a la distancia, por escucharme y motivarme a no rendirme, por todos esos mensajes de aliento y esperanza que me ayudaron en los momentos difíciles.

A mis gatos, especialmente a Güero, por acompañarme todas esas noches en las que me quedaba escribiendo hasta muy tarde porque no podía dormir con tal de acabar.

A Chester por cuidarme incluso cuando no salía de casa para seguir escribiendo.

A Wizdo por estar toda tu vida cuidando a mi familia, fueron los mejores 12 años, espero que descanses y desde donde estes, sigas siendo un perro feliz.

Gracias a todas las personas que conocí durante este trayecto, algunas que vinieron y no se quedaron, también muchas gracias.

Gracias a ti, gracias por creer en mí y en que lo lograría.

Dedicatoria

Para Dios, por siempre estar.

Para mis padres, Eric y Doris, por el apoyo y amor incondicional que me dieron, ustedes hicieron esto y más posible.

Para Ariette y Alan, los mejores amigos que la vida me pudo dar.

Para mis abuelos, por darme sus valiosos consejos, compartirme sus experiencias y motivarme a siempre seguir.

Para mis tías, por aconsejarme, a enseñarme a ser perseverante, a no rendirme y que siempre habrá una solución.

A todas aquellas personas que conocí y me motivaron a seguir durante todo este trayecto, gracias por formar parte de mi vida.

“Incluso si me caigo y me lastimo, seguiré corriendo hacia mi sueño.*”*

BTS, *“Epilogue: Forever Young”*

Índice

Índice de figuras 8

Índice de tablas 9

Abreviaturas 10

Unidades de medida 11

1. Resumen 12

2. Abstract 13

3. Marco teórico 14

3.1 Origen de la guanábana 14

3.2 Producción de la guanábana 15

3.3 Composición nutricional de la guanábana 15

3.4 Capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de la guanábana 15

3.5 Fibra dietética de las cáscaras 16

3.6 Usos de los residuos de guanábana 17

3.7 Tamaño de partícula 19

3.8 Bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos antioxidantes 20

3.9 Fermentación colónica *in vitro* 21

4. Problema de investigación 23

5. Justificación 24

6. Objetivos 25

6.1 Objetivo general 25

6.2 Objetivos específicos 25

7. Diseño metodológico 26

7.1 Obtención de muestra 26

7.2 Liofilización de la muestra 27

7.3 Molido y tamizado de la muestra 27

7.4 Propiedades fisicoquímicas 27

7.4.1. pH 27
7.4.2. Sólidos solubles totales (SST) 27
7.4.3. Color 27
7.5. Determinación de fibra dietética total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI) 28
7.5.1 Propiedades funcionales de la cáscara de guanábana 30
7.5.1.1 Capacidad de retención de agua (CRA) 30
7.5.1.2 Capacidad de hinchamiento (CH) 31
7.5.1.3. Capacidad de retención de lípidos (CRL) 31
7.5.1.4. Capacidad de retención de glucosa (CRG) 31
7.6. Extracción de antioxidantes con solventes orgánicos 32
7.7. Compuestos fenólicos totales (CFT) 33
7.8. Capacidad antioxidante 33
7.8.1. Método ABTS 33
7.8.2. Método DPPH 34
7.8.3. Método FRAP 34
7.9. Bioaccesibilidad intestinal *in vitro* de antioxidantes 35
7.10. Fermentación colónica *in vitro* 36
7.10.1. Conteo de bacterias ácido lácticas (BAL) 38
7.11. Análisis estadístico 38
8. Resultados y discusión 39
8.1 Propiedades fisicoquímicas 39
8.1.1. pH 39
8.1.2. Sólidos solubles totales (SST) 40
8.1.3. Color 41
8.2 Fibra dietética total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI) 43
8.3 Propiedades funcionales de la cáscara de guanábana 45
8.3.1 Capacidad de retención de agua (CRA) 45

8.3.2 Capacidad de hinchamiento (CH) 46
8.3.3. Capacidad de retención de lípidos (CRL) 47
8.3.4. Capacidad de retención de glucosa (CRG) 49
8.4. Compuestos fenólicos totales 50
8.5 Capacidad antioxidante 53
8.5.1 ABTS 53
8.5.2 DPPH 55
8.5.3 FRAP 56
8.6 Cambio de pH durante fermentación colónica *in vitro* 57
8.7 Bacterias ácido lácticas (BAL) durante la fermentación colónica *in vitro* 59
9. Conclusiones 62
10. Recomendaciones 63
11. Referencias bibliográficas 64
Anexos 92

Índice de figuras

Figura 1. Morfología del fruto de guanábana 14

Figura 2. Diagrama de flujo del diseño metodológico 26

Figura 3. Modelo de fermentación colónica *in vitro* 37

Figura 4. Valores de pH en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 39

Figura 5. Valores de sólidos solubles totales (°Brix) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 40

Figura 6. Color obtenido de la cáscara de guanábana. 43

Figura 7. Capacidad de retención de agua en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 46

Figura 8. Capacidad de hinchamiento en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 47

Figura 9. Capacidad de retención de lípidos en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 48

Figura 10. Capacidad de retención de glucosa en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 50

Figura 11. Valores de pH durante la fermentación colónica *in vitro* 59

Figura 12. Recuento de bacterias ácido lácticas durante la fermentación colónica *in vitro* 60

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros de color en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 41

Tabla 2. Contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 44

Tabla 3. Compuestos fenólicos totales en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. 51

Tabla 4. Capacidad antioxidante medida por ABTS en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 53

Tabla 5. Capacidad antioxidante medida por DPPH en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 55

Tabla 6. Capacidad antioxidante medida por FRAP en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula 57

Abreviaturas

a*: coordenadas rojo/verde
AA: ácido ascórbico
ABTS: ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)
ANOVA: análisis de varianza
AOAC: Association of Official Analytical Chemists
b*: coordenadas amarillo/azul
BAL: bacterias ácido lácticas
bs: base seca
C*: Croma, pureza o saturación
CFT: compuestos fenólicos totales
CH: capacidad de hinchamiento
CRA: capacidad de retención de agua
CRG: capacidad de retención de glucosa
CRL: capacidad de retención de lípidos
$\triangle E$: delta E, diferencia de color
DE: desviación estándar
DPPH: 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo
DNS: ácido 3,5 dinitrosalicílico
EAA: equivalentes de ácido ascórbico
EAG: equivalentes de ácido gálico
EQ: equivalentes de quercetina
ET: equivalentes de Trolox
FDI: fibra dietética insoluble
FDS: fibra dietética soluble
FDT: fibra dietética total
FRAP: Ferric Reducing Antioxidant Power
H^+: iones hidrógeno
h°: Hue, tonalidad
HCl: ácido clorhídrico
L*: luminosidad
$NaHCO_3$: bicarbonato de sodio
NaOH: hidróxido de sodio
pH: potencial de hidrógeno
SPSS: Statistical Package for Social Sciences
SST: sólidos solubles totales
TPTZ: hierro-2,4,6-tripyridyl-1,3,5-triazina

Unidades de medida

°Brix: grados Brix
°C: grados centígrados
g: gramos
g/g: gramo por gramo
g/L: gramo por litro
h: horas
kDa: kiloDalton
kg: kilogramo
M: Molar o Molaridad
mBar: miliBar
mg: miligramo
mg/g: miligramos por gramo
mg/L: miligramos por litro
mg/mL: miligramos por mililitro
min: minutos
mL: mililitros
mL/g: mililitros por gramo
mm: milímetros
mM: miliMolar
mmol o mMol: milimol
N: Normal o Normalidad
nm: nanómetros
%: porcentaje
p/v: peso por volumen
rpm: revoluciones por minuto
UFC/mL: unidades formadoras de colonias por mililitro
µg: microgramo
µg/g: microgramos por gramo
µL: microlitro
µm: micrómetro
µmol/L: micromoles por litro
v/v: volumen por volumen

1. Resumen

México es uno de los principales productores de guanábana en el continente y durante su procesamiento se generan residuos como la cáscara, el cuál es de gran interés debido a su alto contenido en compuestos bioactivos (polifenoles y fibra dietética), utilizados en la industria alimentaria y farmacéutica. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes tamaños de partícula de la cáscara de guanábana, sobre las propiedades funcionales de la fibra y su absorción *in vitro* de compuestos antioxidantes, para valorar su aprovechamiento como un alimento funcional con beneficios para la salud. Los resultados se analizaron mediante ANOVA y las diferencias se compararon a un nivel de significancia de $p<0.05$. Se evaluó color y la partícula de 250 µm exhibió mayor luminosidad (68.53). La muestra de 850 µm presentó elevado porcentaje de fibra dietética total (FDT: 77.28%) e insoluble (FDI: 72.92%), mientras que la muestra de 250 µm destacó por su gran contenido en fibra soluble (FDS: 6.11%). En las propiedades funcionales de la fibra, la cáscara de 250 µm obtuvo la mayor capacidad de retención de agua (CRA: 8.62 g/g), hinchamiento (CH: 4.28 mL/g) y retención de lípidos (CRL: 3.77 g/g), mientras que el control demostró tener mejor capacidad de retención de glucosa (CRG: 254.67 mg/g). Se encontró elevada cantidad de compuestos fenólicos totales en la muestra de 250 µm (CFT: 6390 mg EAG/100 g bs), así como cifras más altas en capacidad antioxidante por ABTS (13032.31 µmol ET/100 g bs), DPPH (28084.36 µmol ET/100 g bs) y FRAP (207.08 µmol Fe(II)/100 g bs). En bioaccesibilidad *in vitro* la cáscara de 250 µm tuvo el mayor porcentaje de CFT, ABTS, DPPH y FRAP (9, 25, 2 y 13%, respectivamente). En fermentación colónica *in vitro*, después de 24 horas, la partícula de menor tamaño (250 µm) aumentó su porcentaje en CFT (168%), ABTS (471%), DPPH (15%) y FRAP (38%). El pH de la cáscara de 250 µm disminuyó (8.50), lo que se asoció con un crecimiento significativo $(p<0.05)$ de bacterias ácido lácticas (7.91 UFC/mL). Finalmente, la cáscara de guanábana a 250 µm presentó mejores propiedades funcionales y antioxidantes, sugiriendo su potencial como un alimento funcional con beneficios para la salud.

Palabras clave: antioxidantes, bioaccesibilidad *in vitro,* cáscara de guanábana, fermentación colónica *in vitro*, fibra, tamaño de partícula.

2. Abstract

Mexico is one of the main producers of soursop in the Americas, and during its processing, by-products such as the peel are generated. The peel is of great interest due to its high content of bioactive compounds (polyphenols and dietary fiber), which are used in the food and pharmaceutical industries. The objective of this study was to evaluate the effect of different particle sizes of soursop peel on the functional properties of its fiber and it's *in vitro* absorption of antioxidant compounds, in order to assess its potential as a functional food with health benefits. The results were analyzed using ANOVA, and differences were compared at a significance level of $p<0.05$. Color was assessed, with the 250 µm particle size exhibiting the highest luminosity (68.53). The 850 µm sample showed a high percentage of total dietary fiber (TDF: 77.28%) and insoluble fiber (IDF: 72.92%), while the 250 µm sample was notable for its high soluble fiber content (SDF: 6.11%). Regarding the functional properties of the fiber, the 250 µm peel achieved the highest water retention capacity (WRC: 8.62 g/g), swelling capacity (SC: 4.28 mL/g), and lipid retention capacity (LRC: 3.77 g/g), while the control demonstrated superior glucose retention capacity (GRC: 254.67 mg/g). The 250 µm sample displayed elevated levels of total phenolic compounds (TPC: 6390 mg GAE/100 g dw) and the highest antioxidant capacities as measured by ABTS (13032.31 µmol TE/100 g dw), DPPH (28084.36 µmol TE/100 g dw), and FRAP (207.08 µmol Fe (II)/100 g dw). In *in vitro* bioaccessibility tests, the 250 µm peel exhibited the highest percentages for TPC, ABTS, DPPH, and FRAP (9%, 25%, 2%, and 13%, respectively). During *in vitro* colonic fermentation, after 24 hours, the smallest particle size (250 µm) showed increases in TPC (168%), ABTS (471%), DPPH (15%), and FRAP (38%). The pH of the 250 µm peel decreased (8.50), which was associated with significant growth ($p<0.05$) of lactic acid bacteria (7.91 CFU/mL). Finally, the 250 µm soursop peel exhibited superior functional and antioxidant properties, suggesting its potential as a functional food with health-promoting benefits.

Keywords: antioxidants, *in vitro* bioaccessibility, soursop peel, *in vitro* colonic fermentation, fiber, particle size.

3. Marco teórico

3.1 Origen de la guanábana

La guanábana conocida como *Annona muricata* L. o también llamada guayabano en Filipinas, sirsak en Indonesia, graviola o papaya brasileña en Brasil y soursop en inglés (Ilango et al., 2022; Osei et al., 2023), es un fruto que pertenece a la familia Annonaceae, abarcando más de 130 géneros y 2300 especies (Mendoza-Méndez et al., 2022; Mutakin et al., 2022). El árbol de guanábana tiene hojas tipo perenne, florece y da frutos la mayor parte del año (Quílez et al., 2018). Su fruto está constituido por 20% de cáscara, 67% pulpa, 8% son semillas y el 4% es raquis (Figura 1) (Afzaal et al., 2022). Esta fruta es de color verde con forma ovoide, con diámetro entre 29 y 41 cm, puede llegar a pesar entre 0.5 a 4.5 kg, la cáscara es espinosa y semi amarga, mientras que la pulpa es jugosa, aromática, ácida y es de color blanco, sus semillas suelen estar en el interior y medir de 1 a 2 cm de largo (Nayak & Hegde, 2021; Zubaidi et al., 2023).

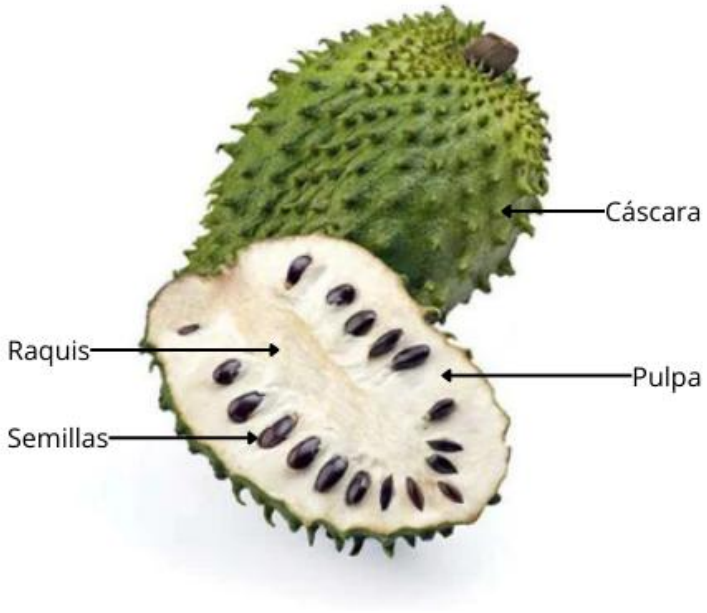


Figura 1. Morfología del fruto de guanábana.

3.2 Producción de la guanábana

La guanábana es una fruta tropical nativa de América Central y este de la India, y México es uno de los mayores países productores, seguido de Perú, Brasil, Ecuador, Guatemala y Haití, siendo los principales exportadores, especialmente como pulpa y fruta fresca (Rady et al., 2018; Patil et al., 2023; Santos et al., 2023). En 2022, la producción de guanábana en México se elevó hasta treinta y cuatro mil cuatrocientos treinta y siete toneladas (34,437 t) al año y los estados con mayor producción fueron Nayarit (26,744.16 t), Colima (3,568.30 t) y Michoacán (2,009.96 t) (SIAP, 2022).

3.3 Composición nutricional de la guanábana

La pulpa de guanábana posee alto contenido de agua (76-83%), carbohidratos (13-15%) y es baja en lípidos (0.67-0.85%), proteínas (0.26-1.03%) y fibra dietética (0.36-2.59%) (George et al., 2014; Anaya-Esparza et al., 2020). Respecto a las semillas de la guanábana, son ricas en aceites (22%) y proteína (21%), el aceite contiene el 28.07% de ácidos grasos saturados (ácido palmítico) y 71.93% de insaturados (como el ácido linoleico, oleico y esteárico) (Barros et al., 2020). Por otro lado, la cáscara, de acuerdo a Chimbevo y Essuman (2019), presenta por cada 100 g de base seca el 41.02% de humedad, 2.96% de cenizas, 3.75% de proteína, 50.03% de fibra, 4.99% de lípidos y 32.19% de carbohidratos. En otro estudio realizado por Domingues et al. (2024), encontraron que por cada 100 g de cáscara en base fresca contenía 76.44% de humedad, 0.94% de ceniza, 1.75% de proteína, 17.68% de fibra dietética total, 2.25% de lípidos y 18.62% de carbohidratos totales.

3.4 Capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de la guanábana

Existen varios compuestos y metabolitos secundarios en la pulpa de guanábana, así como en los subproductos como cáscaras y semillas que representan una valiosa fuente de compuestos bioactivos, entre los que se incluyen ácidos fenólicos, carotenoides, péptidos, aminoácidos, ácidos grasos, minerales, fibra y flavonoides (Coria-Téllez et al., 2018; Rather, 2023). La rutina, la quercetina y el kaempferol son algunos de los flavonoides más comunes en la guanábana (Patil et al., 2023).

Estudios han cuantificado compuestos antioxidantes, así como la capacidad antioxidante de la pulpa de guanábana, dentro de lo que se reportó fue el contenido total de fenoles (160.28 ± 2.89 mg de EAG/100 g), carotenoides (7.44 µg/g), ABTS (602.52 ± 19.1 µmol ET/100 g), DPPH (830.06 ± 23.14 µmol ET/100 g) y FRAP (62.0 ± 26.1 µmol de EAA/100 g) (Neta et al., 2018; Villarreal-Fuentes et al., 2020).

Respecto a la cáscara de guanábana, son pocos los estudios que reportan el contenido de antioxidantes. Du et al., (2021) reportó flavonoides totales (0.06 ± 0.01 mg EQ/g), fenoles totales (4.07 ± 0.20 mg EAG/g), así como su capacidad antioxidante por ABTS (1.08 ± 0.01 mg EAA/g), DPPH (0.70 ± 0.01 mg EAA/g) y FRAP (0.11 ± 0.01 mg EAA/g). Mientras que Domingues et al. (2024) estudiaron la cáscara fresca y obtuvieron fenoles totales de 645 ± 54 mg EAG/100 g y capacidad antioxidante por DPPH (3280 ± 158 µmol ET/100 g), ABTS (5768 ± 386 µmol ET/100 g) y FRAP (8997 ± 886 µmol sulfato ferroso/100 g).

La presencia predominante de antioxidantes polifenólicos, como flavonoides y ácidos fenólicos es crucial, ya que éstos eliminan radicales libres, interrumpen las reacciones en cadena oxidativa y reducen la incidencia de enfermedades crónicas, trastornos cardiovasculares, cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Patil et al., 2023; Wu et al., 2024). Por otro lado, se ha observado que la disponibilidad de compuestos fenólicos está influenciada por la fibra contenida en la matriz (Ferreyra et al., 2021).

3.5 Fibra dietética de las cáscaras

La fibra dietética (FD) es un polímero de carbohidratos de origen vegetal que no se digiere en la parte superior del tracto gastrointestinal (Zhang et al., 2024). De acuerdo a su solubilidad se clasifica en dos categorías, en fibra dietética soluble (FDS) e insoluble (FDI) (Tian et al., 2022). La FDI (compuesta por hemicelulosa, celulosa y lignina) se caracteriza por su baja o nula fermentación, debido a que esta fibra no se dispersa en agua y por lo tanto, posee alta capacidad de retención de agua, lo cuál permite absorber y atrapar agua dentro de su matriz porosa, lo que propicia un incremento del volumen fecal, promueve la absorción y rápida eliminación de aceites (Wang et al., 2022). Mientras que la FDS consta principalmente de pectinas,

oligosacáridos y gomas, las cuales tienen la capacidad de aumentar la viscosidad para reducir los niveles de glucosa y colesterol séricos (Zou et al., 2022). Además, se caracteriza por ser altamente fermentable por la microbiota intestinal, produciendo ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como el ácido acético, propiónico y butírico (Wang et al., 2019; Guan et al., 2021). Cabe destacar que el ácido butírico es la principal fuente de energía para los colonocitos, por lo que se considera protector contra el cáncer de colon (Wu et al., 2018). Otro beneficio que aporta la FDS es el incremento de las bacterias ácido lácticas, las cuales pueden restablecer el equilibrio de las poblaciones de la microbiota intestinal mediante el control de patógenos (Jung et al., 2021).

Es importante mencionar que las cáscaras de frutas contienen gran cantidad de fibra, lo que puede tener efectos positivos o negativos en la biodisponibilidad de los fenoles (Joseph et al., 2024). Diversos estudios han reportado el contenido de fibra dietética en cáscaras tales como la de plátano (53%), aguacate (76.71%), mango (59%) y guanábana (50.03%) (Zaini et al., 2022; Palma-González, 2023; Tariq et al., 2023; Villacís-Chiriboga et al., 2023). En particular, la cáscara de guanábana contiene 4.05% de FDS y 40.42% de FDI (Villacís-Chiriboga et al., 2023). Por lo tanto, el aprovechamiento de estos subproductos resulta de gran interés para la producción de ingredientes ricos en fibra dietética, ya que los residuos generados pueden recuperarse y reutilizarse, agregando valor a la producción principal (Garcia-Amezquita et al., 2018; Masood et al., 2020).

3.6 Usos de los residuos de guanábana

El desperdicio de alimentos es una preocupación relevante para el medio ambiente, la economía y la sociedad (Searchinger et al., 2019). Según el Índice de Pérdida de Alimentos 2021 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), más del 17% de la producción global de alimentos se desperdicia, siendo los hogares responsables del 61%, los servicios de alimentación del 26% y las tiendas minoristas del 13% (Brennan et al., 2020). La FAO estima que más de un tercio de los alimentos destinados al consumo humano se pierden cada año (FAO, 2019). A lo largo

de la cadena alimentaria se obtienen desechos, desde la producción agrícola hasta el consumo en los hogares (Morone et al., 2019). Durante el procesamiento de los alimentos, son las frutas, vegetales y tubérculos los que más desechos generan (Garcia-Herrero et al., 2018; Saparbekova et al., 2022). Las frutas, al procesarlas, dejan residuos sólidos (como cáscaras, pieles y semillas) (Campos et al., 2020); estos contienen fibra dietética, fenoles, carotenoides, polisacáridos, aceites y vitaminas que benefician a la salud humana (Šimat et al., 2024). El porcentaje de residuo varía según la fruta, por ejemplo, el plátano genera alrededor del 20%, el mango entre 30 y 50%, la piña 40-50% y la guanábana el 32% (Tariq et al., 2023).

En los últimos años, ha aumentado el interés en la utilización de estos subproductos debido a la extracción de sus componentes bioactivos, con la finalidad de usarlos en la producción de nutracéuticos, alimentos funcionales e incluso para mejorar la calidad de los alimentos existentes en términos de propiedades fisicoquímicas, funcionales, antioxidantes y antimicrobianas (Dilucia et al., 2020; Zemljič et al., 2022; Sani et al., 2022; Fehlberg et al., 2023). Estos avances no solo benefician a la salud, sino que también reducen el desperdicio total de alimentos y fomentan prácticas más sostenibles para el medio ambiente (Lucarini et al., 2021).

A pesar de que el uso de cáscara de guanábana en nuevos productos ha sido poco estudiado, éstas podrían aprovecharse de manera similar a otros residuos de guanábana, como por ejemplo, en infusiones tradicionales, aplicaciones farmacéuticas, así como en la producción de alimentos (Lee et al., 2016; Gavamukulya et al., 2017; Aguilar-Hernández et al., 2019; Santos et al., 2023). Además, la cáscara de guanábana podría procesarse en harina o polvos, e implementarse en diversos alimentos como en la panadería, por su alto contenido de fibra dietética contribuiría a una mejor salud gastrointestinal (Saavedra et al., 2021). El polvo de cáscara de guanábana, ocasiona un aumento en la capacidad antioxidante de los productos alimenticios al incorporar compuestos fenólicos, lo que la convierte en un potencial nutracéutico (Resende y Franca, 2019). Ya que se ha encontrado que los extractos de este fruto son coadyuvantes en el tratamiento de enfermedades de la piel, respiratorias, cardíacas, diabetes y cáncer (Adefegha et al., 2015; Miranda et al., 2021;

Strijk et al., 2021; Ngemenya et al., 2022). Un estudio sobre cáscara de guanábana cortada en pequeños trozos y convertido en polvo fino resaltó la presencia de fitoquímicos, que tiene un efecto restaurador en las células pancreáticas (Ojo et al., 2022). Las semillas de guanábana al tamizarlas en polvo fino, demostró tener un alto contenido en aceite, lo que permite la presencia de compuestos lipofílicos con propiedades adicionales, así como la capacidad de atenuar la hiperplasia prostática benigna (Adaramoye et al., 2018). Para producir estos polvos a base de subproductos pasan por un proceso de molienda, que ocasiona una redistribución de las partículas y propicia una mejora en la extracción de compuestos bioactivos (Ahmed et al., 2019).

3.7 Tamaño de partícula

La molienda, proceso por el cual se da un cambio en el tamaño de partícula, llega a producir una redistribución de los componentes de la fibra en fracciones insolubles a solubles (Liu et al., 2016). El tamaño de partícula de un material influye en aspectos como su estructura, porosidad, área de superficie, propiedades funcionales, etc. (Zhao et al., 2018). Por lo que una reducción del tamaño de partícula propicia una transformación en su estructura, esto afecta el proceso de liberación de los compuestos antioxidantes retenidos en la matriz, así como su absorción (Speroni et al., 2020; Li et al., 2021). Asimismo, impacta sobre las propiedades funcionales de la fibra, ejemplo de ello es la capacidad de hinchamiento, capacidad de retención de agua, lípidos y glucosa, las cuales se relacionan con las fracciones de la fibra soluble e insoluble (Yin et al., 2021). Existen estudios sobre la influencia del tamaño de partícula en otras matrices alimentarias como la cáscara de calabaza a 60 µm, cáscara de lima dulce y pomelo a 413 µm, cáscara de naranja y granada con un rango del tamaño de partícula de 53 a 150 µm, así como la cáscara de calabaza a 60 µm, donde se encontró que a menor tamaño hubo mejora en sus propiedades físicas, actividad antioxidante y microbiana (Vathsala et al., 2024; Karakuş et al., 2023; Gavril et al., 2024). Mientras que en una cáscara de jaboticaba (149 µm), demostró que el tamaño de partícula tuvo un efecto positivo en las propiedades del polvo (Gurak et al., 2014). Cabe mencionar que hasta el momento no existen estudios que evalúen las propiedades de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. Por lo que

sería de utilidad obtener resultados sobre el tamaño de partícula de esta cáscara y su fermentación por la microbiota intestinal.

3.8 Bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos antioxidantes

La bioaccesibilidad se define como la porción del compuesto ingerido que se libera de su matriz alimentaria, quedando disponible para su absorción en el intestino (Cardoso et al., 2014). Mientras que la biodisponibilidad se refiere a la liberación de antioxidantes de la matriz alimentaria tras el proceso de digestión (Domínguez-Fernández et al., 2021). Estos antioxidantes una vez liberados, pueden ser absorbidos en el torrente sanguíneo e incorporarse al sistema circulatorio, lo que les permite volverse "biodisponibles" y participar en funciones metabólicas (Thakur et al., 2020). Tanto la bioaccesibilidad y la biodisponibilidad ofrecen un análisis detallado sobre las interacciones entre los nutrientes y los componentes de los alimentos, así como el impacto del pH, las enzimas y las técnicas de preparación y procesamiento en la capacidad de absorción de micronutrientes (Sandberg et al., 2005). Lo que podría ser crucial para determinar la calidad nutricional de un nutriente o alimento, ya que revela su potencial de ser absorbido por el organismo (Dima et al., 2020).

La bioaccesibilidad se puede evaluar mediante modelos de solubilidad, diazibilidad o gastrointestinales, que simulan la fase gástrica e intestinal (Wu et al., 2024). A diferencia de la biodisponibilidad que se realiza en modelos *in vivo*, ya sea en animales o en humanos, mediante el seguimiento de administración de una dosis del compuesto aislado (Actis-Goretta et al., 2013). Aunque estos estudios *in vivo* proporcionan información precisa, son más costosos, requieren mayor tiempo, implican la participación de humanos y presentan desafíos éticos (Thakur et al., 2020). Por ello, se han desarrollado metodologías *in vitro* para la bioaccesibilidad que son simples, rápidas, económicas y producen resultados reproducibles (Failla et al., 2008). Existen varios modelos de bioaccesibilidad *in vitro*, algunos de ellos son el modelo estático de digestión gastrointestinal, el modelo de cultivo celular Caco-2, modelo semi-dinámico y modelo dinámico de digestión gastrointestinal, entre otros (Wu y Chen, 2021). Estos métodos constituyen fases de digestión *in vitro* de dos o tres, replicando las

condiciones de la boca (ocasionalmente incluida), el estómago y el intestino delgado (Etcheverry et al., 2012).

Se han reportado estudios donde se determinó la bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos fenólicos presentes en subproductos de guanábana fresca, como la cáscara (Domingues et al., 2024). Durante este proceso, los compuestos fenólicos totales se unen a las proteínas de diversas formas, como enlaces de hidrógeno, covalentes e hidrofóbicos, esto se ve reflejado al liberarse en el intestino delgado (Bouayed et al., 2011; Padayachee et al., 2012). La cáscara al poseer una gran cantidad de fibra, puede afectar positiva o negativamente la accesibilidad de compuestos fenólicos en el tracto gastrointestinal, ya que se conectan mediante enlaces covalentes y no covalentes (Jakobek y Matić, 2019; Ferreyra et al., 2021). Los compuestos fenólicos que no son absorbidos llegan al colon donde son metabolizados por la microbiota intestinal en compuestos más pequeños y simples (Domínguez-Avila et al., 2020).

3.9 Fermentación colónica *in vitro*

La microbiota intestinal es una comunidad microbiana diversa que reside en el tracto gastrointestinal, obtiene energía mediante la fermentación de los alimentos ingeridos (Vidal et al., 2024). Produce metabolitos vitales como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC), promueve el desarrollo y la maduración del sistema inmunológico para proteger al organismo de patógenos externos (Sun et al., 2022).

El proceso digestivo ofrece valiosa información sobre la estabilidad de los nutrientes durante su paso por el tracto gastrointestinal, siendo fundamental para evaluar la vulnerabilidad de las proteínas frente a la proteólisis y la descomposición de otras moléculas, como los lípidos y carbohidratos (Coda et al., 2017; Asensio-Grau et al., 2018; Ma et al., 2020). La microbiota intestinal utiliza preferentemente carbohidratos no digeribles, como fibra, celulosa, hemicelulosa, pectina, gomas y alginatos, los cuales son fermentados en el colon (Veintimilla-Gozalbo et al., 2021). Este proceso da lugar a la formación de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), principalmente acetato,

butirato y propionato, así como gases como hidrógeno y dióxido de carbono (Koh et al., 2016).

Por otro lado, los polifenoles que no se absorben en las etapas iniciales de la digestión pueden quedar adheridos a la matriz alimentaria, siendo liberados más adelante en el colon, donde son transformados por la microbiota intestinal en compuestos más pequeños que el organismo puede asimilar (Duda-Chodak et al., 2015; Ozdal et al., 2016). Se ha demostrado que los compuestos fenólicos poseen la capacidad de reducir la inflamación y el estrés oxidativo en el colon, ofreciendo así beneficios para la prevención de enfermedades crónicas, como el cáncer colorrectal (Cañas et al., 2024). Además, se ha identificado que estos compuestos tienen un efecto modulador sobre la composición de la microbiota intestinal, lo que contribuye a la salud en el intestino (De Samhita et al., 2023).

4. Problema de investigación

Durante el procesamiento de frutas y verduras, se obtiene una gran cantidad de residuos como cáscaras y semillas los cuales son desechados. Por ende, no se les da un valor agregado, siendo que aún contienen compuestos bioactivos como antioxidantes y fibra dietética que pueden beneficiar a la salud humana. Un ejemplo de ello, es el fruto de guanábana (*Annona muricata* L.), que durante su procesamiento, el 32% de su composición es considerado residuo y de ese porcentaje, el 20% corresponde a la cáscara. En los últimos años, se han realizado estudios sobre los residuos de guanábana (especialmente en semillas y en menor cantidad en la cáscara), y se ha encontrado la presencia de varios compuestos bioactivos, tales como polifenoles y fibra, los cuales impactan positivamente en la salud y pueden ser ocupados en la industria farmacéutica y alimentaria. Sin embargo, la información respecto al efecto del tamaño de partícula de la cáscara de guanábana es nula. Esto se debe a que la mayor parte de las investigaciones se enfocan en la extracción de antioxidantes o las propiedades de la fibra, sin tomar en cuenta este aspecto. El tamaño de partícula es de suma importancia, ya que a menor tamaño se produce una mayor liberación de los compuestos antioxidantes retenidos en la matriz, así como su absorción intestinal, lo que podría tener un impacto en la salud.

5. Justificación

La cáscara de guanábana es una buena fuente de compuestos bioactivos como los compuestos antioxidantes y fibra dietética. Por lo tanto, tienen un valor agregado que puede aprovecharse en diferentes industrias como la farmacéutica y alimentaria. En particular, los antioxidantes interactúan con los radicales libres, neutralizándolos y previniendo el estrés oxidativo, que se asocia con enfermedades crónicas como diabetes, enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Por su parte, la fibra dietética ejerce efectos beneficiosos al interactuar con el sistema digestivo, mejorando la salud intestinal, regulando los niveles de glucosa y colesterol, y fomentando el crecimiento de bacterias ácido lácticas. Asimismo, es importante considerar que el tamaño de partícula influye en la extracción de compuestos bioactivos y en las propiedades funcionales de la fibra, así como en la absorción de estos compuestos. Hasta el momento no existe evidencia respecto a la comparación de diferentes tamaños de partícula de la cáscara de guanábana para extraer compuestos bioactivos, así como para la evaluación de las propiedades funcionales de fibra, bioaccesibilidad y fermentación colónica *in vitro*. Por ello, los resultados obtenidos podrían ofrecer información más amplia sobre la utilización de estos residuos y sus posibles beneficios para la salud.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes tamaños de partícula (250, 500, 850 y >850 µm) de la cáscara de guanábana (*Annona muricata* L.), sobre las propiedades funcionales de la fibra y su absorción *in vitro* de compuestos antioxidantes, para valorar su aprovechamiento como un alimento funcional con beneficios para la salud.

6.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas (pH, sólidos solubles totales y color) de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Determinar la fibra dietética total, soluble e insoluble en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Evaluar las propiedades funcionales de la fibra (capacidad de retención de agua, hinchamiento, retención de lípidos y retención de glucosa) de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Determinar los compuestos fenólicos totales, además de la capacidad antioxidante mediante DPPH, ABTS y FRAP, en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Evaluar la bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos antioxidantes en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Analizar la fermentación colónica *in vitro* (pH, bacterias ácido lácticas y compuestos antioxidantes) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.

7. Diseño metodológico

El presente estudio fue de tipo experimental y en la Figura 2 se observa el diagrama general del diseño metodológico a seguir.

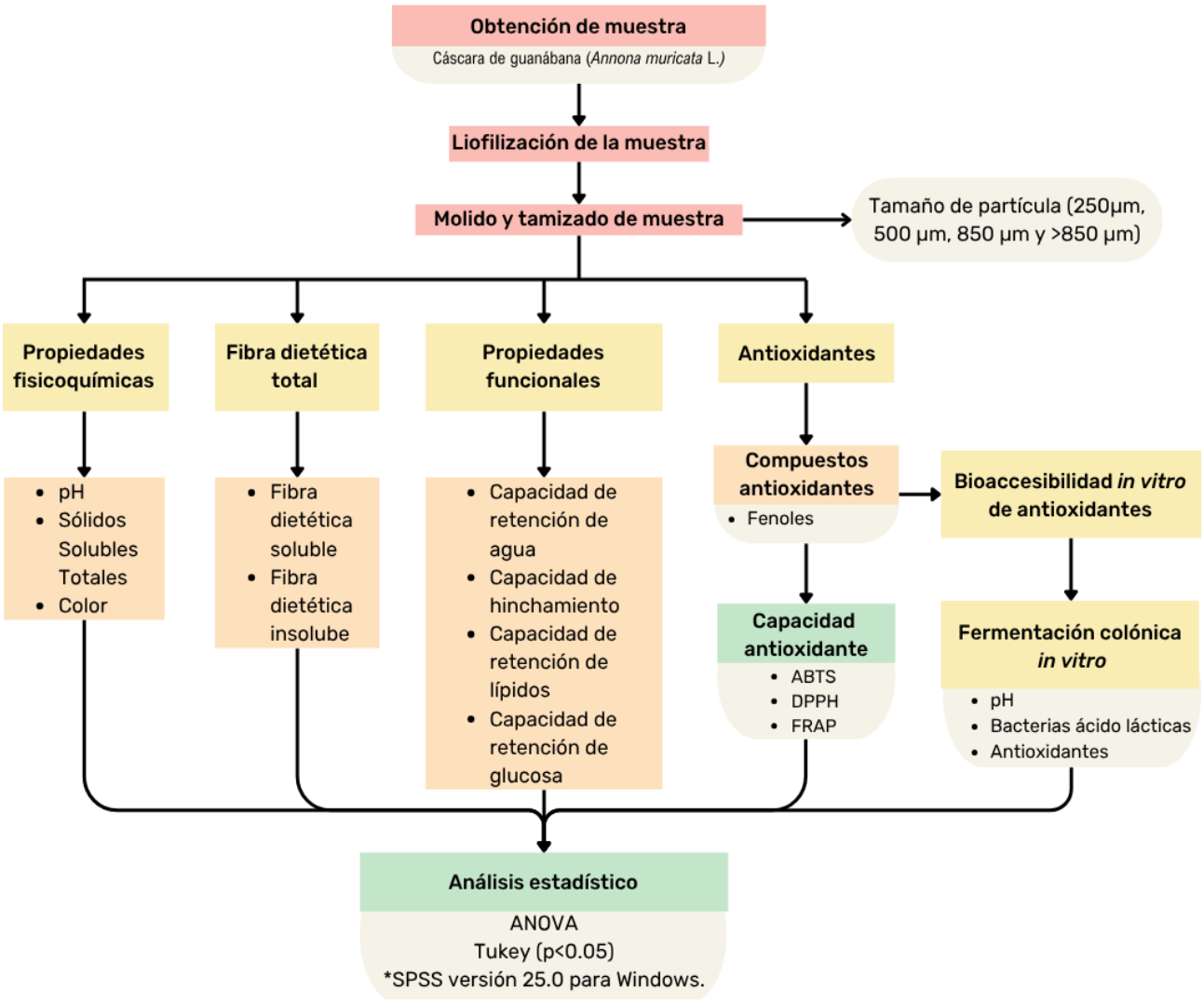


Figura 2. Diagrama de flujo del diseño metodológico.

7.1 Obtención de muestra

La cáscara de guanábana (*Annona muricata* L.) se obtuvo de la central de abastos de Pachuca, Hidalgo, proveniente del estado de Nayarit. El fruto fue lavado y cortado en

trozos, se separó manualmente la pulpa de la cáscara. Fue almacenado en congelación a -32°C para su posterior liofilización.

7.2 Liofilización de la muestra

La muestra congelada fue liofilizada a 0.045 mBar a 52°C (LABCONCO, FreeZone^{6}, EUA), se almacenó a -32°C y se etiquetó en bolsas de cierre hermético hasta su uso.

7.3 Molido y tamizado de la muestra

La muestra liofilizada fue molida y tamizada a tres tamaños de partícula (250, 500 y 850 µm, respectivamente) y una muestra sin tamizar (solo fue triturada), catalogada como control (>850 µm).

7.4 Propiedades fisicoquímicas

7.4.1. pH

El pH es una escala numérica que cuantifica la concentración de hidrógeno (H^+) de una solución mediante una escala de 0 a 14, donde 7 es neutro (Karastogianni et al., 2015). El pH de las muestras se midió con un potenciómetro (Hanna Instruments, 210, Rumania), se calibró con las soluciones buffer pH 4 y 7 antes de su uso. Se preparó una solución en proporción de 1:10 (p/v) de muestra y agua destilada en vasos de precipitado de 25 mL y se sumergió el electrodo.

7.4.2. Sólidos solubles totales (SST)

Se utilizó un refractómetro con escala de 0 a 32 °Brix (Hangzhou Chincan Trading Co., Ltd., Brix/ATC FG-113, China), fue calibrado con una gota de agua destilada. Para las muestras, se preparó una solución acuosa 1:10 y se colocó una gota de la solución en el instrumento con una pipeta Pasteur. Los sólidos solubles totales se expresaron como °Brix.

7.4.3. Color

El análisis colorimétrico se realizó con un colorímetro portátil (Generic, CS-10, EUA), colocando la cantidad de muestra, se obtuvieron coordenadas de color *L*, a*, b*.*

Donde:

*L** = corresponde a la luminosidad con valores de 0 (negro, mínima luminosidad) a 100 (blanco, máxima luminosidad).

*a** = coordenadas rojo/ verde (+a indica rojo y -a indica verde).

*b** = coordenadas amarillo/ azul (+b indica amarillo y -b indica azul).

Los datos obtenidos de los parámetros anteriormente mencionados se utilizaron para obtener los valores de Hue ($h°$), Croma (C) y diferencia de color ($\triangle E$), mediante las siguientes fórmulas:

$$h^{\circ}_{ab} = arctan\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$C = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

$$\triangle E = \sqrt{\triangle L^2 + \triangle a^2 + \triangle b^2}$$

Los valores de color *L*, a** y *b** se introdujeron en el calculador de color EasyRGB (2024) para visualizar con exactitud los colores que se identificaron en cada muestra.

7.5. Determinación de fibra dietética total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI)

Se siguió la metodología de la AOAC 985.29 para determinar el contenido de fibra dietética total, mientras que para evaluar el contenido de fibra soluble e insoluble se utilizó el método enzimático-gravimétrico de Prosky et al. (1984). Este procedimiento se llevó a cabo por medio del kit comercial de FDT (MEGAZYME, K-TDFR-200 A, Irlanda) y se basó en 3 fases: digestión enzimática (elimina componentes digeribles como proteína y almidón), filtración (separación de compuestos digeribles de los no

digeribles) y corrección del valor de FDT mediante la determinación de cenizas y proteínas.

En la primera fase, se pesaron 500 mg de muestra en cuatro matraces Erlenmeyer de 250 mL por muestra. A cada matraz se le añadieron 25 mL de buffer de fosfatos 0.08 M pH 6 y 25 µL de α-amilasa para gelatinizar las muestras. Los matraces se cubrieron con papel aluminio y se colocaron en un baño de agua (LabTech, LSB-015S, Korea) a 85°C durante 15 min, agitando cada 5 min, luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente por 15 min. Posteriormente, se ajustó el pH a 7.5 con NaOH 0.275 N y se agregó 50 µL de proteasa para la degradación de proteínas. Nuevamente se taparon los matraces con papel aluminio y se colocaron en el baño de agua con agitación continua a 60 rpm (LabTech, LSB-015S, Korea) durante 30 min a 60°C y se enfriaron a temperatura ambiente durante 15 min. Luego, con HCl 0.325 M se ajustó el pH entre 4 y 4.6, se añadió 100 µL de amiloglucosidasa para la hidrólisis del almidón, se cubrieron con papel aluminio y se colocaron en el baño de agua (LabTech, LSB-015S, Korea) con agitación constante por 30 min a 60°C. Se dejaron enfriar durante 15 min a temperatura ambiente. Para determinar la fracción soluble e insoluble, las muestras digeridas se centrifugaron (Beckman Coulter, Allegra 25R, EUA) a 10 000 rpm por 10 min, separando el sobrenadante (fibra soluble) del sedimento (fibra insoluble), se colocaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL y se les añadió 4 volúmenes de etanol al 95%. Se dejó en reposó a temperatura ambiente durante toda la noche para precipitar la FDT.

En la segunda fase, las muestras se filtraron utilizando crisoles tipo gooch #2, con una porosidad de 60 µm y una capacidad de 30 mL, los cuales previamente se llevaron a peso constante en un horno (Scorpion Scientific, A52035, EUA) a 105°C por 1 h. Luego, se les añadió 250 mg de celita, se llevaron nuevamente a peso constante y se distribuyó la celita en el crisol. Posteriormente, cada precipitado resultante de la primera fase se filtró. Se realizaron lavados con 10 mL de etanol al 78% (3 veces), 5 mL de etanol al 95% (2 veces) y 5 mL de acetona (2 veces). El residuo en los crisoles se secó en un horno (Scorpion Scientific, A52035, EUA) a 105°C por 8 h.

En la tercera fase, a partir del residuo seco obtenido, dos muestras se destinaron para cenizas y dos para proteínas (equipo de proteínas), con el fin de corregir el valor de FDT, utilizando la siguiente ecuación:

$$\%\, FDT = \left[\left((R\ residuo\ -\ P\ residuo\ -\ A\ residuo) - B\right)/M\right] * 100$$

Donde:

R residuo: peso del residuo (mg)

P residuo: peso de proteínas (mg)

A residuo: peso de cenizas (mg)

B: R blanco - P blanco - A blanco (mg)

M: peso de la muestra (mg)

Para cenizas, las muestras destinadas, se colocaron en un crisol de porcelana. Se sometieron a un proceso de carbonización para eliminar la materia orgánica presente. Posteriormente, los crisoles con las muestras carbonizadas se transfirieron a la mufla (Thermo Scientific, FD1535M, EUA) a 525°C durante 3 h. Se dejaron enfriar y se pesaron.

7.5.1 Propiedades funcionales de la cáscara de guanábana

7.5.1.1 Capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención de agua es la cantidad de agua que se mantiene unida a la fibra hidratada luego de la aplicación de una fuerza externa, como la presión o la centrifugación (Raghavendra et al., 2005). Se utilizó 500 mg de muestra (P0) y se adicionaron 10 mL de agua destilada, se agitó manualmente con una espátula durante 10 min para luego dejar en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugaron a 3000 rpm por 20 minutos (Hamilton Bell, VanGuard V6500, EUA). Se retiró el sedimento y se pesó (P1). Los resultados se expresaron como gramos de agua retenidos por gramo de peso seco de la muestra (g/g bs). La CRA se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$CRA\ \left(\frac{g}{g}\right) = \frac{P1\ -\ P0}{P0}$$

Donde:

P0: peso de la muestra

P1: peso del sedimento

7.5.1.2 Capacidad de hinchamiento (CH)

La propiedad de hinchamiento es una medida de la relación entre el volumen ocupado por la muestra después de sumergirse en un exceso de agua y su peso real después de alcanzar el equilibrio (Raghavendra et al., 2005). Se usó 200 mg de muestra en probeta graduada de 10 mL (V0), se adicionaron 10 mL de agua destilada y se mezcló manualmente con una espátula por 5 minutos. Se dejó en reposo temperatura ambiente por 24 horas para medir el volumen final de la muestra (V1). Los resultados se expresaron como mililitros de agua por gramo de muestra (mL/g). La capacidad de hinchamiento se midió mediante la ecuación:

$$CH\ \left(\frac{mL}{g}\right) = \frac{V1\ -\ V0}{Peso\ de\ la\ muestra}$$

Donde:

V0: volumen inicial de la muestra

V1: volumen final de la muestra

7.5.1.3. Capacidad de retención de lípidos (CRL)

Para la CRL se utilizó el mismo procedimiento previamente descrito para CRA, con la modificación de que el agua destilada fue sustituida por aceite de girasol (Femenia et al., 1997). Los resultados se expresaron como gramos de lípidos retenidos por gramo de peso seco de la muestra (g/g bs). Se calculó la capacidad de retención de lípidos mediante la siguiente ecuación:

$$CRL\ \left(\frac{g}{g}\right) = \frac{P1\ -\ P0}{P0}$$

Donde:

P0: peso de la muestra

P1: peso del sedimento

7.5.1.4. Capacidad de retención de glucosa (CRG)

Este método se encarga de medir la cantidad de glucosa que se retiene por gramo de fibra dietética en una muestra (Ma y Mu, 2015). Para su determinación se llevó a cabo la metodología descrita por Ou et al., (2001). Se preparó una solución de DNS (ácido 3,5 dinitrosalicílico), y para ello se calentó 80 mL de agua a 35°C en un matraz aforado de 100 mL. Se añadió un 1 g de DNS, 1 g de NaOH, 20 g de tartrato de sodio y 0.05 g de metabisulfito de sodio, cada reactivo se añadió por separado hasta su disolución. Cuando la mezcla alcanzó la temperatura de 50°C se agregó 0.2 g de fenol, se aforó y se dejó en ebullición por 1 min. Posteriormente, se enfrió a temperatura ambiente para su almacenamiento por 16 h a 4°C hasta su uso.

Para la curva estándar (Anexo 1) se realizó una solución de glucosa (concentración 10 g/L), se pesó 0.25 g de glucosa en 25 mL de agua destilada, posteriormente se hicieron concentraciones 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 mg/mL (glucosa/agua destilada), a las cuales se les aplicó la técnica de azúcares reductores acorde con lo descrito por Miller (1981). La cuál consistió en tomar 30 µL de cada concentración, adicionar 180 µL de DNS, mezclar con un vórtex y mantener en ebullición por 15 min, enfriar y añadir 1230 µL de agua destilada. Se midió la absorbancia a 540 nm en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software Gen5 v. 2.09, EUA) y se usó agua destilada como blanco (para azúcares reductores).

En tubos de centrífuga de 15 mL, se mezclaron 250 mg de muestra y 10 mL de solución glucosada (concentrada a 0.5 g de glucosa en 100 mL de agua destilada) y un blanco (250 mg de muestra con 10 mL de agua destilada), se homogeneizaron en un vórtex. La mezcla se mantuvo en una incubadora (Labtech, LSI-3016A, Korea) con agitación constante a 100 rpm por 6 h a 37°C y se centrifugó (Hamilton Bell, Vanguard V6500, EUA) a 3500 rpm durante 15 min. Se utilizó el sobrenadante para realizar la técnica de azúcares reductores. Los resultados se expresaron como miligramos de glucosa retenida por gramo (mg/g) de peso seco de la muestra.

7.6. Extracción de antioxidantes con solventes orgánicos

Se realizó una extracción acuosa-orgánica (Saura-Calixto et al., 2010), se pesó 250 mg de muestra, se añadió 10 mL de metanol/agua (v/v), se agitó a 300 rpm durante 30 min y se centrifugó (Hamilton Bell, VanGuard V6500, EUA) a 3400 rpm por 20 min. Se reservó el sobrenadante, mientras que al precipitado se le agregó 10 mL de acetona/agua (70%), y se continuó con el mismo procedimiento antes descrito. Se mezclaron los sobrenadantes obtenidos y se aforaron a 25 mL con la mezcla de metanol/agua y acetona/agua (v/v). La extracción obtenida se utilizó para cuantificar compuestos fenólicos y medir su capacidad antioxidante.

7.7. Compuestos fenólicos totales (CFT)

Para determinar el contenido de fenoles totales se llevó a cabo el procedimiento de Folin-Ciocalteu (Stintzing et al., 2004). Se preparó una solución Folin-Ciocalteu (0.2 N) a una proporción de 1:10, una solución de carbonato de sodio (7.5 mg en 100 mL de agua destilada) y la solución de ácido gálico (AG) (7.5 mg en 25 mL de agua destilada). Se elaboró una curva estándar (Anexo 2) a las siguientes concentraciones 0, 100, 200 y 300 mg/L (AG/agua destilada). Luego, se aplicó la técnica tomando 100 µL de cada concentración, se agregaron 500 µL de solución Folin y 400 µL de solución de carbonato de sodio, la mezcla se agitó en un vórtex y se dejó reposar por 30 min. Se midió la absorbancia a 765 nm en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software Gen5 v. 2.09, EUA), el blanco fue agua destilada. A las muestras se les aplicó la misma técnica. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 g de base seca (mg EAG/100 g bs).

7.8. Capacidad antioxidante

7.8.1. Método ABTS

La actividad de eliminación de radicales libres ABTS se determinó de acuerdo a los métodos descritos por Kuskoski et al., (2005). La solución de ABTS 7 mM (76.8 mg en 20 mL de agua destilada) y el persulfato de potasio 2.45mM (6.6 mg en 10 mL de agua destilada) se mezclaron para generar radicales libres de ABTS. Después se dejaron

en incubación por 16 horas en la oscuridad a temperatura ambiente. Mediante la dilución de la solución de ABTS con agua destilada se obtuvo una lectura de absorbancia de 0.7 ± 0.1 a 754 nm. Se realizó una curva estándar (Anexo 3) en concentraciones 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 µmol/L con una solución de Trolox (3.75 mg en 50 mL de etanol). Para la técnica, se utilizaron 100 µL de muestra y 900 µL de ABTS y se dejaron reposar por 7 min. La absorbancia se leyó a 754 nm en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software Gen5 v. 2.09, EUA), el blanco fue agua destilada. A las muestras se les aplicó la técnica previamente descrita. Se tomó como estándar de referencia al Trolox y los resultados se expresaron como micromoles equivalentes de Trolox por 100 g de base seca (µmol ET/100 g bs).

7.8.2. Método DPPH

Este método se basa en que el radical posee un electrón desapareado, es de color azul-violeta, el cual reacciona ante la presencia de una sustancia oxidante decolorandose a un amarillo pálido (Luo, 2023). El ensayo de actividad de eliminación de radicales libres DPPH, se realizó de acuerdo al método descrito por Morales y Jiménez-Pérez (2001). Se elaboró una solución de DPPH (7.4 mg/100 mL de etanol). Posteriormente se realizó una curva estándar (Anexo 4) con Trolox (3.75 mg/50 mL de etanol) en concentraciones de 0, 50, 100, 200 y 300 µmol ET/L. Después, se aplicó la técnica, tomando 100 µL de muestra y se adicionaron 500 µL de solución DPPH, se dejó reposar por 1 hora a temperatura ambiente y se leyó a 520 nm en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software Gen5 v. 2.09, EUA), el blanco fue etanol. Se aplicó la misma técnica para las muestras y los resultados se expresaron como micromol equivalente de Trolox por 100 g en base seca (µmol ET/100 g bs).

7.8.3. Método FRAP

El análisis de potencial antioxidante de reducción férrica (FRAP) se basa en la reducción del complejo férrico incoloro (Fe^{3+} tripiridil triazina) a un complejo ferroso de color azul (Fe^{2+} tripiridiltriazina) por la acción de antioxidantes donadores de electrones a pH bajo (Benzie y Strain, 1996). El reactivo FRAP (10:1:1) se preparó mezclando un tampón de acetato (acetato de sodio anhídrido 0.3 M, pH 3.6 se ajustó con ácido

acético glacial), TPTZ 10 mM (2,4,6-tri(2-piridil)-s-triazina), cloruro férrico 20 mM y HCl 40 mM y sulfato ferroso 5 mM. Para la curva estándar (Anexo 5) de sulfato ferroso (diluido en HCl 40 mM), se llevaron a cabo las siguientes concentraciones: 0, 20, 30, 40 y 50 µmol Fe (II)/L. Posteriormente, se empleó la técnica a las concentraciones, se tomaron 30 µL de cada una, se agregó 90 µL de agua destilada y 900 µL del reactivo de FRAP, se agitaron con un vórtex y se dejaron reposar en un baño de agua (Lumistell, IH-6L, EUA) a 37°C por 10 minutos, Se leyeron en un lector leídas en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software Gen5 v. 2.09, EUA) a 593 nm. Se usó agua destilada como blanco. Se aplicó la misma técnica a las muestras y los resultados se expresaron en micromol de Fe^{+2} por 100 gramos en base seca (µmol Fe (II)/100 g bs).

7.9. Bioaccesibilidad intestinal *in vitro* de antioxidantes

Los modelos de digestión *in vitro* son una simulación de los procesos de digestión gastrointestinales, que representa simplificadamente las condiciones *in vivo* (Cabezas-Terán et al., 2022). Se utilizó el modelo de digestión *in vitro* seguido de diálisis (Trinidad et al., 1996), con algunas modificaciones (Ramírez-Moreno et al., 2017). Se pesó 1 g de muestra liofilizada en tubos de centrífuga de 50 mL, se homogeneizaron en 20 mL de agua y se ajustó el pH a 2.0 con HCl 6 M. Luego, se les agregó 240 µL de solución de pepsina (40 mg de pepsina por mL de HCl 0.1 mol/L), se agitó en un vórtex y se colocaron en una incubadora (Labtech, LSI-3016A, Korea) durante 2 h a 37°C en agitación constante (60 rpm). Después se agregaron 3 mL de solución de bilis-pancreatina (5 mg de pancreatina más 12.5 mg de colato de sodio y 12.5 mg de desoxicolato de sodio por 1 mL de $NaHCO_3$) y agitó en un vórtex. Los productos obtenidos de la digestión se colocaron en membranas de diálisis con un tamaño de corte 12 kDa (previamente sumergidas en agua destilada a ebullición por 5 min) y se dializaron en 250 mL de solución de bicarbonato de sodio 0.025 M a pH 7.5, seguido se dejaron en incubación (Labtech, LSI-3016A, Korea) con agitación a 60 rpm por 16 h a 37°C. Por último, se almacenó la fracción bioaccesible (aquella que atravesó la membrana de diálisis) para determinar el contenido de fenoles totales y su capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP), de acuerdo a las metodologías descritas en los

apartados 6.6.1 y 6.6.2 respectivamente. La fracción no bioaccesible se almacenó en tubos de centrífuga de 50 mL a -32°C y fueron liofilizados a 0.045 mBar a 52°C (LABCONCO, FreeZone^{6}, EUA). El indicador de bioaccesibilidad en el intestino delgado es la diferencia de los parámetros de la concentración de fenoles en la fracción dializada sobre la muestra antes (muestra original) y después del proceso de digestión *in vitro*.

7.10. Fermentación colónica *in vitro*

La fracción de la muestra que no atravesó la membrana se denominó fracción no bioaccesible. Este fue utilizado como sustrato en el modelo de fermentación colónica *in vitro*. Se llevó a cabo en estrictas condiciones anaeróbicas (Saura-Calixto et al., 2006) utilizando sobres generadores de gas. El método de fermentación colónica *in vitro* fue de acuerdo a Barry et al. (1995) y estandarizado por Goñi y Martin-Carrón (1998), con modificaciones. Se preparó el medio anaerobio (adaptado por Goering, 1970) con pequeñas modificaciones, la preparación de las soluciones del medio anaerobio se encuentra en el Anexo 6. En un matraz aforado de 500 mL, se agregó 1.25 g de tripticaseína, 62.5 µL de solución micromineral, 125 mL de solución macromineral y 125 mL de solución buffer y se aforó. El medio anaerobio y la solución reductora se esterilizaron (Wacs-1080, Wise clave, EUA) por separado. Posteriormente, al medio anaerobio se le agregó 16.75 mL de la solución reductora, se agitó y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Luego, en tubos de ensaye con fondo plano de 50 mL se colocaron 100 mg de muestra previamente liofilizada (fracción no bioaccesible) y se utilizó como blanco aquel que no contenía sustrato (blanco negativo, (B-)) y otro que contenía lactulosa (blanco positivo (B+) (sustrato completamente fermentable). Se agregaron 16 mL de medio anaerobio, se colocaron tapones de aluminio y se mantuvieron a 4°C por 16 h, con el objetivo de hidratar la muestra. Después, se preparó una solución de inóculo al 10% (p/v, material fecal y medio anaerobio). Para ello, se recolectó 10 g de materia fecal en fresco en un vaso estéril de 120 mL, disuelto en 90 mL de la solución anaerobia estéril. Se mezcló, se filtró con gasas estériles para eliminar las partículas grandes y se mantuvo a una temperatura de 37°C hasta su uso.

Pasado el tiempo de hidratación de la muestra, se adicionaron a cada tubo de ensaye 4 mL del inóculo (preparado anteriormente) y se mezcló manualmente con una espátula de vidrio (hora 0), seguido se les colocó una pequeña tira de indicador anaeróbico que contiene resazurina (SIGMA-ALDRICH, BR0055B, UK) y se taparon nuevamente. Luego, los tubos de ensaye se colocaron 1 en 1 en un contenedor hermético y un sobre generador de gas (GASPAK EZ CAMPY, BD-2660680, UK) y se cerró inmediatamente para generar las condiciones anaerobias (Figura 3).

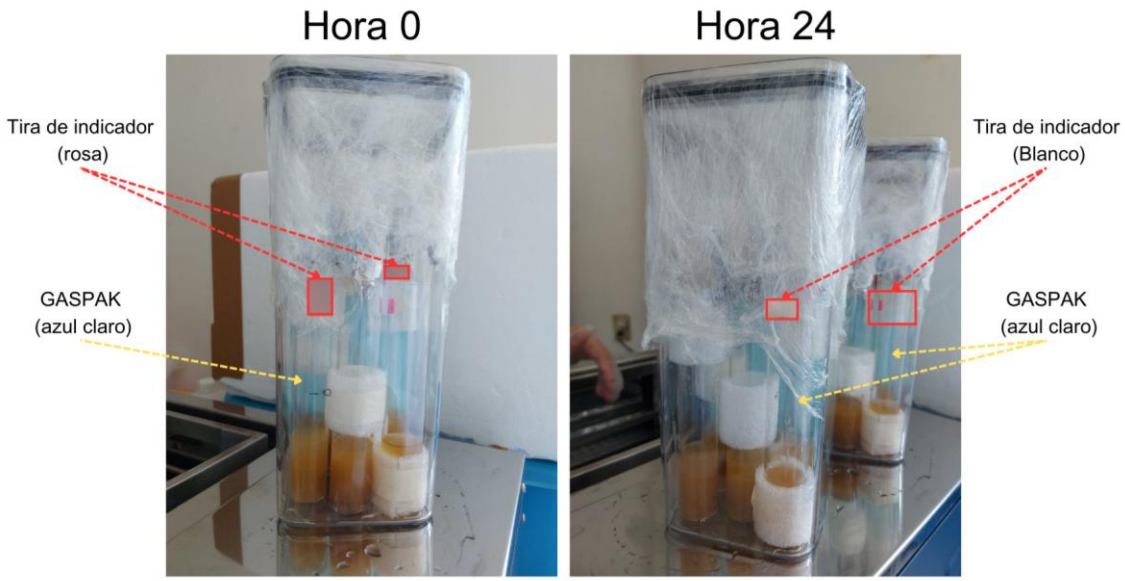


Figura 3. Modelo de fermentación colónica *in vitro*

Los contenedores se colocaron en un baño de agua con agitación (LabTech, LSB-015S, Korea) a 20 rpm durante 24 h a 37°C. Para detener la fermentación (después de las 24 h), se añadió 2 mL de hidróxido de sodio 1 M. Previamente se tomaron alícuotas al inicio (0 h) y fin (24 h) del estudio para la medición de pH (210, Hanna Instruments, EUA) y conteo de bacterias ácido lácticas (Anexo 7). Las muestras se centrifugaron (Beckman Coulter, Allegra 25R, EUA) a 10,000 rpm por 10 min, el sobrenadante se almacenó a -30°C para el análisis de antioxidantes (compuestos fenólicos totales, ABTS, DPPH y FRAP).

Para la preparación del inóculo se utilizó la mezcla de materia fecal proveniente de 4 sujetos (2 mujeres y 2 hombres) sanos, con edad entre 21 y 30 años, sin consumo de antibióticos en los últimos 3 meses y con una alimentación balanceada de acuerdo a lo que menciona Zhang et al. (2019) y Klostermann et al. (2023). Previamente, los donadores firmaron un consentimiento informado (Anexo 8), el cuál fue aceptado en la evaluación del protocolo de investigación por parte del Comité de Ética e Investigación del Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Dicha solicitud fue aprobada en enero de 2024 (Anexo 9).

7.10.1. Conteo de bacterias ácido lácticas (BAL)

El recuento de bacterias ácido lácticas (BAL), se realizó al tiempo 0 y 24 horas de la fermentación colónica *in vitro*. Se prepararon diluciones de la muestra, se tomaron 100 µL diluidos en 900 µL de caldo peptonado (DIBICO, México) previamente esterilizado (Wacs-1080, Wise clave, EUA). Se realizó la siembra por extensión en placa y se tomaron 20 µL de cada dilución. Se usó agar Man, Rogosa y Sharpe (MRS) (DIFCO, México). Las cajas petri se colocaron en un contenedor de cierre hermético para mantenerlas en anaerobiosis usando 2 sobres generadores de gas (GASPAK EZ CAMPY, BD-2660680, UK) y una tira de indicador anaeróbico (resazurina) (SIGMA-ALDRICH, BR0055B, UK) y se incubó a 37°C durante 48 horas (IDF, 1997). Se realizó el conteo de bacterias ácido lácticas y los resultados se expresaron como unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/mL) de muestra.

7.11. Análisis estadístico

Todos los experimentos se hicieron por triplicado, los resultados se expresaron como la media ± desviación estándar (DE) y fueron analizados a través del modelo unidireccional de varianza (ANOVA). Las diferencias entre las medias fueron comparadas con una prueba Tukey, con un valor de significancia de $p<0.05$.

Para pH y bacterias ácido lácticas después de fermentación colónica *in vitro*, se utilizó una prueba t de Student con un nivel de significancia de $p<0.05$. Asimismo, se llevaron

a cabo las demás pruebas previamente descritas. Se usó el paquete estadístico SPSS versión 25.0 para Windows.

8. Resultados y discusión

8.1 Propiedades fisicoquímicas

8.1.1. pH

Los valores de pH obtenidos de la cáscara de guanábana se aprecian en la Figura 4. La muestra control (>850 µm) alcanzó un pH de 4.58 ± 0.02, siendo significativamente mayor (*p<0.05*) en comparación con las demás muestras.

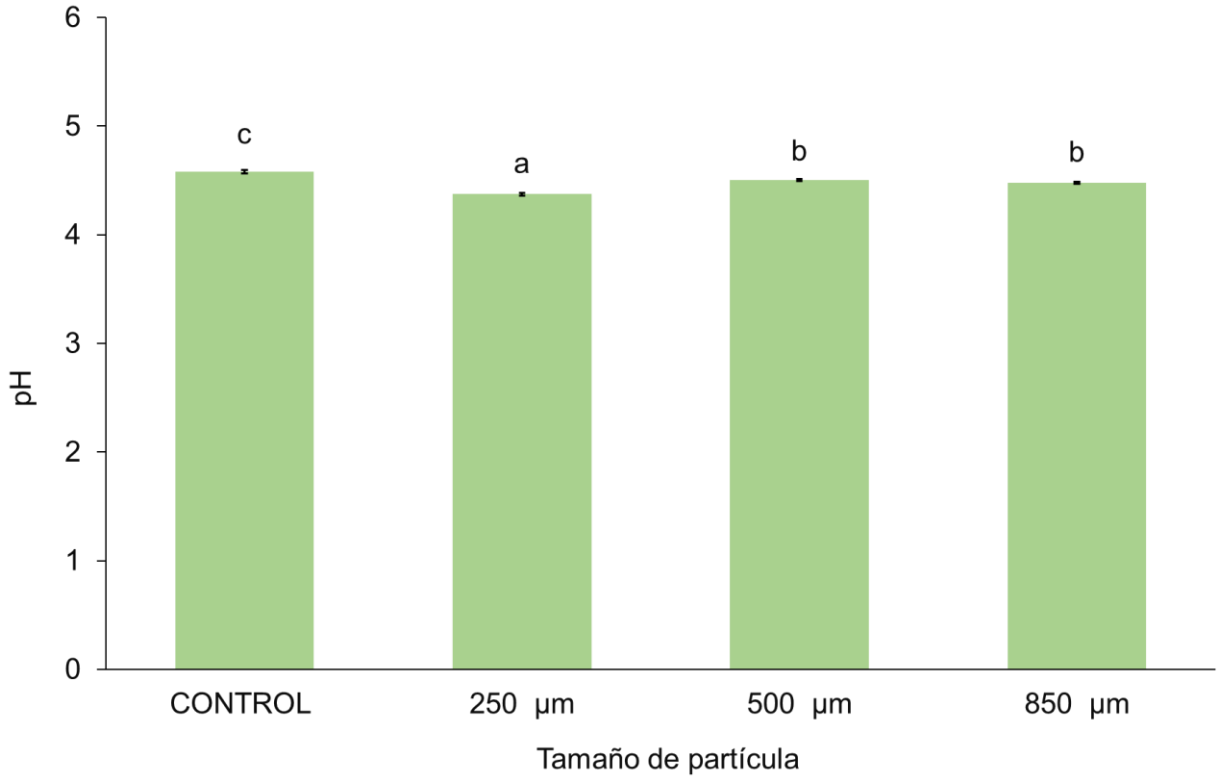


Figura 4. Valores de pH en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-c] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

En contraste con otras matrices alimentarias, Sogi et al. (2013) reportaron que la cáscara de mango liofilizado y tamizado a 500 µm, obtuvo un pH de 4.29 ± 0.12.

Mientras que en una cáscara de granada con un tamaño de partícula de 297 µm, se alcanzó pH de 3.24 ± 0.08 (Sarkar et al., 2024). Esto puede ocurrir porque, al reducir el tamaño de partícula, los ácidos orgánicos se separan de los componentes a los que están ligados, lo que provoca una disminución del pH (Corona et al., 2019).

8.1.2. Sólidos solubles totales (SST)

En la Figura 5 se pueden observar los valores de SST de la cáscara de guanábana. La muestra tamizada a 250 µm presentó la cifra más alta con 4.13 ± 0.06 °Brix, a diferencia de la partícula de 850 µm y el control, que alcanzaron cifras más bajas con 1.20 ± 0.00 y 1.03 ± 0.06°Brix, respectivamente.

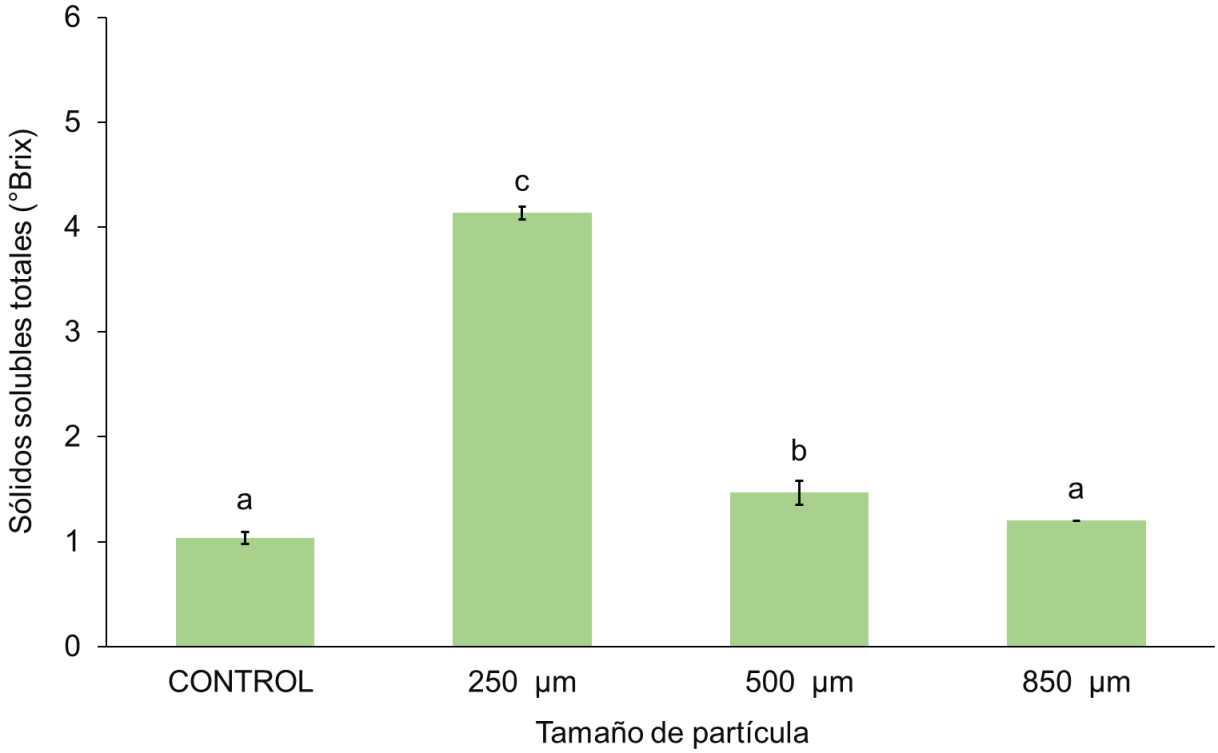


Figura 5. Valores de sólidos solubles totales (°Brix) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-c] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

En un estudio con cáscara de jaboticaba liofilizada (tamaño de partícula de 149 µm), obtuvieron 6.6 ± 0.3 °Brix (Gurak et al., 2014). Por otro lado, en cáscara de granada a 297 µm se alcanzaron valores de 6.24 ± 0.20 °Brix (Sarkar et al., 2024). De acuerdo a

Shojaeiarani et al. (2020), una reducción en el tamaño de partícula podría incrementar la liberación de los SST, debido a la ruptura de la estructura de la fibra, lo que expondría la superficie interna de la cáscara a los disolventes, como el agua.

8.1.3. Color

Los parámetros de color en la cáscara de guanábana se aprecian en la Tabla 1. En el parámetro *L** (luminosidad) se registraron cifras entre 49.39 y 68.53, para la coordenada *a** entre -2.79 y 0.03, y la coordenada *b** entre 22.36 y 30.65.

Tabla 1. Parámetros de color en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula

		Tamaño de partícula		
Coordenadas	CONTROL	250 µm	500 µm	850 µm
*L**	49.39 ± 0.32 [a]	68.53 ± 0.28 [c]	65.16 ± 0.04 [b]	64.67 ± 0.11 [b]
*a**	-2.79 ± 0.03 [a]	-0.85 ± 0.05 [c]	-1.73 ± 0.03 [b]	0.03 ± 0.01 [d]
*b**	22.36 ± 0.11 [a]	26.28 ± 0.09 [b]	28.79 ± 0.08 [c]	30.65 ± 0.14 [d]
h°	96.22 ± 0.36 [d]	91.58 ± 0.04 [b]	92.68 ± 0.12 [c]	90.00 ± 0.09 [a]
*C**	22.45 ± 0.17 [a]	26.29 ± 0.09 [b]	28.83 ± 0.07 [c]	30.65 ± 0.14 [d]
ΔE	–	19.63 ± 0.21 [b]	17.06 ± 0.28 [a]	17.61 ± 0.17 [a]

[a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

En la luminosidad (*L**) se observó un aumentó al disminuir el tamaño de partícula, la cáscara de 250 µm presentó la cifra más alta con 68.53 ± 0.28 (*p<0.05*). En la coordenada a*, la cáscara de 850 µm alcanzó el parámetro más alto con 0.03 ± 0.01 (*p<0.05*) por sobre las demás muestras, los cuales fueron negativos, indicando una tendencia hacia el color verde. Del mismo modo para la coordenada *b**, la cáscara de 850 µm alcanzó un valor superior a las demás muestras (*p<0.05*) con 30.65 ± 0.14, asimismo todas las muestras dieron valores positivos, por lo cual denotan una inclinación al color amarillo (Tabla 1). Estos resultados fueron en contraste con una cáscara de sandía liofilizada (149 µm) que obtuvo datos de 53.72 (*L**), -0.67 (*a**) y

21.04 (*b**) (Sangwan et al., 2024), menores a los reportados en este estudio a un tamaño de partícula de 250 µm.

Para la tonalidad (*h*°), la cáscara de guanábana a diversos tamaños de partícula, mostraron un rango entre 90.00 y 96.22, ubicándose entre el ángulo 90 y 180°, lo cual indica tonalidades amarillas-verdes, siendo la cáscara control la que obtuvo el dato más elevado (96.22 ± 0.36). En cáscara de manzana verde liofilizada (Granny Smith) sin tamizar se reportó 95.7 (Henríquez et al., 2012), similar al encontrado en la muestra control. En cambio, Leão et al. (2017) en un subproducto (epicarpio y mesocarpio) de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) secado al horno y con un tamaño de partícula de 425 µm, alcanzó un valor de 70.2, este resultado fue menor al presentado en este estudio a un tamaño de partícula de 500 µm. Por otra parte, la pureza o croma (*C**), obtuvo cifras entre 22.45 y 30.65, siendo la cáscara tamizada a 850 µm mayor significativamente *(p<0.05)* (Tabla 1). Los valores de *C** fueron similares a una cáscara de granada a 297 µm (26.78) (Sarkar et al., 2024).

Respecto a la diferencia de color (*ΔE*), la muestra control se consideró como referencia. El rango obtenido fue de 17.06 a 19.63, donde a menor tamaño de partícula hubo una diferencia evidente (Tabla 1). Según Mokrzycki y Tatol (2011) una diferencia con valor <2 puede ser detectada por una persona con experiencia y cuando es ≥ 5 cualquier persona puede distinguir la diferencia de color. La disminución del tamaño de partícula posiblemente incrementa las interacciones entre los enlaces moleculares y disminuye el volumen libre en la matriz alimentaria (Karakuş et al., 2023). Lo anterior resulta en una superficie más uniforme y homogénea, que podría reflejar la luz y generar una superficie con mayor absorción y dispersión de la luz (Yuan et al., 2023). Mientras que, al incrementar el tamaño de partícula, la superficie se vuelve más heterogénea, por lo tanto, aumenta la longitud de la luz, eleva la absorbancia y reduce la reflectancia, ocasionando diferencias en *a**, *b** y *C** (Hidalgo et al., 2014)

Por otro lado, en la Figura 6 se muestra el color de las cáscaras desde 2 ángulos. El primero fue usando los valores obtenidos en las coordenadas *L**, *a** y *b**, los cuales se

introdujeron en el calculador de color EasyRGB, con el propósito de mostrar objetivamente el color de cada muestra (Figura 6A-D). En segundo lugar, se presenta el color de la cáscara como el individuo la visualiza (Figura 6a-d) y éste fue obtenido a través de una cámara digital. Por lo tanto, es factible detectar una diferencia entre los colores captados por la cámara digital (Figura 6a-d) y los captados por el calculador de color (Figura 6A-D). Se observa que en la Figura 6B, la cáscara de 250 µm tuvo mayor luminosidad en contraste con las demás muestras. Esto se refleja en las imágenes obtenidas por los instrumentos utilizados y, a su vez coincide con el resultado de la coordenada *L** mostrado en la Tabla 1. Cabe mencionar que también se aprecia la diferencia de color (*ΔE*) en la Figura 6, distinguiéndose al menos 2 colores respecto a la muestra control. Por lo que es acorde con lo antes mencionado (valores >5 indican que cualquier sujeto es capaz de distinguir la diferencia de color).

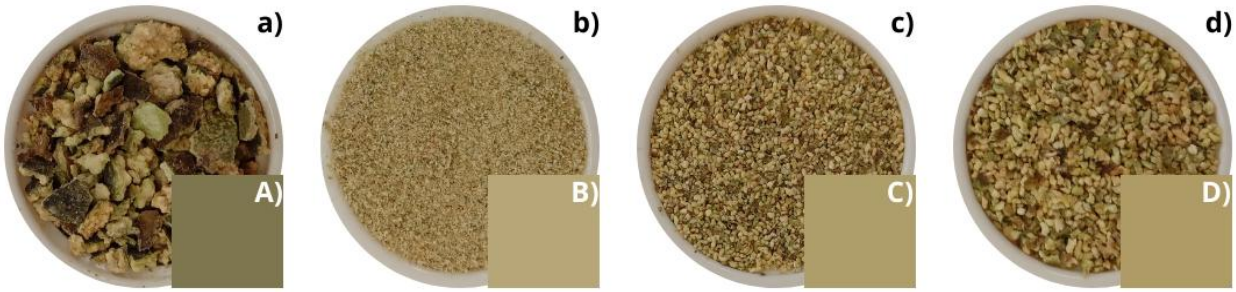


Figura 6. Color obtenido de la cáscara de guanábana. a) CONTROL: cáscara solo triturada (>850 µm), b) 250 µm, c) 500 µm y d) 850 µm.

8.2 Fibra dietética total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI)

En la Tabla 2 se observa el contenido de fibra dietética en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. Las cáscaras de todos los tamaños de partícula presentaron elevado porcentaje de fibra total, a excepción del tamaño de 250 µm. Se distinguió un mismo comportamiento en el contenido de FDI. Sin embargo, para la fracción soluble, la cáscara de menor tamaño (250 µm) registró el mayor porcentaje significativamente ($p<0.05$) con 6.11% en relación con las otras muestras.

Tabla 2. Contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula

Tamaño de partícula	Fibra dietética (%)		
	Total	Soluble	Insoluble
CONTROL	76.18 ± 2.40 [b]	3.39 ± 0.20 [a]	72.79 ± 2.27 [b]
250 µm	45.19 ± 2.48 [a]	6.11 ± 0.29 [c]	39.09 ± 2.52 [a]
500 µm	74.06 ± 2.09 [b]	4.45 ± 0.22 [b]	69.61 ± 2.16 [b]
850 µm	77.28 ± 2.43 [b]	4.35 ± 0.22 [b]	72.92 ± 2.41[b]

[a-c] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras de la misma columna. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

En base a una investigación realizada por Villacís-Chiriboga et al. (2023) sobre cáscara de guanábana liofilizado a un tamaño de partícula de 425 µm, el contenido de FDT, FDS y FDI fue de 44.46%, 4.05% y 40.42% respectivamente, estos datos fueron inferiores a los reportados en este trabajo. La diferencia entre la cáscara de guanábana analizada en este estudio y la de Villacís-Chiriboga et al. (2023) podría ser debido al grado de maduración, las condiciones climáticas y de almacenamiento, el tamaño de partícula al que fue expuesto el fruto, así como los procedimientos y métodos de extracción (De Morais et al., 2015; Arruda et al., 2023). Cabe destacar que el mayor contenido de FDS en la muestra de menor tamaño de partícula, podría deberse a la degradación de la fibra insoluble como la hemicelulosa, celulosa y lignina durante la molienda, ya que se rompe los enlaces de hidrógeno intramoleculares, ocasionando una redistribución de la fracción soluble (Liu et al., 2016; Zheng et al., 2023; Weng et al., 2022).

Por otro lado, la presencia de un alto contenido de FDI podría atribuirse a la característica propia de las cáscaras, ya que las células vegetales están rodeadas por una pared celular rígida compuesta por fibra insoluble (Ahmad y Khalid, 2018). En contraste con la FDS que se encuentra en menor cantidad en las cáscaras de frutas, debido a que forman estructuras más suaves como geles y mucílagos (Wang et al., 2022). Los resultados son relevantes, ya que, a nivel fisiológico, el FDS podría reducir el contenido de colesterol en la sangre, regular el equilibrio de la glucosa y prevenir el

cáncer colorrectal (Li et al., 2024). Mientras que el FDI podría contribuir a la reducción de la presión arterial mediante la absorción de colesterol y sales biliares. En el aspecto tecnológico, un alto contenido de FDT mejoraría la textura, reología, características sensoriales, nutricionales, estabilidad y vida útil de los alimentos, debido a sus propiedades funcionales (Fayaz et al., 2022).

8.3 Propiedades funcionales de la cáscara de guanábana

8.3.1 Capacidad de retención de agua (CRA)

Se evaluó la capacidad de retención de agua en las cáscaras de guanábana en distintos tamaños y los resultados se muestran en la Figura 7. La cáscara de menor tamaño (250 µm) tuvo significativamente la mayor CRA con 8.62 ± 0.18 g/g bs, en comparación con las demás muestras. Este valor fue mayor a un estudio en cáscaras de mango a 250 µm y 180 µm (7.79 y 8.18 g/g bs) (Serna-Cock et al., 2015). Una reducción en el tamaño de las partículas provoca cambios en la estructura interna de las fibras, aumentando su porosidad y área superficial (Jiang et al., 2022). En particular, la fibra soluble tiene una mayor probabilidad de exponer más grupos hidroxilo, los cuales pueden formar enlaces de hidrógeno con el agua, lo anterior incrementa su capacidad para retener más moléculas de agua (Luo et al., 2018; Huang et al., 2020). La capacidad que tiene la cáscara de guanábana para retener agua podría impactar a nivel fisiológico, ya que incrementa el bolo fecal, disminuyendo la absorción de glucosa, grasa y colesterol en sangre (Dias et al., 2020). Mientras que, a nivel tecnológico, la fibra soluble propicia una viscosidad media y la formación de geles (Ozyurt & Ötles, 2016).

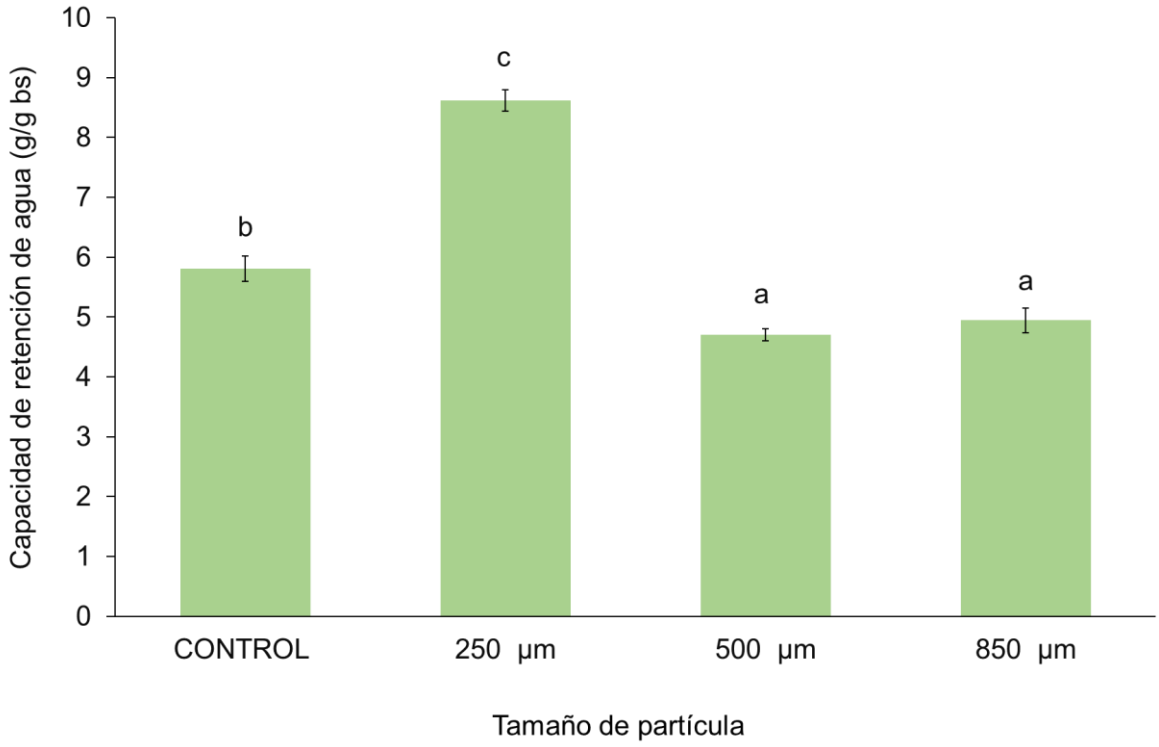


Figura 7. Capacidad de retención de agua (g/g bs) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-c] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

8.3.2 Capacidad de hinchamiento (CH)

Se midió la capacidad de hinchamiento de la cáscara de guanábana a diversos tamaños de partícula (Figura 8). Al igual que la CRA, la cáscara con tamaño de 250 µm, fue mayor significativamente (9.99 ± 0.01 mL/g bs) (*p<0.05)* respecto a las demás muestras. Esta cifra fue más alta respecto a una cáscara de granada (4.28 ± 0.29 mL/g bs) a 294 µm (Sarkar et al., 2024).

El resultado se podría atribuir a cambios en la superficie de la fibra soluble inducidos por la reducción del tamaño de partícula, esto expone más grupos hidrófilos y formas dipolares en la superficie de la fibra, facilitando la interacción con el agua y por lo tanto mejora la CH (Feng et al., 2022; Jiang et al., 2022).

Fisiológicamente la CH, al expandir el volumen de los alimentos, reduce la ingesta de calorías y aumenta la sensación de saciedad (Lambert et al., 2016). Además, la CH promueve la salud intestinal, debido a que regula la microbiota, favorece la eliminación

de carcinógenos y disminuye el riesgo de enfermedades como el cáncer de colon (Morozov et al., 2018; He et al., 2021; Fu et al., 2022).

En el aspecto tecnológico, la CH (al igual que la CRA) incrementa la viscosidad de las mezclas alimentarias, proporciona estabilidad y espesor; también, ocasiona mayor volumen a los alimentos, útil para productos como panes, pasteles o salsas, ya que absorbe más agua, reduce la deshidratación de los alimentos (Villacís-Chiriboga et al., 2023; Zheng et al., 2023).

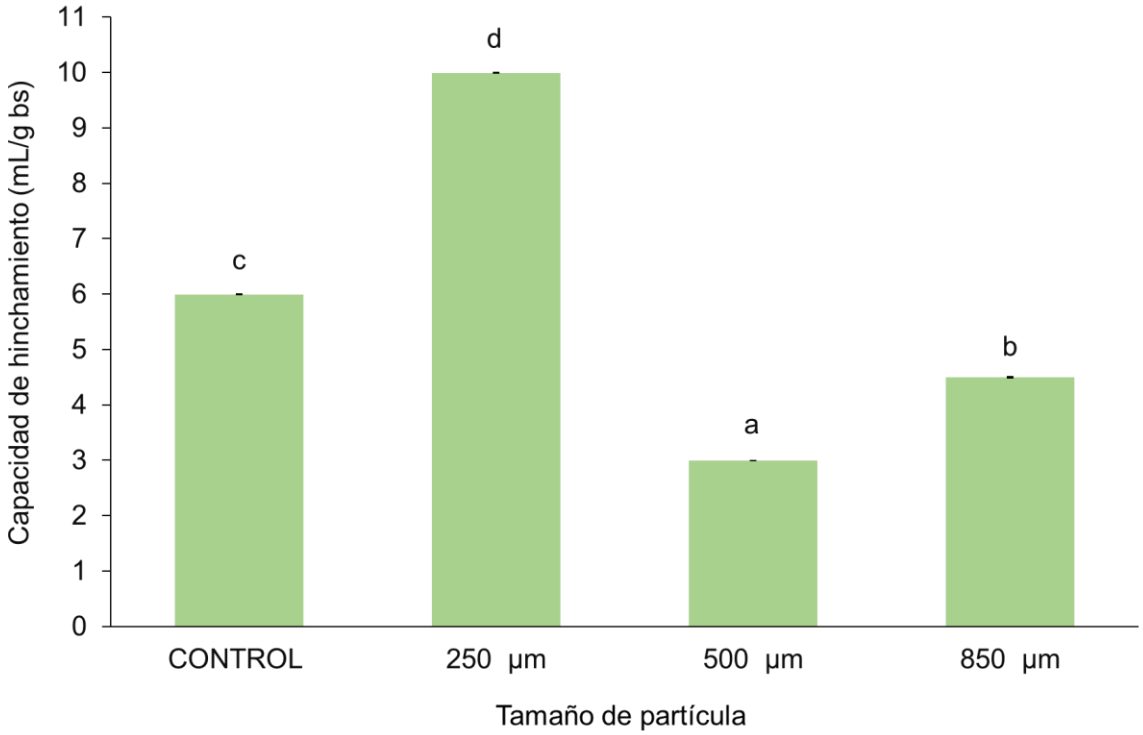


Figura 8. Capacidad de hinchamiento en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

8.3.3. Capacidad de retención de lípidos (CRL)

La Figura 9 muestra los valores obtenidos en la capacidad de retención de lípidos (CRL) en la cáscara de guanábana a 3 tamaños de partícula. Las muestras presentaron un rango de 2.92 y 3.42. La cáscara de 250 µm fue mayor ($p<0.05$) con 3.77 ± 0.10 g/g bs, respecto a las demás muestras. Los resultados de la partícula de

menor tamaño de este estudio fue similar a una cáscara de aguacate (300 µm) con 3.10 ± 0.16 g/g bs (Dias et al., 2020).

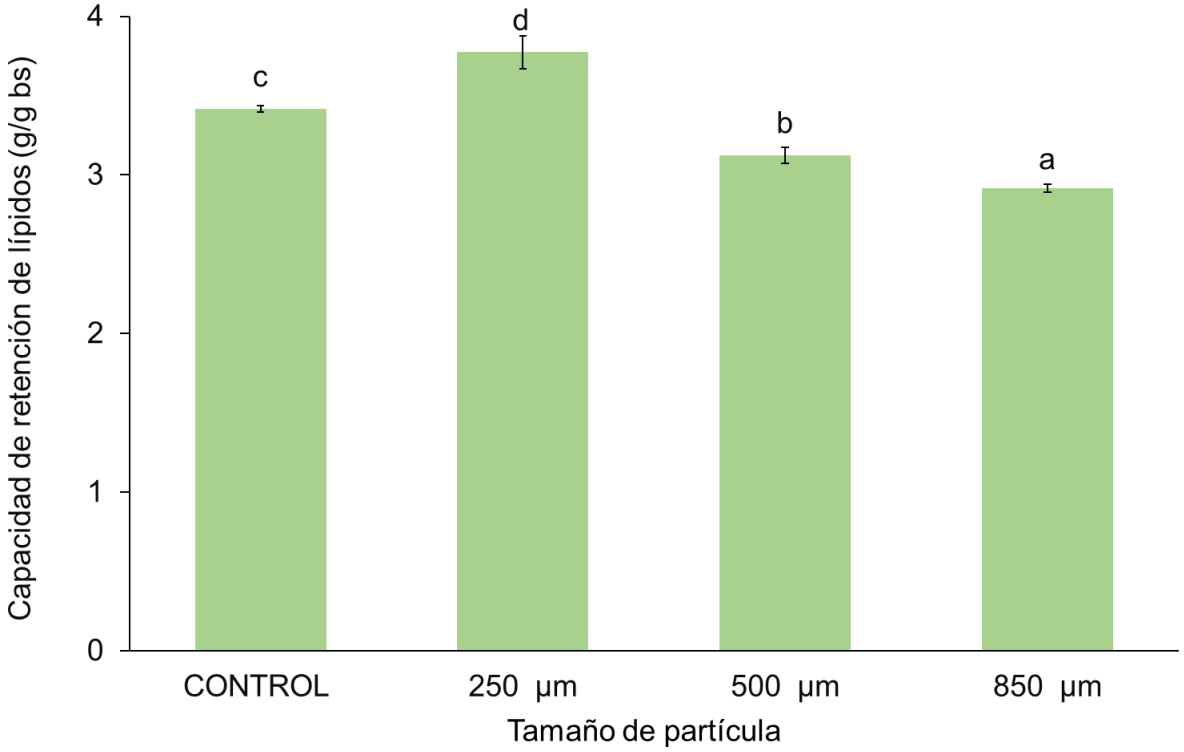


Figura 9. Capacidad de retención de lípidos en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

Esto sugiere que, al disminuir el tamaño de partícula, incrementa el área de superficie específica y la porosidad, características que facilitan la exposición de grupos no polares adicionales como hidrocarburos, ésteres, entre otros (Li et al, 2024). El aumento de grupos hidrofóbicos podría mejorar la interacción molecular y las fuerzas de Van der Waals de las partículas de aceite, además de mejorar su adhesión e inhibir su pérdida y así obtener una buena capacidad de retención de lípidos (Jia et al., 2019; He et al., 2023).

A nivel fisiológico, una alta CRL podría reducir el nivel de colesterol sérico al absorber grasa o aceite en el tracto gastrointestinal (Cui et al., 2019; Yang et al., 2024). Además de modular la oxidación y acumulación de grasa dentro del cuerpo, incrementar la

cantidad de grasa en las heces y posiblemente ayudar en el mantenimiento o la reducción de peso (Xie et al., 2017).

Respecto a su posible aplicación tecnológica, esta propiedad podría estabilizar emulsiones alimentarias, dar textura a productos alimenticios, mantener el sabor y mejorar las características sensoriales de los alimentos (Pathania y Kaur, 2021; Siddiqui et al., 2023, Pramana et al., 2024).

8.3.4. Capacidad de retención de glucosa (CRG)

Los resultados de la capacidad de retención de glucosa (CRG) se muestran en la figura 10. La muestra control obtuvo la cifra más alta significativamente ($p<0.05$) con 254.67 ± 6.32 mg/g bs, mientras que la cáscara de guanábana a un tamaño de 250 µm no se le detectó esta capacidad. En un estudio realizado en cáscara de aguacate con un tamaño de partícula >850 µm, se obtuvo una CRG de 87.68 ± 1.35 mg/g bs (Palma-González, 2023), valor que fue menor en comparación con la cáscara de guanábana al mismo tamaño de partícula. Por lo tanto, este resultado sugiere que, a un mayor tamaño de partícula existe un área de superficie más compleja, lo que facilita la formación de una red de fibras insoluble capaz de atrapar más moléculas de glucosa (Yan et al., 2024; Vathsala et al., 2024).

La capacidad de retención de glucosa está relacionada con el aspecto tecnológico de los alimentos, ya que es útil para mejorar su textura (Ma et al., 2023). Por otro lado, a nivel fisiológico, la CRG que presenta la cáscara de guanábana podría ralentizar la difusión de glucosa y así retrasar la absorción en el tracto gastrointestinal e inhibir el aumento de la glucosa en sangre postprandial (Zheng et al., 2016; Dong et al., 2019). A su vez, podría actuar como un hipoglucemiante en el tratamiento de la diabetes (He et al., 2021).

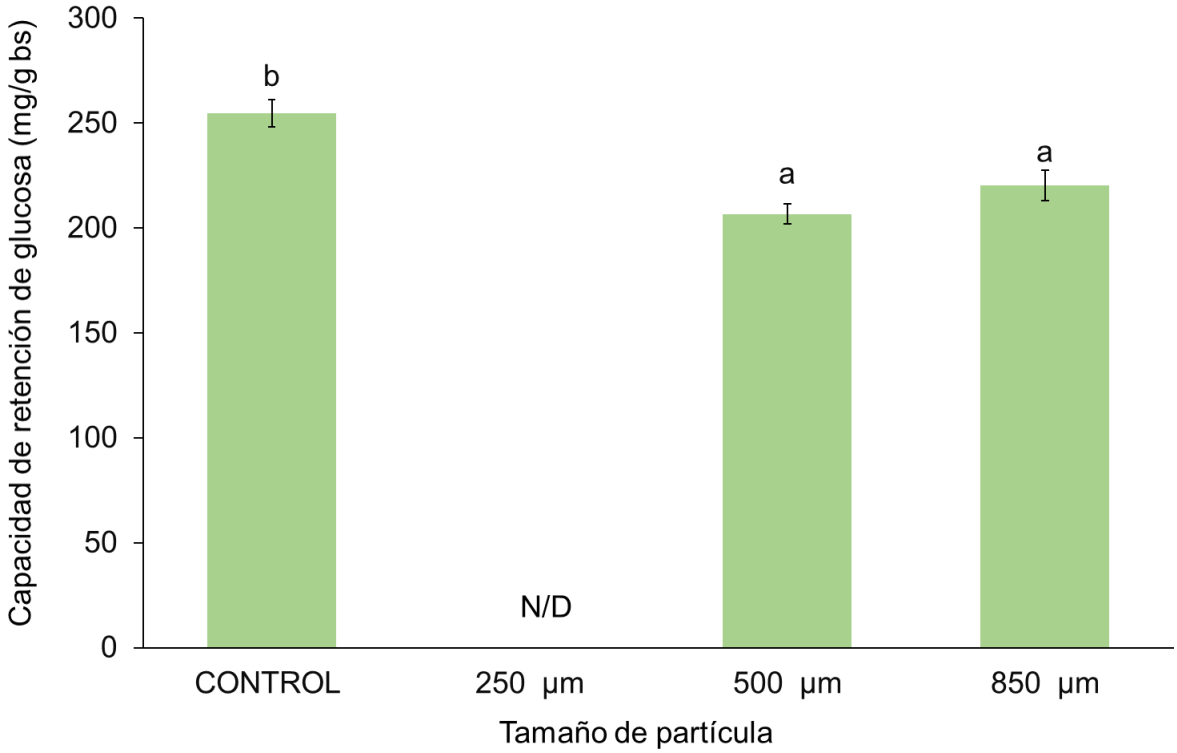


Figura 10. Capacidad de retención de glucosa en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula. [a-b] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm). N/D: No detectado.

8.4. Compuestos fenólicos totales

En la Tabla 3 se presenta el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en la cáscara de guanábana durante el proceso de digestión *in vitro,* mostrando resultados de la bioaccesibilidad *in vitro*, tanto en intestino delgado como grueso (muestra original, muestra bioaccesible y fermentable). En la muestra original (extracción orgánica-acuosa), se observa que la cáscara con tamaño de 250 µm obtuvo valores significativamente mayores (6390 ± 148.63 mg EAG/100 g bs), en comparación con las demás muestras. Mientras que la muestra de 850 µm registró el menor contenido fenólico (3340 ± 12.37 mg EAG/100 g bs). En un estudio realizado sobre la cáscara de mandarina tamizada a 149 µm, se evaluó el contenido de compuestos fenólicos totales, alcanzando 1547 ± 39 mg EAG/100 g bs (Wang et al., 2023), lo que fue inferior al presente estudio. Esto sugiere que las partículas más pequeñas, al tener una mayor área superficial, permiten mayor tasa de transferencia de masa, facilitando la liberación

de compuestos fenólicos incrustados en la matriz fibrosa (Ahmed et al., 2019). A nivel tecnológico, la cáscara de guanábana, debido a su alto contenido de CFT, podría ser utilizada como aditivo alimentario (conservador) para mejorar la calidad de los productos alimenticios (Skendi et al., 2022).

Tabla 3. Compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.

Tamaño de partícula	Muestra Original	Fracción Bioaccesible	Muestra Fermentable
CONTROL	4190.00 ± 167.36 [b]	461.44 ± 7.66 [b]	5667.20 ± 40.33 [c]
250 µm	6390.00 ± 148.63 [c]	566.10 ± 3.40 [c]	10718.40 ± 83.95 [d]
500 µm	4328.10 ± 121.71 [b]	314.87 ± 1.40 [a]	2411.20 ± 60.97 [b]
850 µm	3340.00 ± 12.37 [a]	299.67 ± 19.96 [a]	2129.60 ± 54.96 [a]

EAG/100 g: equivalentes de ácido gálico por 100 g de base seca. [a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras de la misma columna. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

Respecto a la muestra bioaccesible, también la cáscara de 250 µm mostró un contenido de compuestos fenólicos totales más alto (566.10 ± 3.40 mg EAG/100 g bs) en comparación con las demás muestras (Tabla 3). En una investigación sobre cáscara de mango tamizada a 250 µm, se encontró 1175 mg EAG/100 g bs (Zahid et al., 2022), superior al obtenido en el presente estudio. Como se mencionó anteriormente, la reducción del tamaño de partícula impacta positivamente en la liberación de compuestos, y por lo tanto, podría aumentar su bioaccesibilidad en comparación con partículas de mayor tamaño (Vasiluk et al., 2023). Sin embargo, la incompleta bioaccesibilidad de los compuestos fenólicos podría explicarse por la inestabilidad de éstos frente a las enzimas digestivas y los cambios de pH, lo que conduce a su degradación o biotransformación en metabolitos (Pinto et al., 2023a). Asimismo, los compuestos fenólicos no liberados permanecen unidos a proteínas, celulosa y lignina a través de enlaces covalentes, retenidos en la fracción no

bioaccesible (Pinto et al., 2023b), los cuales se van a colon y probablemente son fermentados por la microbiota.

Después de la fermentación colónica *in vitro*, la cáscara con tamaño de 250 µm presentó valores de 10718.40 ± 83.95 mg EAG/100 g bs, significativamente superiores a las demás muestras (Tabla 3). Cárdenas-Castro et al. (2021) encontraron 20.61 mg EAG/100 g bs en la cáscara de tomate (500 µm), mientras que en cáscara de tuna (500 µm) se reportó 316 mg EAG/100 g bs (Manzur-Valdespino, 2022), resultados inferiores a los presentados en esta investigación. Esto sugiere que un tamaño de partícula más pequeño, al exponer una mayor área superficial, ocasiona el rompimiento de la pared celular de la matriz alimentaria (Hu et al., 2023; Xie et al., 2024), lo que facilita la liberación de los compuestos fenólicos totales de la fibra, que se encuentran unidos a la celulosa, hemicelulosa y proteínas estructurales (Zhang et al., 2020). Esto permite su metabolización en compuestos fenólicos simples bajo la acción de las enzimas digestivas y de la microbiota intestinal (Zhang et al., 2022; Hu et al., 2023). Además, la microbiota metaboliza los fenoles liberados en otros fenoles o derivados fenólicos mediante reacciones de división de anillo, reducción, descarboxilación, desmetilación y deshidroxilación (Wu et al., 2022; Hu et al., 2023), lo que explica el aumento significativo en su contenido.

Los CFT son conocidos por su actividad antioxidante (Guan et al., 2021), antimicrobiana (Wu et al., 2018), antiinflamatoria (Kauffmann y Castro, 2023), anticancerígena (Bilgin et al., 2022; Mohammed et al., 2023), antimutagénica (Sahu et al., 2023), antihipertensiva (Ahmed et al., 2019), antidiabética (Lv et al., 2020; Sansenya et al., 2022), hepatoprotectora (Ramos et al., 2021) y neuroprotectora (Al-Khayri et al., 2022). Por lo tanto, su consumo podría prevenir las patologías antes mencionadas.

8.5 Capacidad antioxidante

8.5.1 ABTS

La cáscara de guanábana con un tamaño de partícula más pequeño (250 µm) en la muestra original mostró mayor capacidad antioxidante (13032.31 ± 298.95 µmol ET/100 g bs), en comparación con la cáscara que solo se trituró (>850 µm), que presentó menor capacidad antioxidante (5976.87 ± 143.34 µmol ET/100 g bs) (Tabla 4). En un estudio sobre la cáscara de aguacate tamizada a 250 µm se reportaron valores de 1934.30 ± 138.26 µmol ET/100 g bs (Palma-González, 2023). Mientras que Sogi et al. (2013) analizaron la cáscara de mango tamizada a 500 µm, encontrando 1970 µmol ET/100 g bs. Estos valores fueron inferiores a los registrados para la cáscara de guanábana con el mismo tamaño de partícula. Se ha informado que la reducción del tamaño de partícula provoca la fragmentación celular de la matriz alimentaria, lo que aumenta la superficie específica (Weng et al., 2022). Esto facilita la dispersabilidad y, en consecuencia, incrementa la liberación de componentes bioactivos, resultando en una mayor capacidad antioxidante (Hong et al., 2020).

Tabla 4. Capacidad antioxidante medida por ABTS (µmol ET/100 g) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.

Tamaño de partícula	Muestra Original	Fracción Bioaccesible	Muestra Fermentable
CONTROL	5976.87 ± 143.34 ^{a}	2536.00 ± 29.01 ^{b}	26428.39 ± 1261.55 ^{a}
250 µm	13032.31 ± 298.95 ^{c}	3229.13 ± 91.16 ^{d}	61439.14 ± 937.02 ^{c}
500 µm	7868.03 ± 164.96 ^{b}	2785.33 ± 21.32 ^{c}	36245.59 ± 758.83 ^{b}
850 µm	7731.97 ± 262.41 ^{b}	1879.70 ± 52.75 ^{a}	34353.12 ± 2145.92 ^{b}

ET: equivalentes de Trolox por 100 g de base seca. $^{a-d}$ Letras diferentes indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre las muestras de la misma columna. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

En la fracción bioaccesible, la muestra con un tamaño de partícula de 250 µm, la capacidad antioxidante fue de 3229.13 ± 91.16 µmol ET/100 g bs, significativamente

más alta que en las demás muestras (Tabla 4). En contraste, se encontró que la cáscara de naranja brocada (*Citrus sinensis*) tamizada a 149 µm tuvo 692 µmol ET/100 g bs (1.73 mg ET/g bs) (Wang et al., 2023).

Cuando el tamaño de partícula es reducido, puede aumentar la capacidad antioxidante durante la bioaccesibilidad (Lyu et al., 2020). Sin embargo, dado que las cáscaras vegetales están compuestas principalmente por fibras, esto dificulta la interacción con enzimas digestivas como la pepsina y la tripsina (Su et al., 2018). Además, el pH neutro o ligeramente alcalino puede interferir en la solubilidad de los compuestos bioactivos y por lo tanto en su capacidad antioxidante (Wang et al., 2016).

Después de la fermentación colónica *in vitro*, la cáscara de guanábana de 250 µm presentó 61439.14 ± 937.02 µmol ET/100 g bs, significativamente mayor ($p<0.05$) a diferencia de las demás muestras (Tabla 4). Estos resultados superaron los obtenidos para el polvo de semilla de guanábana secado a calor (2000 µm), que alcanzó 2039 µmol ET/100 g bs (Andrade et al., 2022).

Las partículas con tamaño más pequeño al presentar área de superficie mayor, las hace más susceptibles a la acción de la microbiota intestinal (Hu et al., 2023). Como resultado, los polifenoles, al estar más expuestos se metabolizan en otros compuestos, lo que incrementa la capacidad antioxidante (Zhang et al., 2023).

Debido a su alta capacidad antioxidante, la cáscara de guanábana podría proteger las células y tejidos del daño al capturar radicales libres, formar complejos con iones metálicos y prevenir la extracción continua de hidrógeno (Mucha et al., 2021). Además, al neutralizar los radicales libres y promover otros procesos en el cuerpo, podría ayudar a prevenir enfermedades crónicas (Zheng et al., 2023).

8.5.2 DPPH

La capacidad antioxidante medida por DPPH en la cáscara de guanábana se presenta en la Tabla 5. En la muestra original, la cáscara tamizada a 250 µm mostró capacidad

antioxidante significativamente superior, con 28084.36 ± 1930.47 µmol ET/100 g bs, en comparación con las demás muestras. En otras matrices alimentarias como la cáscara de calabaza (*Cucurbita maxima*) tamizada a un tamaño de partícula de 60 µm, presentó 1534.9 ± 11.8 µmol ET/100 g (Gavril et al., 2024), y en una cáscara de mango tamizada a 500 µm, se reportó 21900 µmol ET/100 g (Sogi et al., 2013), los cuales fueron inferiores a lo observado en este estudio.

Tabla 5. Capacidad antioxidante medida por DPPH (µmol ET/100 g bs) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.

Tamaño de partícula	Muestra Original	Fracción Bioaccesible	Muestra Fermentable
CONTROL	21963.85 ± 440.75 ^{b}	532.11 ± 16.64 ^{a}	N/D
250 µm	28084.36 ± 1930.47 ^{c}	622.07 ± 7.68 ^{b}	4216.67 ± 420.07
500 µm	23112.56 ± 1485.74 ^{b}	569.99 ± 24.09 ^{ab}	N/D
850 µm	15627.95 ± 497.41 ^{a}	537.24 ± 36.96 ^{a}	N/D

ET: equivalentes de Trolox por 100 g de base seca. $^{a-c}$ Letras diferentes indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre las muestras de la misma columna. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm). N/D: No detectado.

La fracción bioaccesible de la partícula de 250 µm alcanzó capacidad antioxidante significativamente más alta (622.07 ± 7.68 µmol ET/100 g bs) en comparación con la muestra control y a 850 µm (Tabla 5). Este resultado fue menor que los reportado por Wang et al. (2023) en una cáscara de naranja *(Citrus sinensis*) tamizada a 149 µm, que mostró valor de 1012 µmol ET/100 g bs (2.53 mg ET/g bs).

En cuanto a la fermentación colónica *in vitro*, solo la muestra de 250 µm mostró capacidad antioxidante (4216.67 ± 420.07 µmol ET/100 g bs), mientras que en las demás cáscaras no se detectó (Tabla 5). Hasta la fecha, no se han encontrado investigaciones sobre la capacidad antioxidante por DPPH en cáscara de guanábana después del proceso de fermentación colónica *in vitro*. Sin embargo, en un estudio

realizado en semillas de guanábana secadas al horno con circulación de aire forzado y trituradas a 2000 µm, alcanzó 6291 µmol ET/100 g (Andrade et al., 2022).

Qi et al. (2023) sugieren que la disminución de la capacidad antioxidante podría deberse al cambio en un pH más elevado durante la fase intestinal. Después del periodo de fermentación, es probable que los compuestos antioxidantes hayan experimentado cambios estructurales, como la desprotonación de los grupos hidroxilo (Bouayed et al., 2011). No obstante, estos compuestos disminuyeron significativamente a las 24 horas, lo que sugiere que los compuestos antioxidantes podrían metabolizarse tardíamente durante la fermentación (Zhang et al., 2023).

8.5.3 FRAP

Se evaluó la capacidad antioxidante por FRAP en la cáscara de guanábana a distintos tamaños de partícula (Tabla 6). En la muestra original, la cáscara tamizada a 250 µm presentó la capacidad antioxidante más alta ($p< 0.05$), con una cifra de 207.08 ± 3.95 µmol Fe(II)/100 g bs. Estos resultados fueron superiores en comparación a una cáscara de sandía (>850 µm), que alcanzó una capacidad antioxidante de 67.38 ± 2.18 µmol Fe(II)/100 g (De Faria et al., 2023), así como la cáscara de mango tamizada a 500 µm, que obtuvo 134 µmol Fe(II)/100 g (Sogi et al., 2013). Estos hallazgos son consistentes con los reportados previamente en el contenido de compuestos fenólicos totales, sugiere que, al reducir el tamaño de partícula, incrementa el área superficial y facilita la liberación de compuestos antioxidantes que propician un aumento en la capacidad antioxidante para neutralizar radicales libres y prevenir el daño oxidativo (Ahmed et al., 2019). Por lo tanto, estos compuestos podrían relacionarse con la capacidad antioxidante medida por FRAP.

En la muestra bioaccesible, la cáscara de 250 µm mostró una capacidad antioxidante de 26.84 ± 0.45 µmol Fe(II)/100 g bs, siendo significativamente mayor en comparación con las demás muestras (Tabla 6). Dato que fue superior al reportado por Wang et al. (2023) en una cáscara de naranja tamizada a 149 µm, que mostró 18296 µmol Fe(II)/100 g (45.74 mg ET/g bs).

Tabla 6. Capacidad antioxidante medida por FRAP (µmol Fe(II)/100 g) en la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.

Tamaño de partícula	Muestra Original	Fracción Bioaccesible	Muestra Fermentable
CONTROL	90.49 ± 0.52 [a]	22.85 ± 0.44 [c]	52.94 ± 1.26 [c]
250 µm	207.08 ± 3.95[d]	26.84 ± 0.45 [d]	78.85 ± 0.82 [d]
500 µm	149.38 ± 0.74 [c]	21.35 ± 0.08 [b]	16.17 ± 0.16 [b]
850 µm	138.68 ± 1.55 [b]	18.23 ± 0.07 [a]	9.74 ± 0.09 [a]

[a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras de la misma columna. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm).

Para las muestras fermentadas, la cáscara de 250 µm registró el valor más alto con 78.85 ± 0.82 µmol Fe(II)/100 g bs, superando significativamente (*p<0.05*) a las demás cáscaras (Tabla 6). En un estudio realizado por Andrade et al. (2022), en semillas de guanábana tamizadas a 2000 µm, reportó 295 µmol Fe(II)/100 g.

La capacidad antioxidante presente en la cáscara de guanábana, reduce el daño causado por el estrés oxidativo, protegiendo el tracto gastrointestinal antes de que estos compuestos entren en circulación sistemática (Shi et al., 2022; Kruk et al., 2022). Esto es crucial, ya que podría ayudar a prevenir enfermedades crónicas y cánceres, como el cáncer de colon (Liu et al., 2019).

8.6 Cambio de pH durante fermentación colónica *in vitro*

En la Figura 11 se muestran los valores de pH al inicio (hora 0) y después de 24 horas del proceso de fermentación colónica *in vitro*. El rango de pH en la hora cero fue de 9.34 a 9.49. La muestra a tamaño de partícula de 250 µm comenzó con el pH significativamente más bajo (9.34 ± 0.01) en comparación con las demás cáscaras (*p<0.05*). Tras 24 horas de fermentación, todas las muestras experimentaron una disminución significativa en el pH, siendo el blanco positivo (lactulosa), el que alcanzó el valor más bajo con 8.15 ± 0.01. Es coherente, ya que la lactulosa es un compuesto totalmente fermentable. En segundo lugar, se encontraron las cáscaras de 250 µm y

500 µm, que obtuvieron pH de 8.50 ± 0.12 y 8.63 ± 0.02 respectivamente. Se puede observar que la lactulosa disminuyó considerablemente 1.32 unidades, seguido de la cáscara de 250 µm y 500 µm con 0.84 y 0.79 unidades, respectivamente, ambos respecto al tiempo inicial. Cárdenas-Castro et al. (2021) observaron un comportamiento similar en cáscara de tomate tamizada a 500 µm, donde el pH inicial oscilaba entre 6.9 y 7.2. Después de 48 horas de fermentación, el pH disminuyó aproximadamente 1 unidad. Aunque estos valores fueron menores que los reportados en el presente estudio, la tendencia es comparable.

Al disminuir el tamaño de partícula de la matriz vegetal, aumenta su área de superficie y afecta su composición, resultando en un contenido más elevado de fibra soluble, esto incrementa la tasa de fermentación debido a la mayor accesibilidad de los microorganismos a los sustratos (Yao et al., 2022; Xie et al., 2024). Asimismo, la reducción de pH en el lumen colónico desempeña un papel crucial para la inhibición de microorganismos patógenos (Sanders et al., 2019), lo que podría estar relacionado con el crecimiento de bacterias ácido lácticas (BAL) y ácidos grasos de cadena corta (AGCC), quienes son los principales responsables de la disminución del pH (Peredo-Lovillo et al., 2020). Por lo que el consumo de cáscara de guanábana podría favorecer el crecimiento de bacterias beneficiosas y limitar a las bacterias patógenas (Baky et al., 2021). Además, podría estimular la producción de ácidos grasos de cadena corta, como acetato, propionato y butirato, siendo este último una fuente de energía preferida por los colonocitos, lo que a su vez podría reducir la aparición o el desarrollo de tumores (Liu et al., 2019).

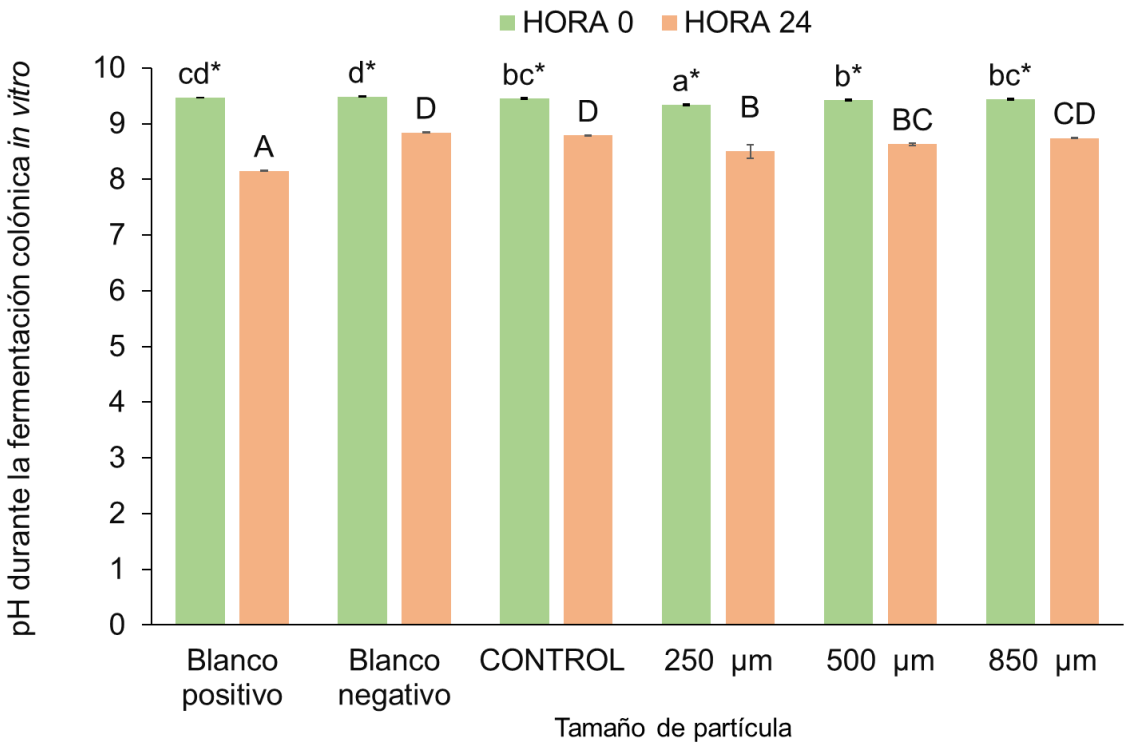


Figura 11. Valores de pH durante la fermentación colónica *in vitro*. [a-d] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras en la hora 0. [A-D] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras en la hora 24. *Indica diferencias significativas (*p<0.05*) entre las 0 y 24 horas. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm), Blanco positivo: lactulosa (sustrato totalmente fermentable), Blanco negativo: muestra sin sustrato

8.7 Bacterias ácido lácticas (BAL) durante la fermentación colónica *in vitro*

Los resultados del recuento de bacterias ácido lácticas (BAL) al inicio (hora 0) y tras 24 horas de fermentación colónica *in vitro* se muestran en la Figura 12. Al comienzo del proceso, no se encontraron diferencias significativas entre las cáscaras. La cuantificación de BAL a la hora 0 fue entre 7.33 ± 0.05 y 7.49 ± 0.07 UFC/mL. Después de 24 horas de fermentación, el blanco positivo (lactulosa) mostró un aumento significativo (*p<0.05*) alcanzando 8.98 ± 0.05 UFC/mL, superando a las demás muestras, seguido de la partícula de menor tamaño (250 µm) con 7.91 ± 0.10 UFC/mL.

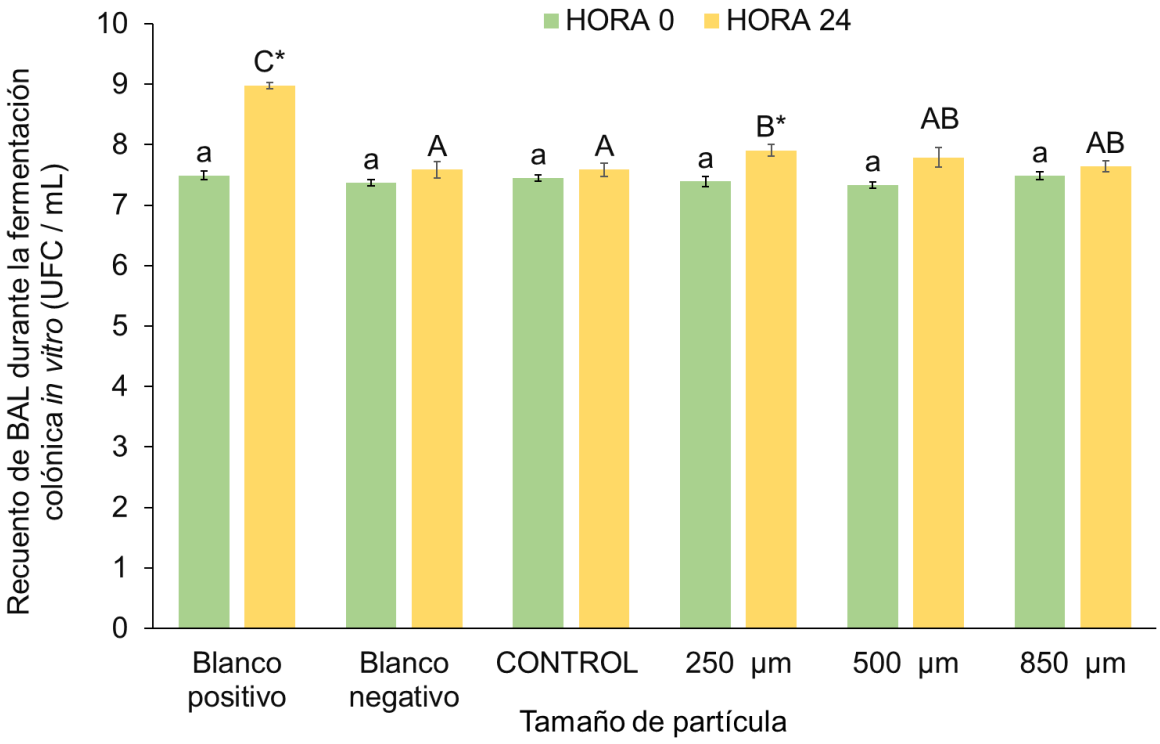


Figura 12. Recuento de bacterias ácido lácticas durante la fermentación colónica *in vitro*. [a] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras en la hora 0. [A-C] Letras diferentes indican diferencia significativa (*p<0.05*) entre las muestras en la hora 24. *Indica diferencias significativas (*p<0.05*) entre las 0 y 24 horas. CONTROL: cáscara triturada (>850 µm). Blanco positivo lactulosa (sustrato totalmente fermentable), Blanco negativo: muestra sin sustrato.

Ambas cáscaras demostraron un aumento significativo (*p<0.05*) de bacterias ácido lácticas después de las 24 horas, ya que la lactulosa aumentó 1.49 UFC/mL, mientras que la cáscara de guanábana de 250 µm incrementó 0.42 UFC/mL. Estos resultados fueron superiores a los reportados por Massa et al. (2022) en subproductos de jabuticaba con un tamaño de partícula inferior a 1000 µm, donde a la hora 0 el recuento de BAL fue de 4.32 UFC/mL, aumentando 0.58 (4.90 UFC/mL) después de 24 horas.

El crecimiento bacteriano puede variar significativamente entre diferentes cáscaras, ya que depende del sustrato disponible en la matriz fermentada (Lee et al., 2021; Vilas-Franquesa et al., 2024). Asimismo, a medida que disminuye el tamaño de partícula aumenta su superficie específica, permitiendo una mayor interacción entre los

microorganismos y los sustratos, aunque también propicia un ambiente más ácido para el crecimiento de BAL (Wang et al., 2019; Yang et al., 2024). Además, el aumento de estas bacterias podría estar relacionado con el alto contenido de fibra soluble y ciertos compuestos fenólicos que actúan como sustratos fermentables para estos microorganismos (Massa et al., 2020). La importancia de las BAL se ha asociado con diversos beneficios para la salud, como la mejora de la barrera intestinal, la respuesta del sistema inmune y la inhibición de patógenos como Clostridium y Bacteroides (Owolabi et al., 2020; Massa et al., 2022).

9. Conclusiones

- En el análisis de la cáscara de guanábana, la muestra control (>850 µm) presentó el pH más alto, mientras que la muestra de 250 µm mostró el mayor contenido de sólidos solubles. En cuanto a los parámetros de color, la muestra de 850 µm registró los valores más elevados, indicando una tonalidad más verde.
- Respecto al contenido de fibra, la mayoría de las muestras de cáscara de guanábana mostraron niveles altos de fibra dietética total e insoluble, a diferencia de la cáscara de 250 µm, que destacó por tener un porcentaje significativamente mayor de fibra soluble.
- En cuanto a las propiedades funcionales de la cáscara de guanábana, la muestra de 250 µm evidenció mayor capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento y capacidad de retención de lípidos, en comparación con las demás muestras. Sin embargo, la muestra control (>850 µm) demostró mayor capacidad para retener glucosa.
- Asimismo, la muestra de 250 µm exhibió mayor contenido de compuestos fenólicos totales, así como capacidad antioxidante (por ABTS, DPPH y FRAP), tanto en la muestra original como después de los procesos de bioaccesibilidad y fermentación colónica *in vitro*.
- Además, se observó que, en la fermentación colónica *in vitro*, después de 24 horas, el pH de la cáscara de 250 µm disminuyó, lo que se asoció con un aumento en el crecimiento de bacterias ácido lácticas.

De manera general, la cáscara de guanábana con tamaño de partícula de 250 µm presentó las mejores propiedades funcionales, antioxidantes y mayor recuento de bacterias ácido lácticas. Por lo tanto, se sugiere que tamaños de partícula menores (250 µm) en la cáscara de guanábana, son ideales para incrementar las características antes mencionadas, aunque su uso dependerá del campo de aplicación. Finalmente, la cáscara de guanábana también podría ser de interés para desarrollar productos alimentarios con propiedades funcionales y antioxidantes beneficiosas para la salud.

10. Recomendaciones

- Identificar y cuantificar los compuestos fenólicos presentes en la cáscara de guanábana *Annona muricata* L. a diferentes tamaños de partícula mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).
- Identificar y cuantificar ácidos grasos de cadena corta (ácido acético, propiónico y butírico) por cromatografía de gases después de fermentación colónica *in vitro*.
- Evaluar el potencial antiinflamatorio de la cáscara de guanábana a diferentes tamaños de partícula.
- Probar su aplicación en un producto alimenticio con propiedades funcionales, antioxidantes o probióticas con beneficios para la salud.

11. Referencias bibliográficas

Actis-Goretta, L., Lévèques, A., Rein, M., Teml, A., Schäfer, C., Hofmann, U., Li, H., Schwab, M., Eichelbaum, M., & Williamson, G. (2013). Intestinal absorption, metabolism, and excretion of (–)-epicatechin in healthy humans assessed by using an intestinal perfusion technique. *American Journal Of Clinical Nutrition*, *98*(4), 924-933. https://doi.org/10.3945/ajcn.113.065789

Adaramoye, O. A., Oladipo, T. D., Akanni, O. O., & Abiola, O. J. (2018). Hexane fraction of *Annona muricata* (Soursop) seed ameliorates testosterone-induced benign prostatic hyperplasia in rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *111*, 403-413. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.038

Adefegha, S. A., Oyeleye, S. I., & Oboh, G. (2015). Distribution of phenolic contents, antidiabetic potentials, antihypertensive properties, and antioxidative effects of soursop (*Annona muricata* L.) fruit parts *in vitro*. *Biochemistry Research International*, *2015*, 1-8. https://doi.org/10.1155/2015/347673

Afzaal, M., Saeed, F., Asghar, A., Shah, Y. A., Ikram, A., Ateeq, H., Hussain, M., Ofoedu, C. E., & Chacha, J. S. (2022). Nutritional and therapeutic potential of soursop. *Journal of Food Quality*, *2022*, 1-9. https://doi.org/10.1155/2022/8828358

Aguilar-Hernández, G., De Lourdes García-Magaña, M., De los Ángeles Vivar-Vera, M., Sáyago-Ayerdi, S. G., Sánchez-Burgos, J. A., Morales-Castro, J., Anaya-Esparza, L. M., & González, E. M. (2019). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Annona muricata* by-products and pulp. *Molecules*, *24*(5), 904. https://doi.org/10.3390/molecules24050904

Ahmad, A. & Khalid, N. (2018). Chapter 5 - Dietary fibers in modern food production: a special perspective with β-Glucans. In Grumezescu, A. & Holban, A. (Eds.), Biopolymers for Food Design (125-156) Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811449-0.00005-0

Ahmed, J., Thomas, L., & Arfat, Y. A. (2019). Functional, rheological, microstructural and antioxidant properties of quinoa flour in dispersions as influenced by particle

size. *Food Research International*, *116*, 302-311. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.039

Al-Khayri, J. M., Yüksel, A. K., Yüksel, M., Işık, M., & Dikici, E. (2022). Phenolic profile and antioxidant, anticholinergic, and antibacterial properties of corn tassel. *Plants*, *11*(15), 1899. https://doi.org/10.3390/plants11151899

Anaya-Esparza, L. M., De Lourdes García-Magaña, M., Domínguez-Ávila, J. A., Yahia, E. M., Salazar-López, N. J., González-Aguilar, G. A., & Montalvo-González, E. (2020). Annonas: underutilized species as a potential source of bioactive compounds. *Food Research International*, *138*, 109775. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109775

Andrade, J. K. S., Barros, R. G. C., Gualberto, N. C., De Oliveira, C. S., Shanmugam, S., & Narain, N. (2022). Influence of *in vitro* gastrointestinal digestion and probiotic fermentation on the bioaccessibility of gallic acid and on the antioxidant potential of Brazilian fruit residues. *Food Science and Technology*, *153*, 112436. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112436

Arruda, H. S., Borsoi, F. T., Andrade, A. C., Pastore, G. M., & Marostica, M. R., J. (2023). Scientific advances in the last decade on the recovery, characterization, and functionality of bioactive compounds from the araticum fruit (*Annona crassiflora mart*.). *Plants*, *12*(7), 1536. https://doi.org/10.3390/plants12071536

Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2018). Fat digestibility in meat products: influence of food structure and gastrointestinal conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *70*(5), 530-539. https://doi.org/10.1080/09637486.2018.1542665

Association of Official Analytical Chemists. (1985). *Official Methods of Analysis* (14th ed). 1st suppl. Secs. 43, A14-43, A20, p.399.

Baky, M. H., Elshahed, M., Wessjohann, L., & Farag, M. A. (2021). Interactions between dietary flavonoids and the gut microbiome: a comprehensive review. *British Journal of Nutrition*, *128*(4), 577-591. https://doi.org/10.1017/s0007114521003627

Barros, R. G. C., Pereira, U. C., Andrade, J. K. S., De Oliveira, C. S., Vasconcelos, S. V., & Narain, N. (2020). *In vitro* gastrointestinal digestion and probiotics

fermentation impact on bioaccessibility of phenolics compounds and antioxidant capacity of some native and exotic fruit residues with potential antidiabetic effects. *Food Research International*, *136*, 109614. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109614

Barry, J., Hoebler, C., MacFarlane, G. T., MacFarlane, S., Mathers, J. C., Reed, K. A., Mortensen, P. B., Nordgaard, I., Rowland, I. R., & Rumney, C. J. (1995). Estimation of the fermentability of dietary fiber *in vitro*: a European interlaboratory study. *British Journal of Nutrition*, *74*(3), 303-322. https://doi.org/10.1079/bjn19950137

Benzie, I. F., & Strain, J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, *239*(1), 70-76. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292

Bilgin, S., Tayhan, S. E., Yıldırım, A., & Koç, E. (2022). Investigation of the effects of isoeugenol-based phenolic compounds on migration and proliferation of HT29 colon cancer cells at cellular and molecular level. *Bioorganic Chemistry*, *130*, 106230. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.106230

Bouayed, J., Hoffmann, L., & Bohn, T. (2011). Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastro-intestinal digestion and dialysis of apple varieties: Bioaccessibility and potential uptake. *Food Chemistry*, *128*(1), 14-21. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.052

Brennan, L., Langley, S., Verghese, K., Lockrey, S., Ryder, M., Francis, C., Phan-Le, N. T., & Hill, A. (2020). The role of packaging in fighting food waste: a systematized review of consumer perceptions of packaging. *Journal of Cleaner Production*, *281*, 125276. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125276

Cabezas-Terán, K., Grootaert, C., Ortiz, J., Donoso, S., Ruales, J., Van Bockstaele, F., Van Camp, J., & Van de Wiele, T. (2022). *In vitro* bioaccessibility and uptake of β-carotene from encapsulated carotenoids from mango by-products in a coupled gastrointestinal digestion/Caco-2 cell model. *Food Research International*, *164*, 112301. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112301

Campos, D. A., Gómez-García, R., Vilas-Boas, A. A., Madureira, A. R., & Pintado, M. M. (2020). Management of fruit industrial by-products - a case study on circular

economy approach. *Molecules*, *25*(2), 320. https://doi.org/10.3390/molecules25020320

Cañas, S., Tosi, N., Núñez-Gómez, V., Del Rio, D., Mena, P., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilera, Y. (2024). Microbial catabolism of coffee pulp (poly)phenols during *in vitro* colonic fermentation. *Food Chemistry*, *463*, 141354. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141354

Cárdenas-Castro, A. P., Zamora-Gasga, V. M., Alvarez-Parrilla, E., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Venema, K., & Sáyago-Ayerdi, S. G. (2021). *In vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation of tomato (*Solanum lycopersicum L.*) and husk tomato (*Physalis ixocarpa Brot.*): Phenolic compounds released and bioconverted by gut microbiota. *Food Chemistry*, *360*, 130051. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130051

Cardoso, C., Afonso, C., Lourenço, H., Costa, S., & Nunes, M. L. (2014). Bioaccessibility assessment methodologies and their consequences for the risk–benefit evaluation of food. *Trends in Food Science & Technology*, *41*(1), 5-23. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.08.008

Chimbevo, L. M., & Essuman, S. (2019). Preliminary Screening of Nutraceutical Potential of Fruit Pulp, Peel and Seeds from *Annona Squamosa* (L.) and *Annona Muricata* (L.) Growing in Coast Region of Kenya. *American Journal of BioScience*, 7(3), 58. https://doi.org/10.11648/j.ajbio.20190703.11

Coda, R., Varis, J., Verni, M., Rizzello, C. G., & Katina, K. (2017). Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition. *Food Science and Technology*, *82*, 296-302. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.062

Coria-Téllez, A. V., Montalvo-Gónzalez, E., Yahia, E. M., & Obledo-Vázquez, E. N. (2018). *Annona muricata*: a comprehensive review on its traditional medicinal uses, phytochemicals, pharmacological activities, mechanisms of action and toxicity. *Arabian Journal of Chemistry*, *11*(5), 662-691. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.01.004

Corona, L. S., Hernández-Martínez, D. M., & Meza-Márquez, O. G. (2019). Análisis de parámetros fisicoquímicos, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en piel, pulpa y fruto entero de cinco cultivares de manzana (*Malus domestica*)

cosechadas en México. *Biotecnia*, *22*(1), 166-174. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1193

Cui, J., Lian, Y., Zhao, C., Du, H., Han, Y., Gao, W., Xiao, H., & Zheng, J. (2019). Dietary fibers from fruits and vegetables and their health benefits via modulation of gut microbiota. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *18*(5), 1514-1532. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12489

De Faria C. C. E., Trindade, M. E. F., Santana, M. G., Lobo, F. A. T. F., & Teodoro, A. J. (2023). Improvement of the phenolic composition and the antioxidant capacity of red guava (*Psidium guajava*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) powders by means of foam blanket drying. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100368. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100368

De Morais O. S. A., Moreira, A. C. C. G., De Almeida, M. E., Stamford, T. C. M., & Stamford, T. L. M. (2015). Dietary fiber content, phenolic compounds and antioxidant activity in soursops (*Annona muricata* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, *37*(4), 1020-1026. https://doi.org/10.1590/0100-2945-211/14

De Samhita, S., Paul, S., Manna, A., Majumder, C., Pal, K., Casarcia, N., Mondal, A., Banerjee, S., Nelson, V. K., Ghosh, S., Hazra, J., Bhattacharjee, A., Mandal, S. C., Pal, M., & Bishayee, A. (2023). Phenolic phytochemicals for prevention and treatment of colorectal cancer: a critical evaluation of *in vivo* studies. *Cancers*, *15*(3), 993. https://doi.org/10.3390/cancers15030993

Dias, P., Sajiwanie, J., & Rathnayaka, R. (2020). Chemical composition, physicochemical and technological properties of selected fruit peels as a potential food source. *International Journal of Fruit Science*, *20*(sup2), S240-S251. https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1717402

Dilucia, F., Lacivita, V., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2020). Sustainable use of fruit and vegetable by-products to enhance food packaging performance. *Foods*, *9*(7), 857. https://doi.org/10.3390/foods9070857

Dima, C., Assadpour, E., Dima, S., & Jafari, S. M. (2020). Bioavailability and bioaccessibility of food bioactive compounds; overview and assessment by *in vitro* methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *19*(6), 2862-2884. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12623

Domingues, Y. O., Lemes, G. A., De Oliveira, F. L., De Souza, T. R., Silva, B., Bento, J. A. C., & Morzelle, M. C. (2024). *In vitro* simulated gastrointestinal digestion and bioaccessibility of phenolic compounds and antioxidants of soursop (*Annona muricata* L.) peel and pulp. *Food Science and Technology*, *208*, 116694. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116694

Domínguez-Avila, J. A., Villa-Rodriguez, J. A., Montiel-Herrera, M., Pacheco-Ordaz, R., Roopchand, D. E., Venema, K., & González-Aguilar, G. A. (2020). Phenolic compounds promote diversity of gut microbiota and maintain colonic health. *Digestive Diseases and Sciences*, *66*(10), 3270-3289. https://doi.org/10.1007/s10620-020-06676-7

Domínguez-Fernández, M., Yang, P. Y. T., Ludwig, I. A., Clifford, M. N., Cid, C., & Rodriguez-Mateos, A. (2021). *In vivo* study of the bioavailability and metabolic profile of (poly)phenols after sous-vide artichoke consumption. *Food Chemistry*, *367*, 130620. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130620

Dong, J., Wang, L., Lü, J., Zhu, Y., & Shen, R. (2019). Structural, antioxidant and adsorption properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italica*) bran. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(8), 3886-3894. https://doi.org/10.1002/jsfa.9611

Du, J., Zhong, B., Subbiah, V., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). LC-ESI-QTOF-MS/MS profiling and antioxidant activity of phenolics from custard apple fruit and by-products. *Separations*, *8*(5), 62. https://doi.org/10.3390/separations8050062

Duda-Chodak, A., Tarko, T., Satora, P., & Sroka, P. (2015). Interaction of dietary compounds, especially polyphenols, with the intestinal microbiota: a review. *European Journal of Nutrition*, *54*(3), 325-341. https://doi.org/10.1007/s00394-015-0852-y

Etcheverry, P., Grusak, M. A., & Fleige, L. E. (2012). Application of *in vitro* bioaccessibility and bioavailability methods for calcium, carotenoids, folate, iron, magnesium, polyphenols, zinc, and vitamins B6, B12, D, and E. *Frontiers in Physiology*, *3(1), 317*. https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00317

Failla, M. L., Tianyao, H., & Thakkar, S. K. (2008). *In vitro* screening of relative bioaccessibility of carotenoids from foods. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, *17*(1), 200. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18296337/

FAO. (2019). State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste Reduction. *FAO*.

Fayaz, G., Soleimanian, Y., Mhamadi, M., Turgeon, S. L., & Khalloufi, S. (2022). The applications of conventional and innovative mechanical technologies to tailor structural and functional features of dietary fibers from plant wastes: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(3), 2149-2199. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12934

Fehlberg, J., McKay, S., Matuana, L. M., & Almenar, E. (2023). Use of orange juice processing waste to produce films using blown film extrusion for food packaging. *Journal of Food Engineering*, *341*, 111337. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111337

Femenia, A., Lefebvre, A., Thebaudin, J., Robertson, J., & Bourgeois, C. (1997). Physical and sensory properties of model foods supplemented with cauliflower fiber. *Journal of Food Science*, *62*(4), 635-639. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15426.x

Feng, X., Yu, B., Regenstein, J. M., & Wang, L. (2022). Effect of particle size on composition, physicochemical, functional, and structural properties of insoluble dietary fiber concentrate from citrus peel. *Food Science and Technology International*, *29*(3), 195-203. https://doi.org/10.1177/10820132211063973

Ferreyra, S., Torres-Palazzolo, C., Bottini, R., Camargo, A., & Fontana, A. (2021). Assessment of *in-vitro* bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds extracts recovered from grapevine bunch stem and cane by-products. *Food Chemistry*, *348*, 129063. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129063

Fu, J., Zheng, Y., Gao, Y., & Xu, W. (2022). Dietary fiber intake and gut microbiota in human health. *Microorganisms*, *10*(12), 2507. https://doi.org/10.3390/microorganisms10122507

Garcia-Amezquita, L. E., Tejada-Ortigoza, V., Serna-Saldivar, S. O., & Welti-Chanes, J. (2018). Dietary fiber concentrates from fruit and vegetable by-products: processing, modification, and application as functional ingredients. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(8), 1439-1463. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2117-2

Garcia-Herrero, I., Hoehn, D., Margallo, M., Laso, J., Bala, A., Batlle-Bayer, L., Fullana, P., Vazquez-Rowe, I., Gonzalez, M., Durá, M., Sarabia, C., Abajas, R., Amo-Setien, F., Quiñones, A., Irabien, A., & Aldaco, R. (2018). On the estimation of potential food waste reduction to support sustainable production and consumption policies. *Food Policy*, *80*, 24-38. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.08.007

Gavamukulya, Y., Wamunyokoli, F., & El-Shemy, H. A. (2017). *Annona muricata*: Is the natural therapy to most disease conditions including cancer growing in our backyard? A systematic review of its research history and future prospects. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, *10*(9), 835-848. https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.08.009

Gavril, R. N., Cârlescu, P. M., Velește, I. D., Arsenoaia, V. N., Stoica, F., Stănciuc, N., Aprodu, I., Constantin, O. E., & Râpeanu, G. (2024). The development of value-added yogurt based on pumpkin peel powder as a bioactive powder. *Journal of Agriculture and Food Research*, 101098. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101098

George, V. C., Kumar, D. R. N., Suresh, P. K., & Kumar, R. A. (2014). Antioxidant, DNA protective efficacy and HPLC analysis of *Annona muricata* (soursop) extracts. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(4), 2328-2335. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1289-7

Goering, H. K. (1970). *Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications)*.

Goñi, I., & Martin-Carrón, N. (1998). *In vitro* fermentation and hydration properties of commercial dietary fiber-rich supplements. *Nutrition Research*, *18*(6), 1077-1089. https://doi.org/10.1016/s0271-5317(98)00090-6

Guan, Z., Yu, E., & Feng, Q. (2021). Soluble dietary fiber, one of the most important nutrients for the gut microbiota. *Molecules*, *26*(22), 6802. https://doi.org/10.3390/molecules26226802

Gurak, P. D., De Bona, G. S., Tessaro, I. C., & Marczak, L. D. F. (2014). Jaboticaba pomace powder obtained as a co-product of juice extraction: a comparative study of powder obtained from peel and whole fruit. *Food Research International*, *62*, 786-792. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.042

He, C., Qi, J., Liao, J., Song, Y., & Wu, C. (2023). Excellent hydration properties and oil holding capacity of citrus fiber: effects of component variation and microstructure. *Food Hydrocolloids*, *144*, 108988. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108988

He, Y., Wang, B., Wen, L., Wang, F., Yu, H., Chen, D., Su, X., & Zhang, C. (2021). Effects of dietary fiber on human health. *Food Science and Human Wellness*, *11*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.07.001

Henríquez, M., Almonacid, S., Lutz, M., Simpson, R., & Valdenegro, M. (2012). Comparison of three drying processes to obtain an apple peel food ingredient. *CyTA-Journal of Food*, *11*(2), 127-135. https://doi.org/10.1080/19476337.2012.703693

Hidalgo, A., Fongaro, L., & Brandolini, A. (2014). Wheat flour granulometry determines colour perception. *Food Research International*, *64*, 363-370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.050

Hong, S., Das, P. R., & Eun, J. (2020). Effects of superfine grinding using ball-milling on the physical properties, chemical composition, and antioxidant properties of *Quercus salicina* (Blume) leaf powders. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(8), 3123-3131. https://doi.org/10.1002/jsfa.10941

Hu, H., Wang, Y., & Lu, X. (2023). *In vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation of media-milled black rice particle-stabilized pickering emulsion: phenolic release, bioactivity and prebiotic potential. *Food Chemistry*, *432*, 137174. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137174

Huang, J., Liao, J., Qi, J., Jiang, W., & Yang, X. (2020). Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel. *Food Hydrocolloids*, *110*, 106140. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106140

IDF. (1997). Sensory evaluation of dairy products by scoring-reference Method. IDF Standard 99C:1997. International Dairy Federation, Brussels, Belgium.

Ilango, S., Sahoo, D. K., Paital, B., Kathirvel, K., Gabriel, J. I., Subramaniam, K., Jayachandran, P., Dash, R. K., Hati, A. K., Behera, T. R., Mishra, P., & Nirmaladevi, R. (2022). A review on *Annona muricata* and its anticancer activity. *Cancers*, *14*(18), 4539. https://doi.org/10.3390/cancers14184539

Jakobek, L., & Matić, P. (2019). Non-covalent dietary fiber - polyphenol interactions and their influence on polyphenol bioaccessibility. *Trends in Food Science & Technology*, *83*, 235-247. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.024

Jia, M., Chen, J., Liu, X., Xie, M., Nie, S., Chen, Y., Xie, J., & Yu, Q. (2019). Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation. *Food Hydrocolloids*, *94*, 468-474. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.047

Jiang, C., Wang, R., Liu, X., Wang, J., Zheng, X., & Zuo, F. (2022). Effect of particle size on physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic ability of insoluble dietary fiber from corn bran. *Frontiers in Nutrition*, *9*. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.951821

Joseph, V., Rovina, K., Ling, F., Supri, S., & Yin, K. (2024). Value-added applications of fruit peel biowaste: a review of potential uses in the food industry. *Food Biophysics*, *19*(4), 807-832. https://doi.org/10.1007/s11483-024-09845-7

Jung, J. Y., Han, S., Kim, Z., Kim, M. H., Kang, H. K., Jin, H. M., & Lee, M. H. (2021). *In-vitro* characterization of growth inhibition against the gut pathogen of potentially probiotic lactic acid bacteria strains isolated from fermented products. *Microorganisms*, *9*(10), 2141. https://doi.org/10.3390/microorganisms9102141

Karakuş, E., Ayhan, Z., & Haskaraca, G. (2023). Development and characterization of sustainable-active-edible-bio based films from orange and pomegranate peel waste for food packaging: effects of particle size and acid/plasticizer

concentrations. *Food Packaging and Shelf Life*, *37*, 101092. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101092

Karastogianni, S., Girousi, S., & Sotiropoulos, S. (2015). pH: principles and measurement. In Caballero, B., Finglas, P., & Toldrá, F. (Eds). Encyclopedia of Food and Health (333-338). Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00538-9

Kauffmann, A. C., & Castro, V. S. (2023). Phenolic compounds in bacterial inactivation: a perspective from Brazil. *Antibiotics*, *12*(4), 645. https://doi.org/10.3390/antibiotics12040645

Klostermann, C., Endika, M., Cate, E. T., Buwalda, P., De Vos, P., Bitter, J., Zoetendal, E., & Schols, H. (2023). Type of intrinsic resistant starch type 3 determines *in vitro* fermentation by pooled adult faecal inoculum. *Carbohydrate Polymers*, *319*, 121187. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121187

Koh, A., De Vadder, F., Kovatcheva-Datchary, P., & Bäckhed, F. (2016). From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites. *Cell*, *165*(6), 1332-1345. https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.05.041

Kruk, J., Aboul-Enein, B., Duchnik, E., & Marchlewicz, M. (2022). Antioxidative properties of phenolic compounds and their effect on oxidative stress induced by severe physical exercise. *The Journal of Physiological Sciences*, *72*(1), 1-24. https://doi.org/10.1186/s12576-022-00845-1

Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., Mancini-Filho, J., & Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Food Science and Technology*, *25*(4), 726-732. https://doi.org/10.1590/s0101-20612005000400016

Lambert, J. E., Parnell, J. A., Tunnicliffe, J. M., Han, J., Sturzenegger, T., & Reimer, R. A. (2016). Consuming yellow pea fiber reduces voluntary energy intake and body fat in overweight/obese adults in a 12-week randomized controlled trial. *Clinical Nutrition*, *36*(1), 126-133. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2015.12.016

Leão, D. P., Franca, A. S., Oliveira, L. S., Bastos, R., & Coimbra, M. A. (2017). Physicochemical characterization, antioxidant capacity, total phenolic and proanthocyanidin content of flours prepared from pequi (*Caryocar brasilense*

Camb.) fruit by-products. *Food Chemistry*, *225*, 146-153. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.027

Lee, B., Hsu, W., Hou, C., Chien, H., & Wu, S. (2021). The protection of lactic acid bacteria fermented-mango peel against neuronal damage induced by amyloid-beta. *Molecules*, *26*(12), 3503. https://doi.org/10.3390/molecules26123503

Lee, W. Z., Chang, S. K., Khoo, H. E., Sia, C. M., & Yim, H. S. (2016). Influence of different extraction conditions on antioxidant properties of soursop peel. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, *15*(4), 419-428. https://doi.org/10.17306/j.afs.2016.4.40

Li, X., Wang, L., Tan, B., & Li, R. (2024). Effect of structural characteristics on the physicochemical properties and functional activities of dietary fiber: a review of structure-activity relationship. *International Journal of Biological Macromolecules*, *269*, 132214. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132214

Li, Y., Li, M., Wang, L., & Li, Z. (2021). Effect of particle size on the release behavior and functional properties of wheat bran phenolic compounds during *in vitro* gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, *367*, 130751. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130751

Liu, S., Jia, M., Chen, J., Wan, H., Dong, R., Nie, S., Xie, M., & Yu, Q. (2019). Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber. *Food Hydrocolloids*, *93*, 284-292. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.047

Liu, Y., Wang, L., Liu, F., & Pan, S. (2016). Effect of grinding methods on structural, physicochemical, and functional properties of insoluble dietary fiber from orange peel. *International Journal of Polymer Science*, *2016*, 1-7. https://doi.org/10.1155/2016/6269302

Lucarini, M., Durazzo, A., Bernini, R., Campo, M., Vita, C., Souto, E. B., Lombardi-Boccia, G., Ramadan, M. F., Santini, A., & Romani, A. (2021). Fruit wastes as a valuable source of value-added compounds: a collaborative perspective. *Molecules*, *26*(21), 6338. https://doi.org/10.3390/molecules26216338

Luo, X. (2023). Natural Antioxidants from Fruit by-products for Active Packaging Applications. In: Ahmed, S. (eds) Biobased Packaging Materials (163-192). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6050-7_7

Luo, X., Wang, Q., Fang, D., Zhuang, W., Chen, C., Jiang, W., & Zheng, Y. (2018). Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: structural characterization and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *120*, 1461-1467. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.149

Lv, Q., Cao, J., Liu, R., & Chen, H. (2020). Structural characterization, α-amylase and α-glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry*, *341*, 128218. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128218

Lyu, Y., Bi, J., Chen, Q., Wu, X., Qiao, Y., Hou, H., & Zhang, X. (2020). Bioaccessibility of carotenoids and antioxidant capacity of seed-used pumpkin byproducts powders as affected by particle size and corn oil during *in vitro* digestion process. *Food Chemistry*, *343*, 128541. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128541

Ma, M., & Mu, T. (2015). Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin. *Food Chemistry*, *194*, 237-246. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.095

Ma, X., Liu, Y., Liu, J., Zhang, J., & Liu, R. (2020). Changes in starch structures and *in vitro* digestion characteristics during maize (*Zea mays* L.) germination. *Food Science & Nutrition*, *8*(3), 1700-1708. https://doi.org/10.1002/fsn3.1457

Ma, Z., Zhang, N., Zhai, X., & Tan, B. (2023). Structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber from brown rice products treated by different processing techniques. *Food Science and Technology*, *182*, 114789. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114789

Manzur-Valdespino, S. (2022). Elaboración de un nutracéutico a partir de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) como coadyuvante en el tratamiento de sobrepeso y obesidad [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México.

Masood, F., Haque, A., Ahmad, S., & Malik, A. (2020). Potential of food processing by-products as dietary fibers. In: Ahmad, S., Al-Shabib, N. (eds) Functional Food Products and Sustainable Health. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4716-4_5

Massa, N. M. L., De Oliveira, S. P. A., Rodrigues, N. P. A., Menezes, F. N. D. D., Lima, M. D. S., Magnani, M., & De Souza, E. L. (2022). *In vitro* colonic fermentation and potential prebiotic properties of pre-digested jabuticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) by-products. *Food Chemistry*, *388*, 133003. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133003

Massa, N. M. L., Menezes, F. N. D. D., De Albuquerque, T. M. R., De Oliveira, S. P. A., Lima, M. D. S., Magnani, M., & De Souza, E. L. (2020). Effects of digested jabuticaba *(Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) by-product on growth and metabolism of Lactobacillus and Bifidobacterium indicate prebiotic properties. *Food Science and Technology*, *131*, 109766. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109766

Mendoza-Méndez, O., Palacios-De-La-Cruz, A., Salinas-Mata, H., Sarmiento-Vilela, K., & Paucar-Menacho, L. M. (2022). Soursop (*Annona muricata* L): origin, characteristics, harvest, Postharvest, antioxidant activity, anti-inflammatory activity and health benefits. *Agroindustrial Science*, *12*(1), 123-129. https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.01.14

Miller, E. R., Parsons, M. J., Ullrey, D. E., & Ku, P. K. (1981). Bioavailability of iron from ferric choline citrate and a ferric copper cobalt choline citrate complex for young pigs. *Journal of Animal Science*, *52*(4), 783-787. https://doi.org/10.2527/jas1981.524783x

Miranda, N. C., Araujo, E. C. B., Justino, A. B., Cariaco, Y., Mota, C. M., Costa-Nascimento, L. A., Espindola, F. S., & Silva, N. M. (2021). Anti-parasitic activity of *Annona muricata* L. leaf ethanolic extract and its fractions against toxoplasma gondii *in vitro* and *in vivo*. *Journal of Ethnopharmacology*, *273*, 114019. https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114019

Mohammed, H. A., Emwas, A., & Khan, R. A. (2023). Salt-tolerant plants, halophytes, as renewable natural resources for cancer prevention and treatment: roles of

phenolics and flavonoids in immunomodulation and suppression of oxidative stress towards cancer management. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(6), 5171. https://doi.org/10.3390/ijms24065171

Mokrzycki, W., & Tatol, M. (2011). Color difference Delta E - A survey. *Machine Graphics and Vision*, *20*, 383-411.

Morales, F. J., & Jiménez-Pérez, S. (2001). Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food Chemistry*, *72*(1), 119-125. https://doi.org/10.1016/s0308-8146(00)00239-9

Morone, P., Koutinas, A., Gathergood, N., Arshadi, M., & Matharu, A. (2019). Food waste: challenges and opportunities for enhancing the emerging bio-economy. *Journal of Cleaner Production*, *221*, 10-16. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.258

Morozov, S., Isakov, V., & Konovalova, M. (2018). Fiber-enriched diet helps to control symptoms and improves esophageal motility in patients with non-erosive gastroesophageal reflux disease. *World Journal of Gastroenterology*, *24*(21), 2291-2299. https://doi.org/10.3748/wjg.v24.i21.2291

Mucha, P., Skoczyńska, A., Małecka, M., Hikisz, P., & Budzisz, E. (2021). Overview of the antioxidant and anti-inflammatory activities of selected plant compounds and their metal ions complexes. *Molecules*, *26*(16), 4886. https://doi.org/10.3390/molecules26164886

Mutakin, M., Fauziati, R., Fadhilah, F. N., Zuhrotun, A., Amalia, R., & Hadisaputri, Y. E. (2022). Pharmacological activities of soursop (*Annona muricata* Lin.). *Molecules*, *27*(4), 1201. https://doi.org/10.3390/molecules27041201

Nayak, A., & Hegde, K. (2021). A comprehensive review on the miracle nature of *Annona muricata* Linn. *Rajiv Gandhi University of Health Sciences Journal of Pharmaceutical Sciences*, *11*(1), 1-8. https://doi.org/10.26463/rjps.11_1_6

Neta, M. T. S. L., De Jesus, M. S., Da Silva, J. L. A., Araujo, H. C. S., Sandes, R. D. D., Shanmugam, S., & Narain, N. (2018). Effect of spray drying on bioactive and volatile compounds in soursop (*Annona muricata*) fruit pulp. *Food Research International*, *124*, 70-77. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.039

Ngemenya, M. N., Asongana, R., Zofou, D., Ndip, R. A., Itoe, L. O., & Babiaka, S. B. (2022). *In vitro* antibacterial potential against multidrug-resistant salmonella, cytotoxicity, and acute biochemical effects in mice of *Annona muricata* leaf extracts. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, *2022*, 1-7. https://doi.org/10.1155/2022/3144684

Ojo, O. A., Grant, S., Amanze, J. C., Oni, A. I., Ojo, A. B., Elebiyo, T. C., Obafemi, T. O., Ayokunle, D. I., & Ogunlakin, A. D. (2022). *Annona muricata* L. peel extract inhibits carbohydrate metabolizing enzymes and reduces pancreatic β-cells, inflammation, and apoptosis via upregulation of PI3K/AKT genes. *PLoS ONE*, *17*(10), e0276984. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276984

Osei, P. A., Kpodo, F. M., Tettey, C. O., Dzah, C. S., Agbenorhevi, J. K., Hunkpe, G., & Nanga, S. (2023). Proximate composition, phenolic, and antioxidant properties of soursop fruit parts. *CyTA - Journal of Food*, *21*(1), 475-480. https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2227250

Ou, S., Kwok, K., Li, Y., & Fu, L. (2001). *In vitro* study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *49*(2), 1026-1029. https://doi.org/10.1021/jf000574n

Owolabi, I. O., Dat-Arun, P., Yupanqui, C. T., & Wichienchot, S. (2020). Gut microbiota metabolism of functional carbohydrates and phenolic compounds from soaked and germinated purple rice. *Journal of Functional Foods*, *66*, 103787. https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103787

Ozdal, T., Sela, D. A., Xiao, J., Boyacioglu, D., Chen, F., & Capanoglu, E. (2016). The reciprocal interactions between polyphenols and gut microbiota and effects on bioaccessibility. *Nutrients*, *8*(2), 78. https://doi.org/10.3390/nu8020078

Ozyurt, V. y. H., & Ötles, S. (2016). Effect of food processing on the physicochemical properties of dietary fibre. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, *15*(3), 233-245. https://doi.org/10.17306/j.afs.2016.3.23

Padayachee, A., Netzel, G., Netzel, M., Day, L., Zabaras, D., Mikkelsen, D., & Gidley, M. (2012). Binding of polyphenols to plant cell wall analogues – Part 2: Phenolic acids. *Food Chemistry*, *135*(4), 2287-2292. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.004

Palma-González, V. (2023). *Efecto del tamaño de partícula de la cáscara de aguacate (Persea americana Mill var. Hass) sobre las propiedades funcionales y digestión in vitro de antioxidantes.* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/4437

Pathania, S., & Kaur, N. (2021). Utilization of fruits and vegetable by-products for isolation of dietary fibres and its potential application as functional ingredients. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *27*, 100295. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2021.100295

Patil, H. V., Dhankani, M. A., & Dhankani, A. R. (2023). A review on marvel fruit: *Annona muricata*. *Medical Sciences Forum*, *21*(1), 26. https://doi.org/10.3390/ecb2023-14355

Peredo-Lovillo, A., Romero-Luna, H., & Jiménez-Fernández, M. (2020). Health promoting microbial metabolites produced by gut microbiota after prebiotics metabolism. *Food Research International*, *136*, 109473. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109473

Pinto, D., López-Yerena, A., Lamuela-Raventós, R., Vallverdú-Queralt, A., Delerue-Matos, C., & Rodrigues, F. (2023a). Predicting the effects of in-vitro digestion in the bioactivity and bioaccessibility of antioxidant compounds extracted from chestnut shells by supercritical fluid extraction – a metabolomic approach. *Food Chemistry*, *435*, 137581. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137581

Pinto, D., Silva, A. M., Dall'Acqua, S., Sut, S., Vallverdú-Queralt, A., Delerue-Matos, C., & Rodrigues, F. (2023b). Simulated gastrointestinal digestion of chestnut (*Castanea sativa Mill.*) shell extract prepared by subcritical water extraction: bioaccessibility, bioactivity and intestinal permeability by *in vitro* Assays. *Antioxidants*, *12*(7), 1414. https://doi.org/10.3390/antiox12071414

Pramana, Y. S., Pudjianto, K., Supriyanti, A., Elisa, S., Paramitasari, D., Kusarpoko, M. B., Yunira, E. N., Sabirin, S., Tjahjono, A. E., Meidiawati, D. P., Putra, O. N., & Handayani, N. A. (2024). Functional properties and optimization of dietary fiber concentrate from sago hampas using response surface methodology. *Journal of*

Agriculture and Food Research, *15*, 100963. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100963

Prosky, L., Asp, N., Furda, I., Devries, J. W., Schweizer, T. F., & Harland, B. F. (1984). Determination of total dietary fiber in foods, food products and total diets: interlaboratory study. *Journal of Association of Official Analytical Chemists*, *67*(6), 1044-1052. https://doi.org/10.1093/jaoac/67.6.1044

Qi, Y., Xie, L., Deng, Z., Zhang, B., & Li, H. (2023). Stability and antioxidant activity of 10 isoflavones and anthocyanidins during *in vitro* digestion. *Food Bioscience*, *56*, 103189. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103189

Quílez, A., Fernández-Arche, M., García-Giménez, M., & De la Puerta, R. (2018). Potential therapeutic applications of the genus Annona : local and traditional uses and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*, *225*, 244-270. https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.06.014

Rady, I., Bloch, M. B., Chamcheu, R. N., Mbeumi, S. B., Anwar, M. R., Mohamed, H., Babatunde, A. S., Kuiate, J., Noubissi, F. K., Sayed, K. A. E., Whitfield, G. K., & Chamcheu, J. C. (2018). Anticancer properties of graviola (*Annona muricata*): a comprehensive mechanistic review. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2018*, 1-39. https://doi.org/10.1155/2018/1826170

Raghavendra, S., Swamy, S. R., Rastogi, N., Raghavarao, K., Kumar, S., & Tharanathan, R. (2005). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, *72*(3), 281-286. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.008

Ramírez-Moreno, E., Zafra-Rojas, Q. Y., Arias-Rico, J., Ariza-Ortega, J. A., Alanís-García, E., & Cruz-Cansino, N. (2017). Effect of ultrasound on microbiological load and antioxidant properties of blackberry juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *42*(2), e13489. https://doi.org/10.1111/jfpp.13489

Ramos, L. P. A., Justino, A. B., Tavernelli, N., Saraiva, A. L., Franco, R. R., De Souza, A. V., Silva, H. C. G., De Moura, F. B. R., Botelho, F. V., & Espindola, F. S. (2021). Antioxidant compounds from *Annona crassiflora* fruit peel reduce lipid levels and oxidative damage and maintain the glutathione defense in hepatic

tissue of Triton WR-1339-induced hyperlipidemic mice. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *142*, 112049. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112049

Rather, J. A., Akhter, N., Ayaz, Q., Mir, S. A., Singh, A., Goksen, G., Majid, D., Makroo, H. A., & Dar, B. N. (2023). Fruit peel valorization, phytochemical profile, biological activity, and applications in food and packaging industries: comprehensive review. *Current Food Science and Technology Reports*, *1*(2), 63-79. https://doi.org/10.1007/s43555-023-00007-3

Resende, L. M., & Franca, A. S. (2019). Chapter 30 - Flours based on exotic fruits and their processing residues - features and potential applications to health and disease prevention. In Preedy, V. & Watson, R. (Eds) Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention (387-401) Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814639-2.00030-7

Saavedra, A., Almendariz, D., Navarrete, D., & Vernaza, M. G. (2021). A new bread formulation based on a partial substitution of soursop residues flour through Mixolab and a process mixture design. *Food Science and Technology*, *42, 1-6*. https://doi.org/10.1590/fst.63420

Sahu, R., Mandal, S., Das, P., Ashraf, G. J., Dua, T. K., Paul, P., Nandi, G., & Khanra, R. (2023). The bioavailability, health advantages, extraction method, and distribution of free and bound phenolics of rice, wheat, and maize: a review. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100484. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100484

Sandberg, A. (2005). Methods and options for *in vitro* dialyzability; benefits and limitations. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, *75*(6), 395-404. https://doi.org/10.1024/0300-9831.75.6.395

Sanders, M. E., Merenstein, D. J., Reid, G., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2019). Probiotics and prebiotics in intestinal health and disease: from biology to the clinic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, *16*(10), 605-616. https://doi.org/10.1038/s41575-019-0173-3

Sangwan, K., Garhwal, R., Sorout, S., Mehra, R., Bhardwaj, A., Pal, Y., Nayan, V., & Kumar, H. (2024). Physico-chemical, functional, thermal, dielectric and surface characteristics of freeze-dried watermelon rind powder. *Annals of Agri-Bio*

Research, *29*(1), 136-145. https://agribiop.com/wp-content/uploads/2018/12/136-145.pdf

Sani, I. K., Masoudpour-Behabadi, M., Sani, M. A., Motalebinejad, H., Juma, A. S., Asdagh, A., Eghbaljoo, H., Khodaei, S. M., Rhim, J., & Mohammadi, F. (2022). Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. *Food Chemistry*, *405*, 134964. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134964

Sansenya, S., & Payaka, A. (2022). Inhibitory potential of phenolic compounds of Thai colored rice (*Oryza sativa* L.) against α-glucosidase and α-amylase through *in vitro* and in silico studies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *102*(14), 6718-6726. https://doi.org/10.1002/jsfa.12039

Santos, I. L., Da Cruz Rodrigues, A. M., Amante, E. R., & Da Silva, L. H. M. (2023). Soursop (*Annona muricata*) Properties and perspectives for integral valorization. *Foods*, *12*(7), 1448. https://doi.org/10.3390/foods12071448

Saparbekova, A., Kantureyeva, G., Kudasova, D., Konarbayeva, Z., & Latif, A. (2022). Potential of phenolic compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) by-product with significant antioxidant and therapeutic effects: a narrative review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *30*(2), 103553. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103553

Sarkar, A., Haque, M. A., & Alam, M. (2024). Unlocking the potential of pomegranate peels as a valuable source of bioactive compounds through effective drying strategies. *Food Chemistry Advances*, 100622. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100622

Saura-Calixto, F., Pérez-Jiménez, J., Touriño, S., Serrano, J., Fuguet, E., Torres, J. L., & Goñi, I. (2010). Proanthocyanidin metabolites associated with dietary fibre from *in vitro* colonic fermentation and proanthocyanidin metabolites in human plasma. *Molecular Nutrition & Food Research*, *54*(7), 939-946. https://doi.org/10.1002/mnfr.200900276

Saura-Calixto, F., Serrano, J., & Goñi, I. (2006). Intake and bioaccessibility of total polyphenols in a whole diet. *Food Chemistry*, *101*(2), 492-501. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.006

Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., & Klirs, C. (2019). Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. *Final report*. https://agritrop.cirad.fr/593176/1/WRR_Food_Full_Report_0.pdf

Serna-Cock, L., Torres-León, C., & Ayala-Aponte, A. (2015). Evaluación de polvos alimentarios obtenidos de cáscaras de mango (*Mangifera indica*) como fuente de ingredientes funcionales. *Información Tecnológica*, *26*(2), 41-50. https://doi.org/10.4067/s0718-07642015000200006

Shi, L., Zhao, W., Yang, Z., Subbiah, V., & Suleria, H. A. R. (2022). Extraction and characterization of phenolic compounds and their potential antioxidant activities. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81112-81129. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23337-6

Shojaeiarani, J., Bajwa, D., & Holt, G. (2020). Sonication amplitude and processing time influence the cellulose nanocrystals morphology and dispersion. *Nanocomposites*, *6*(1), 41-46. https://doi.org/10.1080/20550324.2019.1710974

SIAP. (2022). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Transportes Barreda. Recuperado 1 de diciembre de 2023, de https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

Siddiqui, H., Sultan, Z., Yousuf, O., Malik, M., & Younis, K. (2023). A review of the health benefits, functional properties, and ultrasound-assisted dietary fiber extraction. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *30*, 100356. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2023.100356

Šimat, V., Čagalj, M., Mekinić, I. G., Možina, S. S., Malin, V., Tabanelli, G., Özogul, F., & Skroza, D. (2024). Antioxidant and antimicrobial activity of extracts from selected mediterranean agro-food by-products, their mutual interaction and interaction with phenolic compounds. *Food Bioscience*, *61*, 104599. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104599

Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P., Bouloumpasi, E., & Biliaderis, C. G. (2022). Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry: potential uses in food applications. *Food Chemistry Advances*, *1*, 100065. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100065

Sogi, D. S., Siddiq, M., Greiby, I., & Dolan, K. D. (2013). Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of '*Tommy Atkins*' mango peel and kernel as affected by drying methods. *Food Chemistry*, *141*(3), 2649-2655. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.053

Speroni, C. S., Guerra, D. R., Bender, A. B. B., Stiebe, J., Ballus, C. A., Da Silva, L. P., Lozano-Sánchez, J., & Emanuelli, T. (2020). Micronization increases the bioaccessibility of polyphenols from granulometrically separated olive pomace fractions. *Food Chemistry*, *344*, 128689. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128689

Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R., & Felker, P. (2004). Color, betalain pattern and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia spp*.) Clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(2), 442-451. https://doi.org/10.1021/jf048751y

Strijk, J., Hinsinger, D. D., Roeder, M., Chatrou, L., Couvreur, T., Erkens, R., Sauquet, H., Pirie, M., Thomas, D., & Cao, K. (2021). Chromosome-level reference genome of the soursop (*Annona muricata*): a new resource for *Magnoliid* research and tropical pomology. *Molecular Ecology Resources*, *21*(5), 1608-1619. https://doi.org/10.1111/1755-0998.13353

Su, D., Li, N., Chen, M., Yuan, Y., He, S., Wang, Y., Wu, Q., Li, L., Yang, H., & Zeng, Q. (2018). Effects of *in vitro* digestion on the composition of flavonoids and antioxidant activities of the lotus leaf at different growth stages. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(7), 1631-1639. https://doi.org/10.1111/ijfs.13746

Sun, Y., Tang, Z., Hao, T., Qiu, Z., & Zhang, B. (2022). Simulated digestion and fermentation *in vitro* by obese human gut microbiota of sulforaphane from broccoli seeds. *Foods*, *11*(24), 4016. https://doi.org/10.3390/foods11244016

Tariq, A., Sahar, A., Usman, M., Sameen, A., Azhar, M., Tahir, R., Younas, R., & Khan, M. I. (2023). Extraction of dietary fiber and polyphenols from mango peel and its therapeutic potential to improve gut health. *Food Bioscience*, *53*, 102669. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102669

Thakur, N., Raigond, P., Singh, Y., Mishra, T., Singh, B., Lal, M. K., & Dutt, S. (2020). Recent updates on bioaccessibility of phytonutrients. *Trends in Food Science & Technology*, *97*, 366-380. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.019

Tian, B., Pan, Y., Wang, J., Cai, M., Ye, B., Yang, K., & Sun, P. (2022). Insoluble dietary fibers from by-products of edible fungi industry: basic structure, physicochemical properties and their effects on energy intake. *Frontiers in Nutrition*, *9*. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.851228

Trinidad, T. P., Wolever, T. M., & Thompson, L. U. (1996). Availability of calcium for absorption in the small intestine and colon from diets containing available and unavailable carbohydrates: an *in vitro* assessment. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *47*(1), 83-88. https://doi.org/10.3109/09637489609028565

Vasiluk, L., Sowa, J., Sanborn, P., Dutton, M. D., & Hale, B. (2023). The effect of particle size on oral bioavailability and bioaccessibility of soil Ni from different sources. *Environmental Pollution*, *339*, 122761. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122761

Vathsala, V., Singh, S. P., Bishnoi, M., Varghese, E., Saurabh, V., Khandelwal, A., & Kaur, C. (2024). Ultrasound-assisted extraction (UAE) and characterization of citrus peel pectin: Comparison between pummelo (*Citrus grandis L. Osbeck*) and sweet lime (Citrus limetta Risso). *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *37*, 101357. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101357

Veintimilla-Gozalbo, E., Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2021). *In vitro* simulation of human colonic fermentation: a practical approach towards models' design and analytical tools. *Applied Sciences*, *11*(17), 8135. https://doi.org/10.3390/app11178135

Vidal, J. D., Beres, C., Brito, F. O., Zago, L., & Miyahira, R. F. (2024). Unlocking the functional potential of sprouts: a scientific exploration on simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Journal of Functional Foods*, *117*, 106235. https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106235

Vilas-Franquesa, A., Fryganas, C., Casertano, M., Montemurro, M., & Fogliano, V. (2024). Upcycling mango peels into a functional ingredient by combining

fermentation and enzymatic-assisted extraction. *Food Chemistry*, *434*, 137515. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137515

Villacís-Chiriboga, J., Zaldumbide, E., Raes, K., Elst, K., Van Camp, J., & Ruales, J. (2023). Comparative assessment of physicochemical, structural and functional properties of dietary fiber extracted from mango (*Mangifera indica L.*) and soursop (*Annona muricata*) peels. *International Journal of Biological Macromolecules*, *238*, 124116. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124116

Villarreal-Fuentes, J. M., Alia-Tejacal, I., Hernández-Salvador, M. A., Hernández-Ortiz, E., Marroquín-Agreda, F. J., Núñez-Colín, C. A., & Campos-Rojas, E. (2020). In situ characterization of soursop (*Annona muricata* L.) in the Soconusco region, Chiapas, Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *26*(3). https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.008

Wang, L., Liu, F., Wang, A., Yu, Z., Xu, Y., & Yang, Y. (2016). Purification, characterization and bioactivity determination of a novel polysaccharide from pumpkin (*Cucurbita moschata*) seeds. *Food Hydrocolloids*, *66*, 357-364. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.003

Wang, M., Wichienchot, S., He, X., Fu, X., Huang, Q., & Zhang, B. (2019). *In vitro* colonic fermentation of dietary fibers: Fermentation rate, short-chain fatty acid production and changes in microbiota. *Trends in Food Science & Technology*, *88*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.005

Wang, S., Fang, Y., Xu, Y., Zhu, B., Piao, J., Zhu, L., Yao, L., Liu, K., Wang, S., Zhang, Q., Qin, L., & Wu, J. (2022). The effects of different extraction methods on physicochemical, functional and physiological properties of soluble and insoluble dietary fiber from *Rubus Chingii Hu* fruits. *Journal of Functional Foods*, *93*, 105081. https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105081

Wang, Z., Zhong, T., Mei, X., Chen, X., Chen, G., Rao, S., Zheng, X., & Yang, Z. (2023). Comparison of different drying technologies for brocade orange (*Citrus sinensis*) peels: changes in color, phytochemical profile, volatile, and biological availability and activity of bioactive compounds. *Food Chemistry*, *425*, 136539. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136539

Weng, D., Zha, S., Zhu, Y., Li, H., Hou, S., Zhao, Q., & Zhao, B. (2022). Effect of particle size on the physicochemical and antioxidant properties of *Forsythia suspensa (Thunb.)Vahl* leaf powders. *Powder Technology*, *410*, 117866. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117866

Wu, H., Liu, Z., Lu, P., Barrow, C., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. (2022). Bioaccessibility and bioactivities of phenolic compounds from roasted coffee beans during *in vitro* digestion and colonic fermentation. *Food Chemistry*, *386*, 132794. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132794

Wu, P., & Chen, X. D. (2021). Validation of *in vitro* bioaccessibility assays — a key aspect in the rational design of functional foods towards tailored bioavailability. *Current Opinion in Food Science*, *39*, 160-170. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.03.002

Wu, X., Wu, Y., He, L., Wu, L., Wang, X., & Liu, Z. (2018). Effects of the intestinal microbial metabolite butyrate on the development of colorectal cancer. *Journal of Cancer*, *9*(14), 2510-2517. https://doi.org/10.7150/jca.25324

Wu, Y., Liu, Y., Jia, Y., Feng, C., Zhang, H., Ren, F., & Zhao, G. (2024). Effects of thermal processing on natural antioxidants in fruits and vegetables. *Food Research International*, *192*, 114797. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114797

Xie, F., Zhang, W., Lan, X., Gong, S., Wu, J., & Wang, Z. (2017). Physicochemical properties and structural characteristics of soluble dietary fibers from yellow and purple fleshed potatoes by-product. *International Journal of Food Properties*, *20*(sup3), S2939-S2949. https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1387557

Xie, Z., He, W., Gobbi, A., Bertram, H. C., & Nielsen, D. S. (2024). The effect of *in vitro* simulated colonic pH gradients on microbial activity and metabolite production using common prebiotics as substrates. *BMC Microbiology*, *24*(1). https://doi.org/10.1186/s12866-024-03235-2

Yan, J., Li, Y., Bai, S., Zheng, J., Hassan, N. A., Lu, B., & Hu, A. (2024). Comparison of structural, physicochemical and functional properties of dried coconut dietary fiber by steam explosion and extrusion modification. *Industrial Crops and Products*, *218*, 118916. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118916

Yang, B., Li, K., Niu, M., Wei, J., Zhao, S., Jia, C., & Xu, Y. (2024). Structural characteristics of wheat bran insoluble dietary fiber with various particle size distributions and their influences on the kinetics of gastrointestinal emptying in mice. *International Journal of Biological Macromolecules*, *272*, 132905. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132905

Yao, H., Flanagan, B. M., Williams, B. A., Mikkelsen, D., & Gidley, M. J. (2022). Particle size of dietary fibre has diverse effects on *in vitro* gut fermentation rate and end-products depending on food source. *Food Hydrocolloids*, *134*, 108096. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108096

Yin, Z., Wang, Z., He, Z., Zeng, M., Qin, F., & Chen, J. (2021). Effect of particle size and microstructure on the physical properties of soybean insoluble dietary fiber in aqueous solution. *Food Bioscience*, *41*, 100898. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100898

Yuan, Y., Fan, Q., Xu, X., Wang, O., Zhao, L., & Zhao, L. (2023). Nanocarriers based on polysaccharides for improving the stability and bioavailability of anthocyanins: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *6*, 100346. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100346

Zahid, H. F., Ali, A., Ranadheera, C. S., Fang, Z., Dunshea, F. R., & Ajlouni, S. (2022). *In vitro* bioaccessibility of phenolic compounds and alpha-glucosidase inhibition activity in yoghurts enriched with mango peel powder. *Food Bioscience*, *50*, 102011. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102011

Zaini, H. M., Roslan, J., Saallah, S., Munsu, E., Sulaiman, N. S., & Pindi, W. (2022). Banana peels as a bioactive ingredient and its potential application in the food industry. *Journal of Functional Foods*, *92*, 105054. https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105054

Zemljič, L. F., Glaser, T. K., Plohl, O., Anžel, I., Šimat, V., Čagalj, M., Mežnar, E., Malin, V., Sterniša, M., & Možina, S. S. (2022). Biomass-derived plant extracts in macromolecular chitosan matrices as a green coating for PLA films. *Journal of Functional Biomaterials*, *13*(4), 228. https://doi.org/10.3390/jfb13040228

Zhang, B., Zhang, Y., Li, H., Deng, Z., & Tsao, R. (2020). A review on insoluble-bound phenolics in plant-based food matrix and their contribution to human health with

future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, *105*, 347-362. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.029

Zhang, L., Wu, T., Zhang, Y., Chen, Y., Ge, X., Sui, W., Zhu, Q., Geng, J., & Zhang, M. (2022). Release of bound polyphenols from wheat bran soluble dietary fiber during simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation *in vitro*. *Food Chemistry*, *402*, 134111. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134111

Zhang, M., Liu, Y., Liu, J., Zheng, T., Li, Y., He, S., Jiang, M., Wu, L., & Wang, S. (2024). Extraction methods of dietary fiber and effect on bioactivity: a review. *Process Biochemistry*. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.09.017

Zhang, X., Zhang, M., Dong, L., Jia, X., Liu, L., Ma, Y., Huang, F., & Zhang, R. (2019). Phytochemical profile, bioactivity and prebiotic potential of bound phenolics released from rice bran dietary fiber during *in vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(46), 12796-12805. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06477

Zhao, G., Zhang, R., Dong, L., Huang, F., Tang, X., Wei, Z., & Zhang, M. (2018). Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties. *Food Science and Technology*, *87*, 450-456. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.016

Zheng, H., Sun, Y., Zheng, T., Zeng, Y., Fu, L., Zhou, T., Jia, F., Xu, Y., He, K., & Yang, Y. (2023). Effects of shear emulsifying/ball milling/autoclave modification on structure, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of lotus (*Nelumbo*) leaves dietary fiber. *Frontiers in Nutrition*, *10*. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1064662

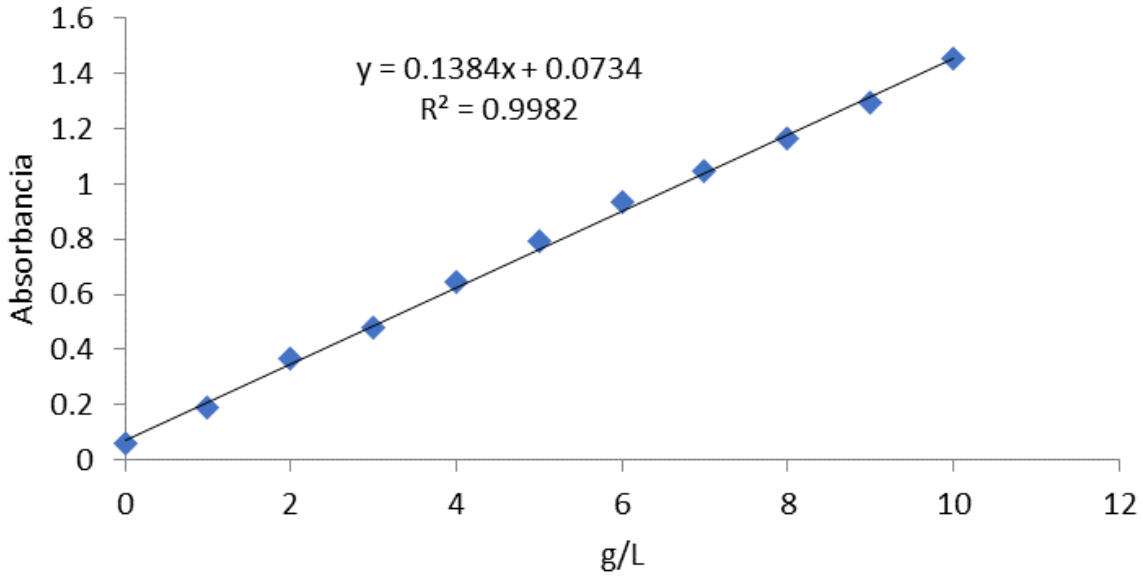
Zheng, Y., Zhang, S., Wang, Q., Lu, X., Lin, L., Tian, Y., Xiao, J., & Zheng, B. (2016). Characterization and hypoglycemic activity of β-pyran polysaccharides from bamboo shoot (*Leleba oldhami Nakal*) shells. *Carbohydrate Polymers*, *144*, 438-446. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.02.073

Zou, X., Xu, X., Chao, Z., Jiang, X., Zheng, L., & Jiang, B. (2022). Properties of plant-derived soluble dietary fibers for fiber-enriched foods: a comparative evaluation. *International Journal o Biological Macromolecules*, *223*, 1196-1207. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.008

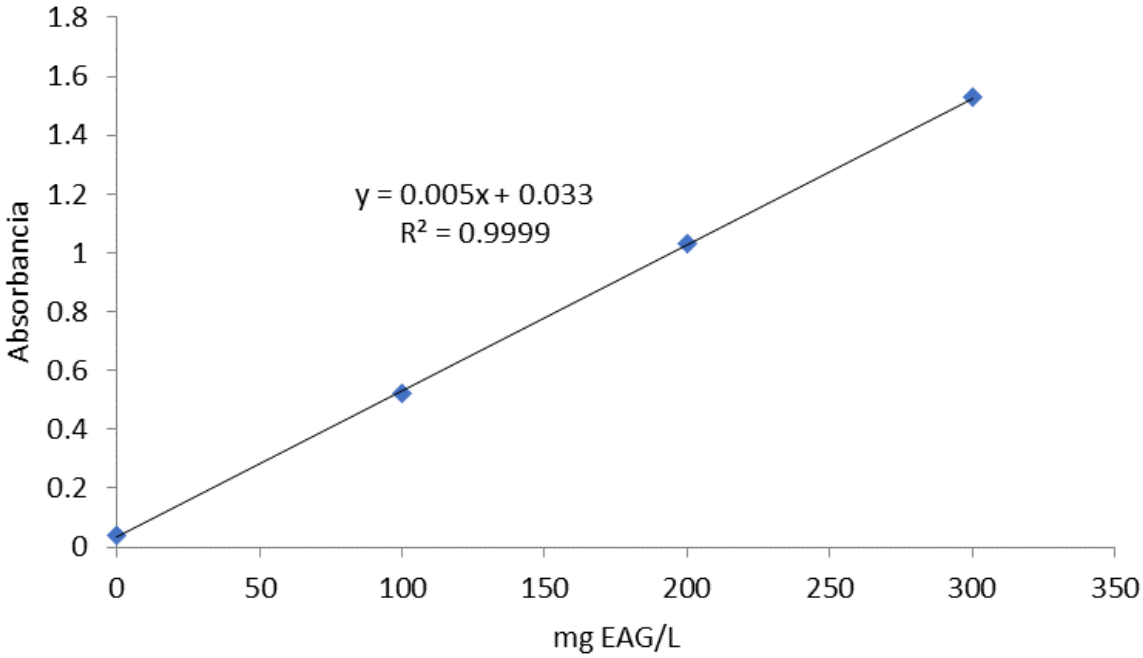
Zubaidi, S. N., Nani, H. M., Kamal, M. S. A., Qayyum, T. A., Maarof, S., Afzan, A., Misnan, N. M., Hamezah, H. S., Baharum, S. N., & Mediani, A. (2023). *Annona muricata*: comprehensive review on the ethnomedicinal, phytochemistry and pharmacological aspects focusing on antidiabetic properties. *Life*, *13*(2), 353. https://doi.org/10.3390/life13020353

Anexos

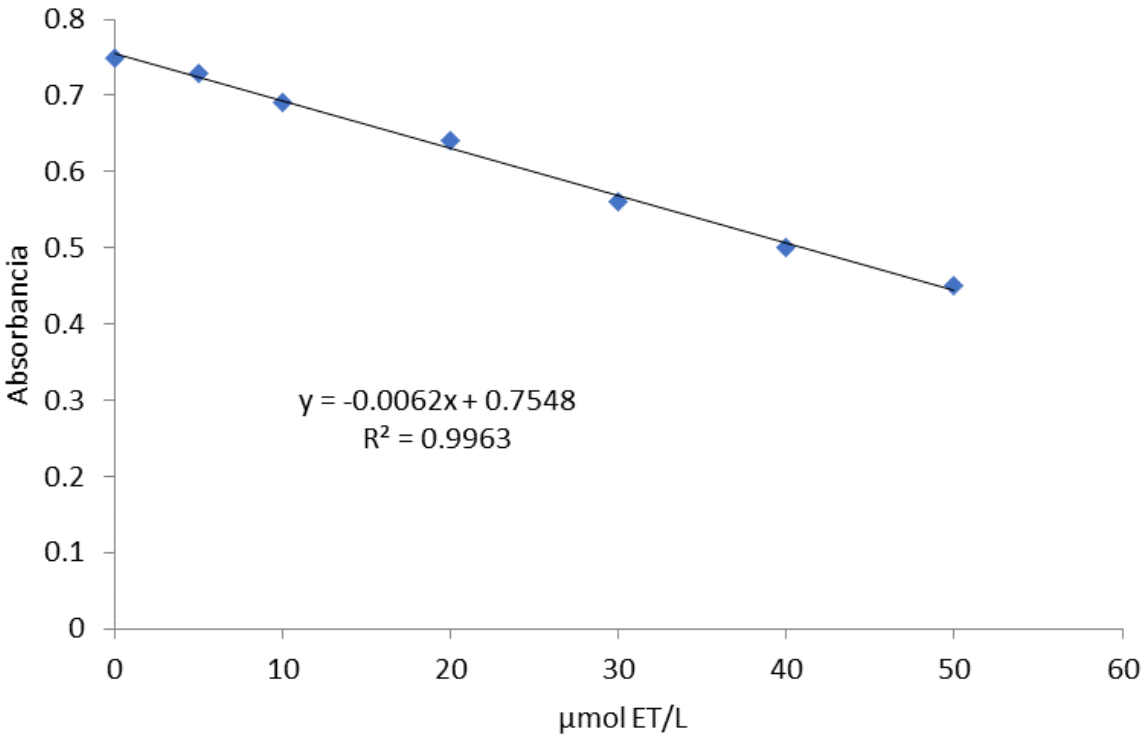
Anexo 1. Curva de calibración de glucosa para capacidad de retención de glucosa.



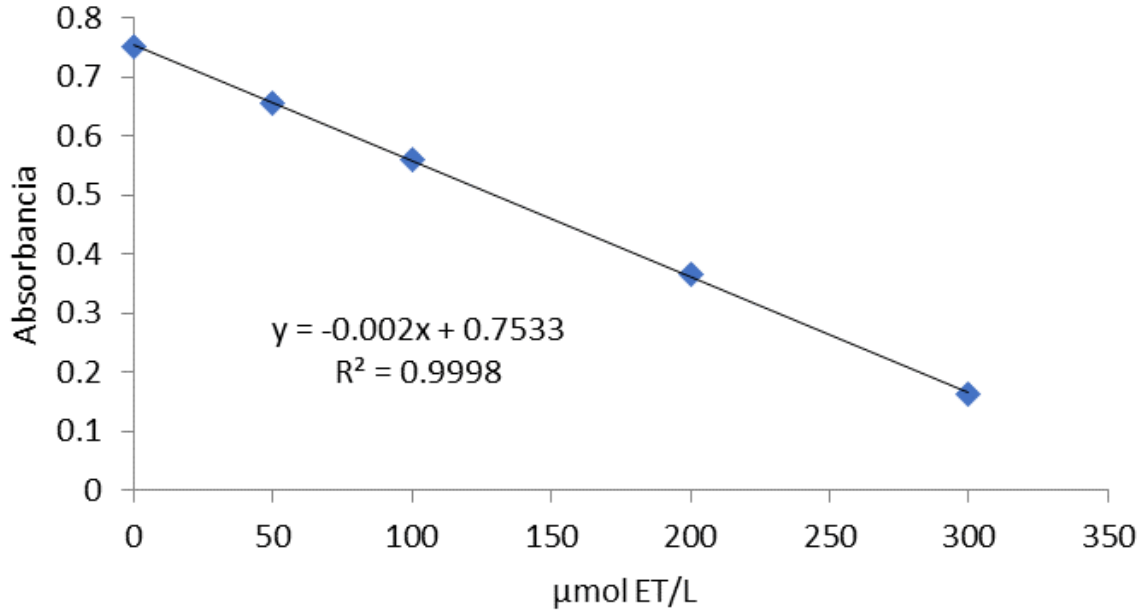
Anexo 2. Curva de calibración de ácido gálico para los compuestos fenólicos totales.



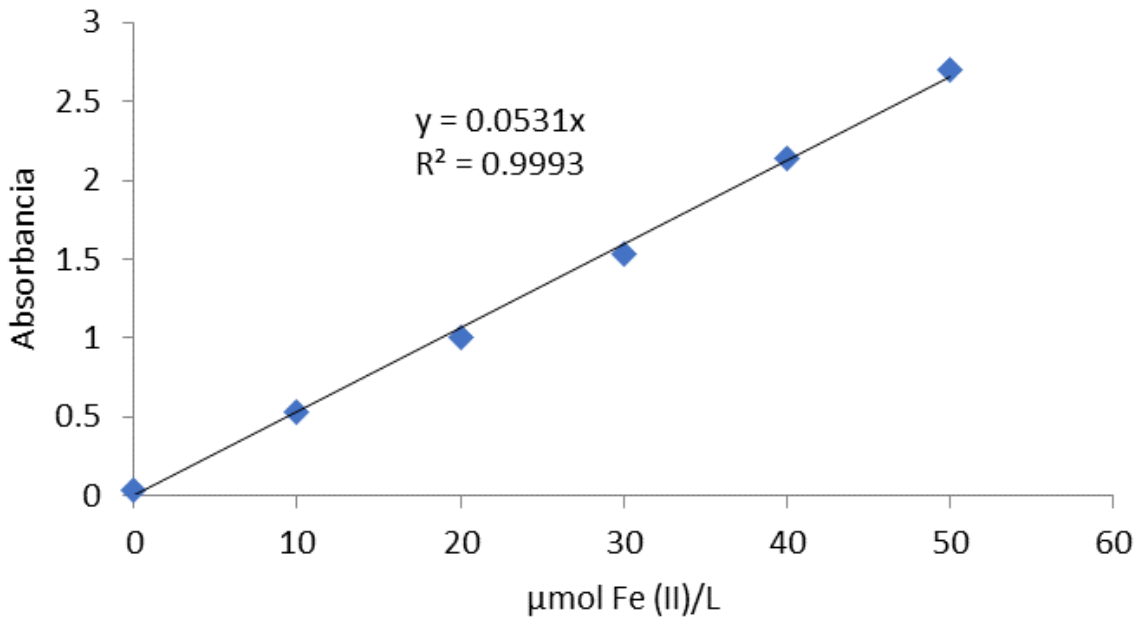
Anexo 3. Curva de calibración de Trolox para la capacidad antioxidante por ABTS.



Anexo 4. Curva de calibración de Trolox para la capacidad antioxidante por DPPH.



Anexo 5. Curva de calibración de sulfato ferroso para la capacidad antioxidante por FRAP.


y = 0.0531x
R² = 0.9993
Absorbancia
µmol Fe (II)/L
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
0
10
20
30
40
50
60

Anexo 6. Preparación de soluciones para el medio anaerobio (Fermentación colónica *in vitro*)

Medio anaerobio (por 1 L de agua desionizada)
2.5 g de tripticaseína
125 µL de solución micromineral
250 mL de solución buffer
250 mL de solución macromineral

● Solución micromineral (por 5 mL de agua desionizada)
660 mg de cloruro de calcio dihidratado
500 mg de cloruro de manganeso tetrahidratado
50 mg de cloruro de cobalto hexahidratado
400 mg de de cloruro férrico hexahidratado

● Solución macromineral (por 250 mL de agua desionizada)
1.42 g de fosfato de sodio dibásico
1.55 g de fosfato de sodio monobásico
0.15 g de sulfato de magnesio heptahidratado

● Solución buffer (por 250 mL agua desionizada)
1.0 g de bicarbonato de amonio
8.75 g de bicarbonato de sodio

● Solución reductora (por 33.5 mL de agua desionizada)
0.20 g de clorhidrato de cisteína
0.20 g sulfuro de sodio nonahidratado
1.34 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M

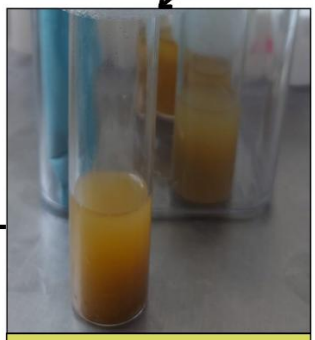
Anexo 7. Diagrama sobre metodología de fermentación colónica *in vitro*

Día

2

Comienza la hora 0

Preparación de la solución del inóculo al 10% (en medio estéril)

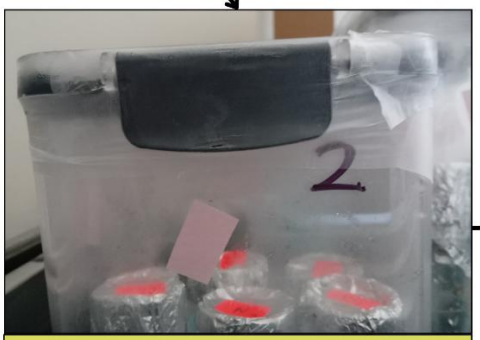


Adición del inóculo a las muestras

En este momento, se toma una alícuota para BAL y pH

Colocación de las muestras en un contenedor hermético

Muestras con inóculo en condiciones de anaerobiosis

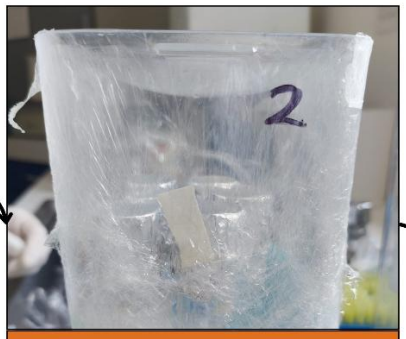


Incubación en baño con agitación por 24 h a 37°C

Día

3

Termina la hora 24



Cambio de color de la resazurina (de rosa a blanco)

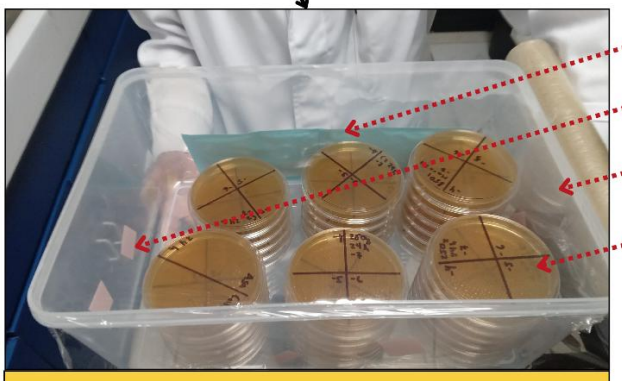
Se vuelve a tomar una alícuota para BAL y pH

Se detiene la fermentación colónica con 2 mL de NaOH 1 M

Durante los días

2 y 3

Siembra de BAL



- 2 Sobres Gaspak
- 2 tiras de indicador anaerobio
- Capas de plástico adherente
- Cajas petri marcadas

siembra de bacterias ácido lácticas en anaerobiosis a 37°C por 48 h

Datos extras

Anexo 8. Consentimiento Informado

CARTA CONSENTIMIENTO INFORMADO

Fecha: __ de _____ 2024

Carta de consentimiento informado para participar en el proyecto:

"Funcionalidad, bioaccesibilidad y fermentación colónica *in vitro* de la cáscara de guanábana *(Annona muricata* L.) a diferentes tamaños de partícula"

Responsable: Dra. Quinatzin Yadira Zafra Rojas

Estimado (a) participante:

Objetivos: Esta investigación tiene como objetivo analizar el efecto de diferentes tamaños de partícula (250, 500, 850 y >850 µm) de la cáscara de guanábana (*Annona muricata* L.) en sus propiedades funcionales de fibra y absorción *in vitro* de compuestos antioxidantes para determinar su aprovechamiento como alimento funcional con beneficios para la salud.

Procedimientos: Si usted acepta participar, ocurrirá lo siguiente:

Proporcionará una muestra de heces (durante aproximadamente 1 vez cada semana por un mes), el cuál será utilizado como inóculo para la prueba de fermentación colónica *in vitro* de la cáscara de guanábana.

Confidencialidad: Toda la información que usted nos proporcione para el estudio será de carácter estrictamente confidencial y anónimo, será utilizada únicamente por el equipo de investigación del proyecto y no estará disponible para ningún otro propósito. Usted quedará identificado(a) con un número y no con su nombre. Los resultados de este estudio serán publicados con fines científicos, pero se presentarán de tal manera que no podrá ser identificado(a).

Aclaraciones: Es importante aclarar que si usted consume algún complemento o suplemento de fibra dietética ajeno al proyecto es posible presentar alguno de los efectos secundarios como: meteorismo, distensión, vaciamiento gástrico acelerado.
Se le informa que los gastos relacionados con esta investigación originados al momento en que, voluntariamente, acepte participar en la misma, serán cubiertos en su totalidad por el presupuesto del proyecto.

Riesgos potenciales/compensación: El riesgo de formar parte de esta investigación es mínimo. No presentará ninguna molestia, debido a que el procedimiento no es invasivo al solo ser necesario la donación de materia fecal, para lo cuál se le proporcionará un vaso clínico estéril.

Participación voluntaria/Retiro: La participación en este estudio es absolutamente voluntaria. Usted está en plena libertad de negarse a participar o de retirar su participación del mismo en cualquier momento. Su decisión de participar o de no participar no afectará de ninguna manera.

Esta carta de consentimiento informado está validada por el Diario Oficial de la Federación.

Números a contactar: Si usted tiene alguna pregunta, comentario o preocupación con respecto al proyecto, por favor comuníquese con el/la investigador/a responsable del proyecto: Dra. Quinatzin Yadira Zafra Rojas, en un horario de 9:00 am a 14:00 h. Si usted tiene preguntas generales relacionadas con sus derechos como participante de un estudio de investigación, puede comunicarse con la presidente del Comité de Ética del Instituto de Ciencias de la Salud de la UAEH, al teléfono (71 7 20 00) ext. 4312 de 8:00 am a 16:00 h. O si lo prefiere puede escribirle a la siguiente dirección de correo electrónico investigación_icsa@uaeh.edu.mx.
Si usted acepta participar en el estudio, le entregaremos una copia de este documento que le pedimos sea tan amable de firmar.

Consentimiento para su participación en el estudio
Su firma indica su aceptación para participar voluntariamente en el presente estudio

_____
Nombre completo del participante
Fecha:_____
Día/ Mes / Año

_____
Firma del participante

Nombre completo del Testigo 1:_____
Dirección: _____
Firma:_____
Relación con el participante: _____
Fecha:_____
Día/ Mes / Año

P.L.N. Blanca Nazareth Silis Ambrosio
si421791@uaeh.edu.mx
Tel. 7721412729

Anexo 9. Aprobación por el Comité de Ética e Investigación de la UAEH

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias de la Salud
School of Medical Sciences
Coordinación de Investigación
Area of Research

San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo a **22 de enero de 2024**
Oficio Comiteei.icsa *ICSa «214» / 2024*
Asunto: DICTAMEN DEL COMITÉ DE ÉTICA E INVESTIGACIÓN.

Silis Ambrosio Blanca Nazareth
Investigador Principal
Correo: si421791@uaeh.edu.mx

PRESENTE

Título del Proyecto: Propiedades funcionales, bioaccesibilidad y fermentación colónica in vitro de la cáscara de guanábana (Annona Muricata L.) a diferentes tamaños de partícula.

Le informamos que su proyecto de referencia ha sido evaluado por el Comité de Ética e Investigación del Instituto de Ciencias de la Salud y las opiniones acerca de los documentos presentados se encuentran a continuación:

Decisión
«Aprobado»

Este protocolo tiene vigencia del **22 de enero de 2024** al **22 de enero de 2025**.

En caso de requerir una ampliación, le rogamos tenga en cuenta que deberá enviar al Comité un reporte de progreso de avance de su proyecto al menos 60 días antes de la fecha de término de su vigencia.

Le rogamos atender las indicaciones realizadas por el revisor, y enviar nuevamente una versión corregida de su protocolo para una nueva evaluación.

Atentamente

UAEH
COMITE DE ETICA E INVESTIGACION
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD

Dra. Itzia María Cazares Palacios
Presidenta del Comité

Para la validación de este documento informe el siguiente código en la sección Validador de Documentos del sitio web oficial del Comité: «*{zgy[;9(AU*»
https://sites.google.com/view/comiteei-icsa/validador-de-documentos

Circuito ex-Hacienda La Concepción s/n
Carretera Pachuca Actopan, San Agustín
Tlaxiaca, Hidalgo, México. C.P. 42160
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 4306
investigacion_icsa@uaeh.edu.mx
www.uaeh.edu.mx