



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**Estudio de las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del pan
de banano libre de gluten a partir de harina obtenida por
liofilización y secado en bandejas**

TESIS DE POSTGRADO

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

Presentada por:

Verónica Rafaela Guadalupe Moyano

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2022

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi directora de tesis, la Ing. Fabiola Cornejo Z., Ph.D., a mis profesores y compañeros de maestría, al personal de laboratorios de la facultad, a todas las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, y muy especialmente a mi esposo y a mis hijos por apoyarme y darme la oportunidad de poder continuar mis estudios.

DEDICATORIA

A

Laurita Teresa

y

Edmundo Rafael.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

Ángel Ramírez M., Ph.D.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Fabiola Cornejo Z., Ph.D.
DIRECTOR DE TESIS

Arturo Palacios P., Ph.D.
CO-DIRECTOR DE TESIS

Karín Coello O., MSc.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de postgrado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Verónica Rafaela Guadalupe Moyano

RESUMEN

En la actualidad, aproximadamente el 1% de la población mundial sufre de la enfermedad celíaca (EC), cuyo único tratamiento efectivo es una dieta libre de gluten. Dentro de las harinas libres de gluten investigadas, la harina de banano verde es considerada como un ingrediente funcional y de favorables características tecnológicas para productos de panificación, sin embargo, en la bibliografía sólo existe un desarrollo de pan de harina de banano verde, libre de gluten.

La presente tesis consistió en un estudio comparativo de los efectos de dos tipos de secado de harina de banano, liofilización y secado en bandejas, sobre las características físico químicas y de digestibilidad de pan de harina de banano verde libre de gluten, sin la utilización de otras fuentes de almidón. El objetivo de la tesis es determinar si existen diferencias significativas entre las características de ambos tipos de pan y así definir cuál es la mejor alternativa de secado para la obtención de la harina de banano para la aplicación en pan.

Inicialmente se realizó la elaboración de harina de banano verde (en estado de maduración 1 a 2) por método de liofilización (HBL) y la adquisición de la harina secada en bandejas (HBSB) elaborada por una empresa productora y exportadora de la ciudad de Guayaquil. Luego, se definió la fórmula de pan, la cual incluyó una pregelatinización parcial de la harina de banano, y cuyos ingredientes fueron: harina de banano, agua, sal, azúcar, aceite, yema de huevo, levadura y un sistema mejorador conformado por HPMC y CMC. En cuanto a los análisis realizados en harinas se procedió a la determinación de: contenido de humedad, A_w , color, AT, AD, propiedades de hidratación (CRA, CLA, ISA), propiedades térmicas (T_o , T_p , T_f) y propiedades nutricionales (AR, ALD y ARD). En el producto terminado se realizó la determinación de: características físicas (geometría, VE), composición proximal (contenido de humedad, A_w , grasas, proteínas, cenizas, carbohidratos), perfil de textura (dureza, resiliencia, cohesividad, firmeza, elasticidad, masticabilidad), diámetro de alveolos, color, propiedades de digestibilidad del almidón (AR, ALD, ARD, IGe, IH, C^∞ , k).

Como resultados, el pan HBL obtuvo un mayor VE, mayor diámetro de alveolos y tiene una coloración menos pardeada que el pan HBSB. El perfil de textura mostró que el pan HBL tiene significativamente mayor resiliencia, cohesividad, firmeza y masticabilidad que el pan HBSB. La composición proximal mostró que ambos panes tienen contenidos similares. En cuanto a las propiedades nutricionales, el AR fue significativamente mayor en pan HBL que en pan HBSB, obteniendo $5.04 \pm 0.16\%$ y $3.71 \pm 0.14\%$, respectivamente; el ALD resulta similar en ambos tipos de pan, mientras que el ARD es significativamente superior en el pan HBL con $46.61 \pm 1.30\%$, en comparación al pan HBSB con $42.39 \pm 1.06\%$. Sin embargo, la suma de las dos fracciones nutricionales (AR y ALD) muestran que no hay diferencia significativa entre ambos tipos de pan, lo que demostraría que el método de secado no influye en el contenido de almidones beneficiosos (AR + ALD) en el pan de banano libre de gluten. El IGe resulta significativamente mayor en pan HBL (75.91 ± 0.79) que pan HBSB (69.33 ± 0.77), lo que se explica por su mayor contenido de ARD, sin embargo, ambos tipos de pan contienen valores más bajos que el pan de control (pan de harina de arroz y almidón de yuca) y que otros desarrollos de panes de libres de gluten reportados en la literatura.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	II
ABREVIATURAS	IV
SIMBOLOGÍA	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación de la investigación	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Enfermedades asociadas con la ingesta de gluten	5
2.2. Gluten y su importancia en la panificación	6
2.3. Harinas libres de gluten	6
2.4. Harina de Banano	7
2.5. Desarrollo de panes libre de gluten a partir de harina de banano	10
CAPÍTULO 3	
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Materia prima	12
3.2. Elaboración de harina de banano	12
3.2.1. Harina de banano liofilizada (HBL)	12
3.2.2. Harina de banano secada en bandejas (HBSB)	12
3.3. Análisis en harinas	13
3.3.1. Propiedades de hidratación de harina	13
3.3.2. Propiedades de hidratación del gel	14
3.3.3. Propiedades Térmicas	15
3.4. Elaboración de pan de harina de banano libre de gluten	15
3.5. Propiedades físicas del pan	17
3.5.1. Volumen específico	17
3.5.2. Ancho / Altura	17
3.5.3. Color	17
3.5.4. Perfil de textura	17
3.5.5. Estructura del pan	18
3.6. Análisis bromatológicos del pan	18
3.7. Análisis de Digestibilidad del almidón <i>in vitro</i>	18
3.8. Análisis estadístico	19

CAPÍTULO 4	
4. RESULTADOS	21
4.1. Harina de banano	21
4.2. Calidad de pan de banano libre de gluten	24
CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
5.1. Conclusiones	30
5.2. Recomendaciones	30
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

AD	Almidón dañado
AG	Ataxia por gluten
ALD	Almidón de lenta digestión
ANR	Almidón no resistente
AR	Almidón resistente
ARD	Almidón de rápida digestión
AT	Almidón total
Aw	Actividad de agua
C ∞	Concentración de almidón hidrolizado después de 150 min de hidrólisis
CLA	Capacidad de ligación de agua
CRA	Capacidad de retención de agua
EC	Enfermedad celíaca
HBL	Harina de banano liofilizado
HBSB	Harina de banano secado en bandejas
IGe	Índice glicémico esperado
IH	Índice de hidrólisis
IP	Índice de pardeamiento
ISA	Índice de solubilidad de agua
k	Constante cinética de hidrólisis
pan HBL	Pan elaborado con harina de banano liofilizado
pan HBSB	Pan elaborado con harina de banano secado en bandejas
SGNC	Sensibilidad al gluten no celíaca
Tf	Temperatura final de gelatinización
To	Temperatura inicial de gelatinización
Tp	Temperatura pico de gelatinización
VE	Volumen específico

SIMBOLOGÍA

g	Gramos
J	Joule
min	Minutos
mJ	MiliJoule
mL	Mililitros
mm	Milímetros
°C	Grado Celsius

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1	Diagrama de flujo de elaboración de harina de banano liofilizado 13
Figura 3.2	Diagrama de flujo de elaboración de pan de harina de banano libre de gluten 16
Figura 4.1	Cortes transversales de panes libres de gluten 24
Figura 4.2	Digestibilidad in vitro de almidón en pan de banano libre de gluten, pan HBSB, pan HBL, pan de control..... 28

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Resultados de investigaciones previas de harina de banano obtenida por dos métodos de secado 9
Tabla 2	Desarrollos de pan a partir de harina de banano 10
Tabla 3	Características físico químicas y nutricionales de harina de banano secada por liofilización y secada en bandejas..... 23
Tabla 4	Características físicas y composición proximal de pan de banano libre de gluten y pan de control 25
Tabla 5	Resultados de digestibilidad de almidón en el pan de banano libre de gluten 27

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

La enfermedad celíaca (EC) es una enfermedad intestinal crónica caracterizada por una mala absorción de nutrientes y trastornos gastrointestinales en la mucosa del intestino delgado debido a la intolerancia al gluten (Niewinski, 2008; Rocha Parra et al., 2015; Salehi, 2019; Leonard et al., 2017). La EC tiene una prevalencia a nivel mundial del 0.5 al 1%, y aunque no hay cifras específicas, se sabe que hay un porcentaje mayor que sufre de otras enfermedades relacionadas con el consumo de gluten (Leonard et al., 2017, Gatti et al., 2020). En efecto, otros trastornos relacionados con la ingesta de gluten son la sensibilidad al gluten no celíaca, la ataxia al gluten y la dermatitis herpetiforme (El Khoury et al., 2018). Algunas investigaciones han revelado que el único tratamiento efectivo para controlar los trastornos de salud mencionados es adoptar una dieta libre de gluten (Pieczyńska, 2018; Giuberti & Gallo, 2018; Leonard et al., 2017). En el Ecuador, este sector de la población con necesidades especiales de alimentación se encuentra parcialmente desatendido ya que la variabilidad y cantidad de los productos libres de gluten ofertados en el mercado es baja. En cuanto a la oferta de pan libre de gluten, ésta se limita a reducidos espacios en los supermercados donde los productos ofrecidos se presentan con precios altos que pueden duplicar o triplicar el valor del pan tradicional.

Por otro lado, el contenido nutricional de los panes libres de gluten es una de las limitantes de estos productos. Según Miranda et al. (2014), una dieta basada en productos libres de gluten podría suponer un desequilibrio nutricional para los pacientes celíacos y no celíacos que la consumen. Esta investigación determinó que las harinas libres de gluten y sus correspondientes panes tienen menos proteína que sus semejantes con gluten, y que, en cambio, tienen más carbohidratos totales, lípidos saturados, sodio y sal. Por su parte, Fry et al., (2018), comparó información de etiquetas entre productos alimenticios libres de gluten y productos con contenido de gluten. Ellos demostraron que el pan libre de gluten tiene más del 50% de grasa total que el producto similar con contenido de gluten. En cuanto al contenido de azúcar, los valores declarados en etiqueta de pan libre de gluten fueron más del doble que en panes con gluten. La fibra es el único valor de contenido superior en el pan libre de gluten en comparación con el pan tradicional, especialmente en el pan blanco. Por otra parte, los productos libres de gluten tienen menos contenido de vitaminas y minerales porque este tipo de productos no están fortificados, lo que podría afectar la salud de los consumidores (Do Nascimento et al., 2013). Por lo mencionado, existe una amplia oportunidad de mejora en el aspecto nutricional de panes libres de gluten.

El desarrollo tecnológico de panes libres de gluten constituye un reto para los investigadores debido a que la principal función del gluten en la elaboración del pan es la formación de una red que le otorga propiedades viscoelásticas a la masa (El Khoury et al., 2018). En efecto, el gluten determina características reológicas de las masas como elasticidad y

extensibilidad (Mariotti et al., 2009). Esta red otorga a la masa la resistencia al estiramiento, la tolerancia al mezclado y la retención del gas producido durante la fermentación, y cuyo horneado implica cambios de las proteínas del gluten que contribuyen a la estructura final de la miga (Delcour et al., 2012). En cuanto a propiedades de hidratación, el gluten permite desarrollar propiedades tecnológicas deseadas para algunos productos alimenticios como la hidratación adecuada, la retención de agua y la buena viscosidad, haciendo que el gluten sea un aditivo muy apreciado para la industria alimentaria (Wieser, 2007).

En ausencia del gluten, los panes muestran características pobres de miga y corteza, así como mala sensación en boca y sabor (Arendt et al., 2017). También, se presentan defectos en la producción de alveolos y retención del gas durante la fermentación, produciendo la pérdida de volumen de pan y de suavidad de la miga (Mariotti et al., 2013). En general, los problemas de calidad encontrados en pan libre de gluten son: bajo volumen específico, alta dureza de la miga, corto tiempo de vida útil y desviaciones en el perfil aromático (El Khoury et al., 2018).

Por lo general, las investigaciones relacionadas a la obtención de panes libres de gluten utiliza materias primas como arroz, maíz, legumbres y ciertas frutas, (Aguilar et al., 2015, Mancebo et al., 2015, Chakraborty et al., 2016, Cornejo & Rosell, 2015 a,b, Mariotti et al., 2009, Mariotti et al., 2013, Rocha Parra et al., 2015, Tsatsaragkou et al., 2017), tratando de mejorar las características tecnológicas y nutricionales con ingredientes. Por lo expuesto, es importante considerar nuevas fuentes de materias primas y procesos adecuados para la obtención de panes sin gluten que aporten con características fisicoquímicas y nutricionales que mejoren la calidad del pan.

1.2. Justificación de la investigación

Existe una amplia oportunidad para desarrollar productos libres de gluten, teniendo en consideración que la tasa de crecimiento anual de este mercado es del 8.1% hasta 2025 (Markets and Markets, n.d.). Dentro de los productos libres de gluten más relevantes se encuentra el pan (Do Nascimento et al., 2013), para el cual se ha investigado profusamente técnicas e ingredientes para su mejoramiento debido a las consecuencias tecnológicas y de calidad que la ausencia de gluten implican.

La harina de banano verde (estados de maduración 1 y 2) es una buena alternativa como materia prima en panes libres de gluten debido a que posee una alta capacidad de hidratación y de formación de geles (Sarawong et al., 2014; Hernández-Aguirre et al., 2019 Campuzano et al., 2018). Además, esta harina posee un alto contenido de almidón resistente que permite catalogarla como un ingrediente funcional por su aporte al buen funcionamiento del colon (Zhang & Hamaker, 2012), por sus efectos positivos sobre la microbiota, la saciedad, el peso y el metabolismo de la glucosa y lípidos (Villaroel et al., 2018). El almidón resistente (AR) es una fracción de almidón que resiste la digestión dentro del intestino delgado, llegando intacto al intestino grueso para ser fermentado por la microbiota presente, produciendo ácidos grasos de cadena corta (Lockyer & Nugent, 2017). La ingesta recomendada de AR en la dieta no está definida oficialmente pero en la literatura se sugiere 20g/día (Lockyer & Nugent, 2017).

La harina de banano puede ser obtenida por diferentes métodos de secado como: secado en torre con recirculación de aire caliente (Bezerra, Rodrigues, et al., 2013), secado en bandejas con aire forzado (Ahmed et al., 2020), (Khoozani et al., 2019), (Segundo et al.,

2017), secado en túnel con banda transportadora (Tribess et al., 2009), secado por liofilización (Ahmed et al., 2020), (Khoozani et al., 2019), secado por atomización (spray dry) (Oi et al., 2013) y otros no convencionales como el uso de ultrasonido más vacío pulsado seguido de aire seco, microondas y secado por deshumidificación (Amini Khoozani et al., 2019). Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de la harina de banano pueden ser afectadas por el método de secado aplicado. Algunos estudios han demostrado que a medida que aumenta la temperatura de secado, las propiedades tecnológicas, térmicas, reológicas y nutricionales de la harina de banano (almidón resistente, contenido fenólico, fibra) se ven desmejoradas (Ahmed et al., 2020; Khoozani et al., 2019; Amini Khoozani, Birch, et al., 2020; Pico et al., 2019; Bezerra, Amante, et al., 2013; Zhang & Hamaker, 2012). Las pérdidas de calidad en las harinas banano produce problemas de calidad en panes con sustituciones parciales de harina de trigo por harina de banano (Khoozani, Kebede, Birch, et al., 2020).

En general, existen pocas investigaciones sobre el uso de harina de banano en el desarrollo de panes con y sin gluten (Hernández-Aguirre et al., 2019; Seguchi et al., 2014; Khoozani, Kebede, & Bekhit, 2020; Juarez-Garcia, 2006). Juarez-Garcia, (2006), evaluó el efecto de harina de banano verde como única fuente de almidón sobre la digestibilidad y composición del pan, usando gluten en su formulación. Este investigador encontró que la fórmula desarrollada tuvo un mayor contenido de almidón resistente y un índice de hidrólisis significativamente inferior al del pan de trigo que usó como control. Por su parte, (Hernández-Aguirre et al., 2019), realizó una optimización de fórmula de pan libre de gluten utilizando únicamente harina de banano y determinó el impacto de la cantidad de hidrocoloide utilizado (HPMC), agua y porcentaje de harina pregelatinizada sobre el volumen específico, formación de alveolos, dureza y almidón resistente. Por último, Khoozani, Kebede, & Bekhit, (2020), aplicó una sustitución parcial de harina de trigo por harina de banano verde integral (con cáscara) obtenida por liofilización y por secado en bandejas, en cantidades de 10, 20 y 30% para determinar su impacto sobre características físicas, reológicas y texturales en masa y pan, encontrando que a mayor sustitución, se incrementa la densidad, dureza y masticabilidad del pan, así como también que la harina de banano obtenida por liofilización permite ganar más altura y volumen específico en el pan en comparación con la harina obtenida por secado en bandejas.

Con lo expuesto, se puede notar un vacío de conocimiento en el hecho de que no se han analizado los efectos del tipo de secado de banano sobre las propiedades de panes de harina de banano libre de gluten, por lo que, el presente trabajo tiene como finalidad abordar este tema y determinar el impacto del tipo de secado (por liofilización y secado en bandejas) sobre características fisicoquímicas y nutricionales de pan de banano libre gluten.

1.3. Hipótesis

El tipo de secado influye en las características fisicoquímicas y nutricionales del pan de banano libre de gluten.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del tipo de secado sobre las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del pan de banano libre de gluten.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Diseñar una fórmula de pan libre de gluten a partir de harina de banano verde.
2. Evaluar propiedades fisicoquímicas del pan de banano libre de gluten considerando el método secado.
3. Evaluar propiedades de digestibilidad del almidón en el pan de banano libre de gluten considerando el método secado.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Enfermedades asociadas con la ingesta de gluten

Entre los trastornos más comunes asociados a la ingesta del gluten se encuentra la enfermedad celíaca (EC). La EC es un trastorno del sistema inmunológico, resultante de una intolerancia permanente al gluten que afecta principalmente al tracto gastrointestinal (Rodrigo, 2006). La EC se caracteriza por la inflamación crónica de la mucosa y submucosa del intestino delgado. Entre los síntomas más comunes se encuentran la distensión abdominal, la presencia de reflujo gastroesofágico y la alteración de los hábitos intestinales (diarrea y/o estreñimiento) (Rodrigo, 2006). La EC es uno de los trastornos más comunes a nivel mundial, con una prevalencia reportada de entre 0.5%–1% (Gatti et al., 2020).

Otra de las enfermedades relacionadas al gluten es la sensibilidad al gluten no celíaca (SGNC). Se ha comprobado que la SGNC ataca más frecuentemente a mujeres que a hombres, pudiendo iniciarse a cualquier edad, pero siendo mucho más común en la edad adulta (Volta et al., 2014). Esta sensibilidad presenta síntomas intestinales y extraintestinales de difícil diagnóstico. Los síntomas de SGNC incluyen dolor abdominal, hinchazón, anomalías del hábito intestinal (diarrea o estreñimiento) y manifestaciones sistémicas como cansancio, dolor de cabeza, dolor articular y muscular, entumecimiento de piernas o brazos, dermatitis o erupción cutánea, depresión, ansiedad y anemia (por deficiencia de hierro y folato) (Volta et al., 2014). Es relativamente difícil diferenciar la SGNC de la EC porque ambas condiciones comparten las mismas características clínicas. Sin embargo, en la SGNC el lapso de tiempo entre la ingestión de gluten y la aparición de síntomas varía de unas pocas horas a un día, mientras que en la EC este intervalo es mucho más largo pudiendo ser semanas o años (Volta et al., 2014).

Por otro lado, la enfermedad conocida como la ataxia por gluten, es una manifestación neurológica atribuida a la EC, con marcadores serológicos positivos para la sensibilización al gluten (Rodrigo et al., 2016). Al igual que la EC, la ataxia por gluten se considera una enfermedad autoinmune caracterizada por manifestaciones neurológicas, con o sin incapacidad del tubo digestivo para absorber las proteínas (Rodrigo et al., 2016).

Por último, la dermatitis herpetiformis es la manifestación cutánea específica de la EC (Antiga et al., 2019). Esta enfermedad se caracteriza por presencia de lesiones simétricas en extremidades y región sacra, inflamaciones causadas por células inmunitarias, depósitos granulares a lo largo de la unión de la dermis y la epidermis, (Caproni et al., 2009).

Dentro de la estructura proteica del trigo, la gliadina es una prolamina que constituye la parte tóxica del gluten (Niewinski, 2008) produciendo atrofia de las vellosidades del intestino delgado, lo que provoca, además de los trastornos antes mencionados, que algunos nutrientes como las vitaminas no se absorban adecuadamente y se presente desnutrición y avitaminosis (Badui, 2006). Las investigaciones han revelado que el único tratamiento

eficaz para controlar los desórdenes de la salud debido al gluten es la adopción de una dieta libre de gluten (Pieczyńska, 2018; Giuberti & Gallo, 2018; Leonard et al., 2017). No hay terapia no dietética o farmacológica con resultados efectivos hasta el momento que eviten la enfermedad celiaca (Estévez & Araya, 2016).

2.2. Gluten y su importancia en la panificación

El gluten es una matriz proteica formada por gliadina y glutenina presentes en harinas de trigo, centeno y cebada (Cauvain, 2015). Las masas con gluten son cohesivas y elásticas (El Khoury et al., 2018). La principal función del gluten en la elaboración del pan es la formación de una red que le otorga propiedades viscoelásticas a la masa como elasticidad, extensibilidad, resistencia al estiramiento, tolerancia al mezclado y retención de gas (Mariotti et al., 2009).

Las glutelinas del trigo denominadas gluteninas, y las prolaminas, llamadas gliadinas, suman el 85% de la fracción proteica del trigo. Durante el amasado, las gluteninas y las gliadinas se desnaturalizan estableciendo enlaces disulfuro, y mediante interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas. Estos polímeros se orientan longitudinalmente, lo cual, sumado a un intercambio de grupos azufrados entre las múltiples cisteínas, resulta en la formación de una red elástica y cohesiva necesaria para el esponjamiento durante el leudado (producción de CO₂ en la fermentación). La formación de enlaces disulfuro intramoleculares en las gliadinas, permite que al hidratarse se forme una masa viscosa extensible y fluida, aunque poco elástica, siendo las responsables de la expansión de la masa durante la elaboración del pan. Por otro lado, los enlaces disulfuro de alto peso molecular de las gluteninas le confieren a la masa tenacidad, elasticidad y cohesividad.

Finalmente, el horneado produce cambios en las proteínas del gluten contribuyendo a la estructura final de la miga (Delcour et al., 2012). Las albúminas y las globulinas del trigo desempeñan un papel importante en la formación de la costra del pan debido a que favorecen las reacciones de oscurecimiento no enzimático responsables del color y el aroma típicos de estos productos.

2.3. Harinas libres de gluten

El desarrollo de panes libres de gluten ha incentivado al uso de harinas de diversas fuentes, tales como cereales, pseudocereales, legumbres y frutas. Las propiedades que se evalúan en las harinas libres de gluten para establecer su funcionalidad en masas de pan son las propiedades de hidratación, térmicas y reológicas. Entre las propiedades de hidratación se busca una alta capacidad de retención de agua (CRA) debido a que permite una mayor viscosidad de la masa y favorece la conservación del pan (Leon & Rosell, 2007)(Leon & Rosell, 2007). También se espera que la harina tenga una alta capacidad de ligación de agua (CLA) debido a que favorece a la elasticidad de la masa y capacidad de retención de gases (Leon & Rosell, 2007). En cuanto a las propiedades térmicas, estas harinas pueden ser útiles en productos de panificación cuando la gelatinización es retardada, es decir una alta temperatura inicial de gelatinización (T₀) (Ahmed et al., 2020). Por otro lado, las propiedades reológicas de la masa son un importante factor en la calidad de los diferentes productos de panificación, estas propiedades permiten establecer la capacidad de la masa para extenderse durante la fermentación y el horneado.

Otro de los aspectos de gran relevancia que se deben tomar en cuenta en las harinas libres de gluten es la digestibilidad de los almidones presentes. El almidón es un polímero de la glucosa, que consta de dos estructuras primarias, la amilosa, que es un polímero lineal con uniones α -D-(1-4), y la amilopectina, que es un polímero ramificado con uniones α -D-(1-4) y α -D-(1-6), siendo estos enlaces digeribles por las enzimas secretadas por nuestro sistema digestivo (Parada S & Rozowski N, 2008). La digestibilidad del almidón es la capacidad que tiene éste de entregar glucosa en un tiempo mayor o menor durante el proceso de digestión del organismo (Berti et al., 2004; Parada S & Rozowski N, 2008). De acuerdo con la tasa y el alcance de la digestión del almidón *in vitro*, el almidón se ha clasificado en tres fracciones principales: almidón rápidamente digerible (ARD), la porción de almidón digerida dentro de los primeros 20 minutos; almidón de lenta digestión (ALD), la porción de almidón digerida de 20 a 120 min; y almidón resistente (AR), la porción restante que no se puede digerir más a fondo (Englyst et al., 1992). La lenta digestión o la resistencia a la digestión de almidones tiene potenciales efectos positivos sobre la salud de la microbiota, la saciedad, el peso y la composición corporal y el metabolismo de la glucosa y los lípidos (Villaroel et al., 2018). Por lo general, los cereales sin gluten se caracterizan por un bajo contenido de almidón resistente y almidón de lenta digestión, generando un consecuente alto índice glicémico, que está relacionado con el desarrollo de otras enfermedades como la diabetes mellitus tipo I (Giuberti & Gallo, 2018). Cabe indicar que el almidón resistente en el banano es principalmente del tipo AR2, que es propio de la materia prima cruda y que, por tanto, tiene estructura compacta resistente a la digestión enzimática (Villaroel et al., 2018).

2.4. Harina de Banano

Dentro de los principales productos primarios que produce y exporta el Ecuador se encuentra el banano, especie *Musa paradisiaca* AAA, variedad Cavendish. Las exportaciones del año 2020 llegaron a 3,266.6 millones de dólares correspondientes a 6.5 millones de toneladas de banano fresco, siendo los principales destinos Rusia, Europa, China y Estados Unidos (SIPA, 2021). En ese año el Ecuador se consolidó como el primer exportador mundial con una participación del 33% (AEBE, 2021).

La producción a nivel del agro para el año 2020, según SIPA (2021), tiene valores muy similares a los de las exportaciones (6.02 ton), sin embargo, se debe tomar en cuenta que existen zonas de cultivo no registradas por lo que no se puede contrastar las cifras de producción y exportación para determinar la cantidad de banano rechazado para la exportación. El destino de los rechazos de las exportaciones es la transformación industrial como la producción de harina o compotas para su comercialización en el mercado nacional y extranjero. El rechazo de las exportaciones es de alrededor del 15%, sin embargo, este valor no es reportado formalmente por ninguna entidad pública, sino que es llevado individualmente por cada finca. El rechazo de la fruta responde a incumplimientos con requisitos de distinta índole, pero principalmente por temas de calidad que son estipulados para cada país de destino, dentro de los cuales podemos citar: integridad, consistencia, sanidad, limpieza, pedúnculo intacto, ausencia de malformaciones, exento de hongos y plagas, calibre, homogeneidad (Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense, 2007). La elaboración de la harina de banano responde al aprovechamiento de la fruta de rechazo de las exportaciones. En el año 2020 las exportaciones ecuatorianas de harina de banano alcanzaron los 5.4 millones de dólares correspondientes a 2.7 toneladas, destinadas principalmente a Estados Unidos y Puerto Rico (SIPA, 2021).

La harina de banano posee grandes propiedades funcionales, especialmente por su alta actividad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos, fibra dietaria (pectina, celulosa, lignina y hemicelulosa), minerales esenciales (fósforo, magnesio, potasio y calcio) y su alto contenido de AR (17.4 – 48%, en estado verde). Todas estas características y en especial el contenido de AR han hecho que esta harina sea considerada como ingrediente funcional para enriquecer preparaciones alimentarias (Singh et al., 2016; Amini Khoozani et al., 2019). La harina de banano es un producto con una extensa vida útil y se puede aplicar fácilmente a productos alimenticios. Sin embargo, sus características fisicoquímicas y nutricionales dependen del origen, variedad, grado de maduración y procedimiento de secado (Amini Khoozani et al., 2019).

Para la obtención de la harina de banano, se ha aplicado y estudiado diferentes métodos de secado reportados en la literatura: secado en torre con recirculación de aire caliente (spouted bed) (Bezerra, Rodrigues, et al., 2013), secado en horno de bandejas con aire forzado (Ahmed et al., 2020), (Khoozani et al., 2019), (Segundo et al., 2017), secado en túnel con banda transportadora (Tribess et al., 2009), secado por liofilización (Ahmed et al., 2020), (Khoozani et al., 2019), secado por atomización (spray dry) (Oi et al., 2013) y otros mencionados por Amini Khoozani et al., (2019) como el uso de ultrasonido más vacío pulsado seguido de aire seco, microondas y secado por deshumidificación.

La Tabla 1 muestra los estudios más relevantes respecto a la obtención de la harina de banano por método de liofilización y secado en bandejas. Ahmed et al., (2020), demostró que en la liofilización se produce una harina más porosa, probablemente por la forma en que el agua congelada es eliminada (sublimación). Esta porosidad influye en una baja densidad, alta capacidad de hidratación y un mayor contenido de almidón resistente. Según Ahmed et al., (2020), el incremento de AR se debe a la mayor rigidez de las cadenas de almidón en la harina liofilizada, lo cual conduce a desorganizar su estructura durante la eliminación de agua a escalas micrométrica y nanométrica. Por otra parte, Khoozani et al., (2019) indicó que el secado del banano en horno de convección forzada a 50°C tiene efectos similares sobre las propiedades fisicoquímicas y contenido de AR a los obtenidos de un secado por liofilización. Según estos autores, al aumentar la temperatura a 80°C se ven diferencias en cuanto al contenido de AR. Adicionalmente, los autores demostraron que la temperatura pico de gelatinización (T_p) y la entalpía de gelatinización (ΔH) es mayor en los procesos de liofilización y de secado en bandejas a 50°C en comparación con el secado a 80°C (Ahmed et al., 2020; Khoozani et al., 2019).

Tabla 1
Resultados de investigaciones previas de harina de banano obtenida por dos métodos de secado

Autor	Secado en bandejas			Liofilización	
	(Ahmed et al., 2020)	(Khoozani et al., 2019)	(Khoozani et al., 2019)	(Ahmed et al., 2020)	(Khoozani et al., 2019)
Proceso de secado	55°C 15 horas	50°C 7 h	80°C 4 h	-40 a -50°C 0.7 Pa 36 horas	No indica No indica 48 h
Humedad (%)	7.64 ± 0.34	5.09	4.56	2.70 ± 0.08	5.27
Proteína (%)	4.30 ± 0.10	4.17	4.13	4.37 ± 0.13	3.97
Grasa (%)	0.93 ± 0.09	0.93	0.93	0.88 ± 0.07	0.92
Carbohidratos (%)	-	84.62	85.14	-	84.61
Fibra cruda (%)	1.77 ± 0.23	-	-	1.91 ± 0.20	-
AR (%)	25.77 ± 1.67	45	32	37.87 ± 2.11	47
CRA (g/g)	2.73 ± 0.24	3.01	3.00	3.20 ± 0.54	3.58
CRO (g/g)	1.98 ± 0.42	2.77	2.70	1.82 ± 0.22	5.81
T _o (°C)		67.73	66.69		64.18
T _p (°C)	82.48 ± 0.92	75.90	74.60	83.39 ± 1.01	74.99
T _f (°C)		85.51	81.61		90.64
ΔH (J/g)		19.48	10.31		23.16

Fuente: Ahmed et al., 2020 y Khoozani et al., 2019

Nota de tabla. AR: Almidón resistente; CRA: Capacidad de retención de agua; CRO: capacidad de retención de aceite; T_o: Temperatura inicial de gelatinización; T_p: Temperatura pico de gelatinización; T_f: Temperatura final de gelatinización; ΔH: Entalpía de gelatinización. Los análisis de CRA se realizaron a 40°C en el estudio de Khoozani y a 25°C en el estudio de Ahmed, así mismo los análisis de CRO se realizaron a 40°C en el estudio de Khoozani y a 25°C en el estudio de Ahmed.

La digestibilidad del almidón de banano puede ser afectada por el proceso con el que es obtenida la harina, pero también por factores intrínsecos como la estructura del gránulo de almidón, la presencia de α amilasa nativa, la presencia de polisacáridos no correspondientes a almidón y los complejos de amilosa con lípidos (Bi et al., 2017). También, las cadenas de amilopectina que en el banano son responsables de la lenta digestión del almidón y cuyo grado de polimerización (mayor al de otros almidones) contribuye con una temperatura más alta de gelatinización, grado de retrogradación, firmeza del gel y menor grado de digestibilidad (Zhang & Hamaker, 2012).

Por otro lado, la resistencia a la digestión del almidón puede ser modificada por efecto del calentamiento durante el secado. Bi et al., (2017) demostraron que la cocción incrementa significativamente la digestibilidad debido a la conversión del AR en ARD y ALD. Según Bi et al., (2017) esto se debe a que durante la cocción las moléculas de almidón se hinchan y se revientan, quedando propensas a la digestión enzimática, por lo que se hace necesario usar la harina o el almidón de banano crudos y no cocinados. Este resultado coincide con Khoozani et al., (2019), que demostró que a medida que se incrementa temperatura de secado en bandejas, se reduce el almidón resistente y aumenta el contenido de almidón digerible.

2.5. Desarrollo de panes libre de gluten a partir de harina de banano

El pan libre de gluten ha sido objeto de muchas investigaciones centradas en mejorar las propiedades de la masa, la calidad y las características sensoriales del producto, así como sus características nutricionales. Wang et al., (2017), han revisado estos aspectos, permitiendo enlistar las siguientes alternativas: 1) el uso de harinas y almidones alternativos libre de gluten, incluyendo pseudocereales, legumbres, semillas, frutos secos y algunas frutas; 2) la inclusión de ingredientes nutricionales y funcionales como fibras, prebióticos, almidón resistente, hidrocoloides, proteínas y enzimas; y, 3) algunos procedimientos tecnológicos como la proteólisis del gluten, la fermentación de masa madre, uso de trigo genéticamente modificado y congelación de masa y horneado parcial del pan.

En la revisión de la literatura se encuentran investigaciones previas de desarrollos de pan con inclusión de harina de banano, al 100% o en sustitución parcial, con gluten o libres de gluten. En la Tabla 2 se enlistan algunos desarrollos de pan a partir de harinas de banano. Como podemos observar el único desarrollo de pan de harina de banano, libre de gluten, sin la inclusión de ningún otro almidón que no sea el de banano ha sido el de (Hernández-Aguirre et al., 2019), donde observamos que es posible alcanzar buenos niveles de volumen específico y desarrollo alveolar, baja dureza y mayor almidón resistente en comparación con un pan de harina de trigo como muestra control. Por otro lado, el autor (Khoozani, Kebede, Birch, et al., 2020) ha realizado la comparación de dos tipos de secado, liofilización y secado en bandejas, de harina de banano y su inclusión parcial en fórmula de pan, hasta 30%. Sus resultados indican que el método de liofilización permite que el producto terminado tenga mayor volumen específico y más almidón resistente y de lenta digestión en comparación con la fórmula que usa harina de banano secado en horno, sin embargo, sus propiedades texturales se van desmejorando conforme aumenta el porcentaje de sustitución en comparación con el pan de control.

Tabla 2
Desarrollos de pan a partir de harina de banano

Producto elaborado	Objetivo de estudio	Resultados destacados	Referencia
Pan libre de gluten elaborado con harina de banano verde	Evaluar el efecto de los niveles de HPMC, harina de banano verde pregelatinizada y agua, sobre la textura y composición del pan libre de gluten elaborado con 100% harina de banano	La formulación óptima fue de 52 mL de agua, 6% de HPMC, y 28% de harina de banano pregelatinizado. Se evidenció buenos resultados en características como volumen, volumen específico, formación de alveolos y almidón resistente (%)	Hernández-Aguirre et al., 2019
Pan elaborado con harina de banano verde. Contiene gluten.	Evaluar el efecto de harina de banano verde sobre la digestibilidad y composición del pan	Producto con mayor contenido de almidón resistente y un índice de hidrólisis significativamente inferior al del pan de trigo que usó como control	(Juarez-Garcia, 2006)
Pan de harina de banano libre de gluten.	Evaluar el efecto de tres estados de maduración del banano: amarillo, verde y sobremadurado, y el	El pan elaborado con harina de banano sobremadurado permitió alcanzar el mayor volumen específico y altura. Las fracciones de harina según su peso molecular	(Seguchi et al., 2014)

Contiene almidón de trigo.	peso molecular, sobre las características físicas y actividad enzimática en el pan.	no mejoraron el comportamiento durante la elaboración del pan si se las usa independientemente, pero sí lo hicieron en combinación.	
Pan de harina de trigo con sustitución parcial de harina de banano verde integral (con cáscara).	Determinar el efecto del tipo de secado de harina de banano (por liofilización y en horno) sobre características reológicas de masa y texturales del pan con fórmulas con sustitución del 10, 20 y 30%. En otro estudio se determinó el efecto sobre la digestibilidad del almidón.	A mayor nivel de sustitución, el pan adquiere más dureza y masticabilidad. Sin embargo, la harina obtenida por liofilización permite obtener mayor volumen específico. El pan con 30% de harina de banano liofilizado obtuvo los más altos valores de almidón resistente y almidón de lenta digestión.	(Khoozani, Kebede, & Bekhit, 2020) (Khoozani, Kebede, Birch, et al., 2020)

Fuente: Hernández-Aguirre et al., 2019; Juarez-Garcia, 2006; Khoozani, Kebede, & Bekhit, 2020; Khoozani, Kebede, Birch, et al., 2020; Seguchi et al., 2014

En el presente estudio se desea aportar con una comparación de ambos tipos de secado, liofilización y secado en bandejas, en una fórmula de pan donde la única harina y fuente de almidón es la harina de banano. Considerando los hallazgos de las investigaciones previas, se espera desarrollar una fórmula con altas características nutricionales, manteniendo características físicas de buena calidad y, determinar el método de secado más idóneo para lograr estos resultados.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Materia prima

El banano, *Musa paradisiaca* AAA, variedad Cavendish fue adquirido en el mercado mayorista de la ciudad de Guayaquil, en estado de maduración 1, según escala de Von Loesecke (1950). El banano contenía una humedad del 74%, un pH 4,7 y 5° Brix. Para la elaboración del pan libre de gluten se utilizó como mejorador un sistema de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) con carboximetilcelulosa (CMC) de marca Wellence Gluten Free 47129 (Dow Chemical Company, Michigan, USA). Los demás ingredientes utilizados en la preparación del pan libre de gluten fueron: aceite vegetal, azúcar, sal, levadura seca y huevos. Todos los ingredientes fueron adquiridos en un supermercado de la local de Guayaquil.

3.2. Elaboración de harina de banano

3.2.1. Harina de banano liofilizada (HBL)

La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo del procedimiento para la obtención de la harina de banano liofilizada (HBL). Para el secado se contó con un liofilizador piloto (Labcondo, Free Zone 6 L, Missouri, USA). Los parámetros de secado fueron una temperatura de -80°C , presión de vacío de 0,003 mbar y tiempo 48 horas. El producto deshidratado se molió con un molino de martillo (Laboratory Mill 3100, Peter Instruments, Estocolmo, Suecia). Finalmente, la muestra fue tamizada con malla # 100 ($150\ \mu\text{m}$). La harina tamizada fue envasada en un recipiente hermético a temperatura ambiente. El porcentaje de humedad final de la HBL fue $5,20 \pm 0,29\%$.

3.2.2. Harina de banano secada en bandejas (HBSB)

La harina de banano secada en bandejas fue adquirida a la empresa Kisaexport S.A, en la ciudad de Guayaquil. Esta harina fue producida en un secador de bandejas (Foodehy F-50, Málaga, España) a 70°C por 6,5 horas a presión atmosférica. Granulometría menor a $150\ \mu\text{m}$ y porcentaje de humedad de $10,18 \pm 0,17\%$.

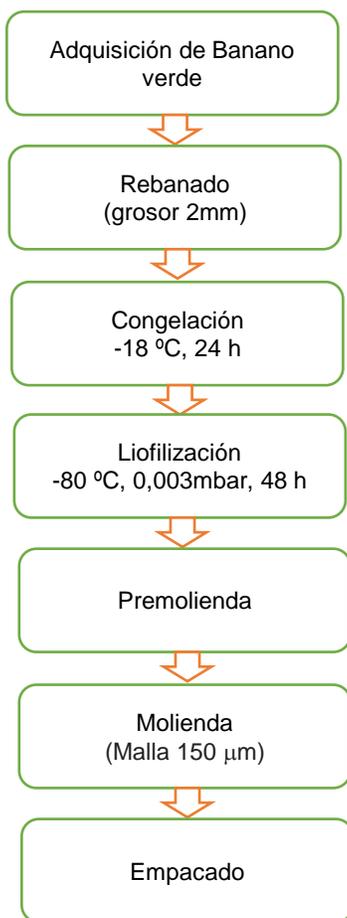


Figura 3.1 Diagrama de flujo de elaboración de harina de banano liofilizado

Fuente: Autor

3.3. Análisis en harinas

3.3.1. Propiedades de hidratación de harina

La capacidad de absorción de agua puede ser un indicativo del daño del almidón de la harina, una menor capacidad de absorción de agua puede ser originada por presencia de almidón dañado y una mayor susceptibilidad al ataque enzimático (Leon & Rosell, 2007). Como propiedades de hidratación de la harina de banano se determinó la capacidad de retención de agua (CRA) y la capacidad de ligación de agua (CLA). Estas propiedades que juegan un papel importante para el comportamiento de los diferentes tipos de harina para el amasado de panes libre de gluten.

La CRA se define como la cantidad de agua retenida por la muestra sin ser sometida a ningún estrés. Dicha capacidad depende de factores intrínsecos (tipo de polímero, peso molecular, linealidad, etc.) y extrínsecos (pH, fuerza iónica, temperatura, presencia de ciertos cationes, etcétera). Las moléculas de agua se orientan respecto de los grupos

hidroxilo que se encuentran en las moléculas de azúcar del hidrocoloide, lo que conduce a la formación de una red tridimensional. Durante el proceso de panificación, una alta CRA proporciona frescura al pan libre de gluten, es decir, mejora su conservación (Leon & Rosell, 2007). La CRA se realizó basado en el procedimiento (Cornejo & Rosell, 2015a).

$$CRA = \frac{\text{Peso del sedimento después de drenar el sobrenadante} - \text{Peso de muestra}}{\text{Peso de muestra}} \quad (1)$$

En el proceso de panificación, la CLA es la cantidad de agua necesaria para alcanzar una consistencia determinada, teniendo efecto sobre la viscosidad de la masa (Leon & Rosell, 2007). Para la determinación de CLA se siguió el procedimiento descrito en método estándar (AACC 2010). La CLA se define como la cantidad de agua retenida por la muestra mezclada con agua y sometida a centrifugación. se expresa como gramos de agua retenido por gramo de sólido.

$$CLA \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso del sedimento después de centrifugación} - \text{Peso de muestra}}{\text{Peso de muestra}} \quad (2)$$

Los análisis de propiedades de hidratación de las harinas se realizaron por triplicado (n=3).

3.3.2. Propiedades de hidratación del gel

El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA) se evaluó para caracterizar las propiedades de hidratación del gel. El IAA y el ISA fueron determinados según el procedimiento descrito por Cornejo & Rosell, (2015b). Las fórmulas para calcular IAA e ISA se indican en las ecuaciones 3 y 4. Los análisis de propiedades de hidratación de gel se realizaron por triplicado (n=3).

$$IAA \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso del sedimento}}{\text{Peso de muestra}} \quad (3)$$

$$ISA \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso de sólidos disueltos en sobrenadante}}{\text{Peso de muestra}} \quad (4)$$

3.3.3. Propiedades Térmicas

Las propiedades térmicas de las harinas se relacionan con el proceso de gelatinización de las mismas. La gelatinización es un proceso molecular asociado al calentamiento del almidón en agua, el cual cambia de una forma semi-cristalina (no digerible), a una forma amorfa (digerible) (Tester & Debon, 2000). En condiciones de exceso de agua, los puentes de hidrógeno de la región amorfa del granulo se rompen permitiendo que el agua se asocie con los grupos hidroxilos libres, ocurriendo el cambio de estado vítreo a gomoso (Sandoval et al., 2005).

Las temperaturas que se pueden identificar durante el proceso de gelatinización en el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) son la temperatura de inicio de gelatinización (T_o), temperatura pico de gelatinización (T_p) y temperatura final de gelatinización (T_f). Durante este análisis se somete la muestra a una rampa de temperatura por lo que ocurre una reacción endotérmica (flujos de calor negativos). El pico de la curva obtenida es más o menos pronunciado dependiendo de la variación del flujo de calor absorbido durante el análisis. La gelatinización completa se presenta en un rango de temperatura propio de cada harina / almidón (Sandoval et al., 2005). Uniendo la T_o y la T_f con una línea se logra cerrar el área de la curva obtenida, la cual, en harinas y almidones, representa la diferencia de entalpía (ΔH), la energía requerida para lograr la gelatinización (Tribess et al., 2009).

La evaluación de las temperaturas de gelatinización se realizó mediante el uso de un DSC (Q-200, TA instruments, Newcastle, EE. UU.), siguiendo la metodología de Cornejo & Rosell, (2015b). Se utilizó un recipiente hermético de aluminio en una relación harina/agua de 1: 3 (p / p, base de peso seco). Los recipientes con muestra se dejaron reposar 1 h a temperatura ambiente antes del análisis. El rango de temperatura de barrido fue desde 20°C hasta 130°C. Con el fin de aumentar la precisión y la resolución sin pérdida de sensibilidad de los resultados, se utilizó una tasa de calentamiento de 5°C min⁻¹. Los parámetros evaluados fueron: T_o , T_p , T_c y ΔH . También se midió el rango de temperatura de gelatinización (I_g).

Los análisis de propiedades térmicas fueron realizados por duplicado.

3.4. Elaboración de pan de harina de banano libre de gluten

Para la formulación del pan se tomó como referencia los procedimientos descritos en desarrollos previos (Hernández-Aguirre et al., 2019; Cornejo & Rosell, 2015b; Demirkesen et al., 2010). En la formulación se utilizó harina de banano (100%), agua (145%), azúcar (9%), aceite vegetal (6%), yema de huevo (5%), levadura activada (4%), hidrocoloide (2%) y sal (1.8%).

La elaboración de pan libre de gluten se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Cornejo & Rosell (2015b), para los tipos de harina. Este proceso requiere de la pregelatinización de una parte de la harina para mejorar la retención de aire durante la fermentación y el horneado. Además, la pregelatinización ayuda a la interacción de los grupos OH del almidón con el HPMC (Hernández-Aguirre et al., 2019). Para el mezclado de ingredientes se utilizó una batidora (KitchenAid, model KSM8990WH, Whirlpool Corp, OHIO, USA) a velocidad 1 por 10 minutos. El proceso de fermentación se realizó durante 60 min a 38°C y 85% de humedad relativa. El horneado se realizó en horno eléctrico (HML-

840, Teka, Madrid, España) durante 45 min a 170°C en modo convencional con turbina. Los panes horneados fueron enfriados al ambiente (27°C, 65% HR) por 3 horas. Luego, fueron empacados en recipientes herméticos por 24 horas para su posterior análisis. Por cada lote de pan elaborado se obtuvo tres unidades y se produjo una réplica por cada harina. La Figura 3.2 muestra el diagrama de flujo de la elaboración de pan de banana libre de gluten. Como muestra de control se usó un pan comercial libre de gluten elaborado a base de harina de arroz y almidón de yuca.

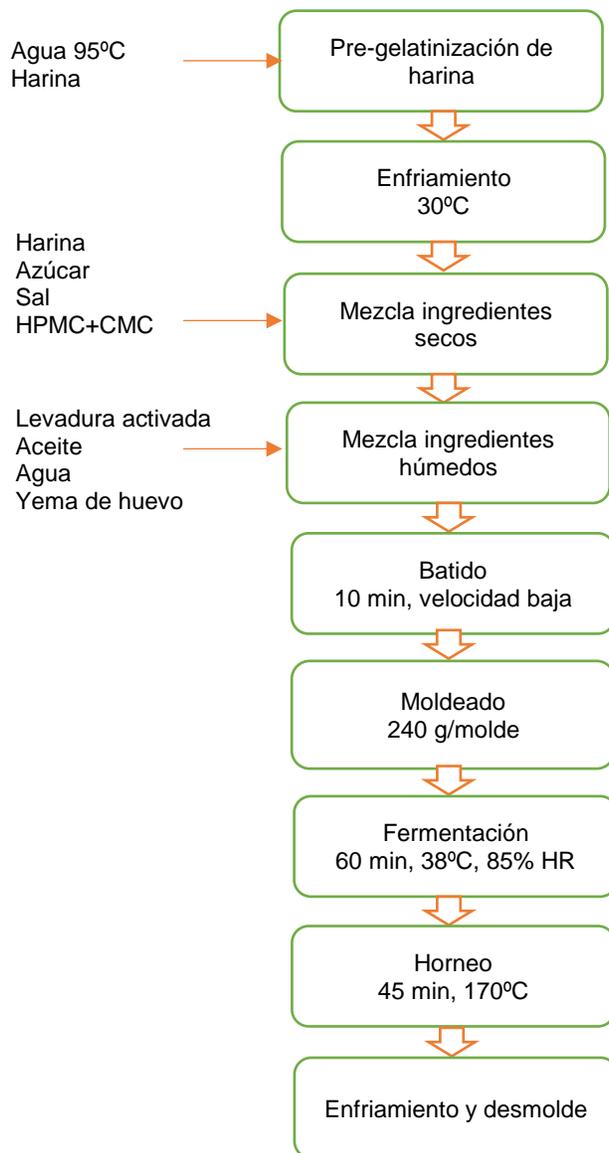


Figura 3.2 Diagrama de flujo de elaboración de pan de harina de banana libre de gluten

Fuente: Autor

3.5. Propiedades físicas del pan

3.5.1. Volumen específico

El volumen se determinó aplicando el principio de volumen desplazado utilizando un recipiente lleno de semilla de mostaza. El volumen específico se obtuvo dividiendo el volumen del pan para la masa del pan (ml/g).

3.5.2. Ancho / Altura

Ancho/altura se conoce como relación geométrica (Cornejo & Rosell, 2015a). La relación ancho/altura del pan permite comparar el crecimiento del pan despreciando el efecto del tamaño del molde.

3.5.3. Color

El color se determinó con el método de imagen digital (Yam & Papadakis, 2004), utilizando una cámara digital de celular (Huawei) configurada a resolución de 24 MP colocada en trípode dentro de una cabina iluminada. Para el procesamiento de la imagen y la determinación de los parámetros del espacio de color CIE L^* , a^* , b^* , se utilizó el software Photoshop® CS5. El valor de L^* se define como la luminosidad, el valor a^* es la coordenada cromática que va de rojo (+a) a verde (-a) y, el valor b^* es la coordenada cromática que va de amarillo (+b) a azul (-b). Aprovechando esta medición, se puede determinar el índice de oscurecimiento (BI, browning index), que es un concepto aplicado para evaluación de calidad de la carne, y hace referencia a una formación indirecta estimada de metamioglobina, la cual da un color pardo a la carne y cuya presencia superior al 40% influye en una baja aceptación de parte del consumidor (AMSA, 2012). En pan, el BI puede representar la ganancia del color dorado del pan como parte importante del proceso de horneado (Seo et al., 2019), o el efecto del proceso o de ingredientes que le otorgan esta coloración. La fórmula para el cálculo de BI se muestra a continuación (Maskan, 2001)

$$BI = \frac{100(x - 0.31)}{0.17} \quad (5)$$

donde

$$x = \frac{(a^* + 1.75L)}{(5.645L + a - 3.012b)}$$

Las variables físico químicas de volumen, volumen específico y color, se realizaron con cinco réplicas (n=6).

3.5.4. Perfil de textura

El perfil de textura de la miga fue determinado con la metodología TPA (textura profile analysis) con el analizador de textura CT3 (Brookfield, Middleboro, USA). Los parámetros a medir fueron dureza, cohesividad, resiliencia, masticabilidad, elasticidad y firmeza. Las

condiciones de análisis del TPA fue una compresión 5 mm con carga de activación de 0,049 N y una velocidad de 1 mm/s, en dos ciclos. La sonda que se utilizó fue la TA11/1000 de acrílico con 25,4 mm de diámetro y la base fue TA-RT-KI. Para este análisis se preparó una muestra de miga de 1 cm de altura por 4 cm de ancho y 5 cm de largo, tomada de la rebanada central del pan. Los parámetros establecidos se basaron en la experimentación previa de Cornejo & Rosell, (2015b).

Los parámetros de textura se realizaron con cinco réplicas (n=6).

3.5.5. Estructura del pan

El diámetro y el área de los alvéolos se determinaron con un análisis de imagen basado en el método de Sánchez-Pardo et al., (2008) con algunas modificaciones. Para obtener las rebanadas de pan se utilizó un cuchillo de sierra manual; las muestras se escanearon con un Epson L250 (modelo C462H, Filipinas). Con el software ImageJ (National Institutes Health, Bethesda, Md, USA), las imágenes se cambiaron a 8 bits, escala de grises. Se utilizó la herramienta de umbral manual para determinar el número de alvéolos y el área de alvéolos (%). El diámetro de los alvéolos se calculó considerando la fórmula de área circular ($A=\pi r^2$) y los criterios ajustados con el cálculo de la media del momento de volumen (Diámetro medio de De Brouckere, $D_{4,3}$), aplicados en este caso porque los alvéolos de desarrollo constituyen la mayor parte del volumen muestral. La medición de alvéolos y área se realizó por triplicado (n=3).

3.6. Análisis bromatológicos del pan

El contenido de proteína y de cenizas en el pan de banano libre de gluten se estableció siguiendo las metodologías de la AOAC 21st 920.87 y, AOAC 923.03, respectivamente. Para la determinación del contenido de grasa se aplicó el método Soxhlet, AOAC18th 922.06, usando Hexano como solvente. El resultado obtenido corresponde a porcentaje de grasa del producto en estudio. El contenido de carbohidratos fue calculado restando el contenido de humedad, cenizas, proteínas y lípidos del total porcentual (100%). Todos los parámetros bromatológicos fueron reportados en base seca.

El contenido de humedad de la miga fue determinado por método termogravimétrico con un analizador electrónico de humedad (Sartorius MA37, Alemania). La actividad de agua de la miga se midió por medio de equipo medidor de Aw AquaLab Series 3 TE (Decagon Devices Inc., Pullman, USA).

La determinación de proteína y grasa se realizó con tres réplicas (n=4). Cenizas, humedad y actividad de agua se realizaron con cinco réplicas (n=6).

3.7. Análisis de digestibilidad del almidón *in vitro*

Jenkins et al., en 1981, introdujeron el concepto de índice glicémico (IG) para clasificar los alimentos según la respuesta postprandial de glucosa en sangre. Ellos definieron al IG como el área bajo la curva de respuesta de glucosa en sangre para cada alimento, expresado como porcentaje del área después de tomar la misma cantidad de carbohidratos de un alimento de referencia (glucosa o pan blanco). Las mediciones realizadas por Jenkins et al., fueron *in vivo*, lo que abrió el camino para buscar mediciones *in vitro*, y relacionarlas. De esta manera se desarrollan métodos de determinación de hidrólisis de almidón mediante la

utilización de enzimas digestivas a nivel de laboratorio y las ecuaciones que son utilizadas hoy en día para definir la cinética de digestibilidad de los almidones y calcular el índice glucémico sin necesidad de hacer pruebas *in vivo* (Zhang & Hamaker, 2012).

En la presente investigación la digestibilidad del almidón *in vitro* se determinó por el método de Goñi et al., (1997) . La digestibilidad del almidón se realizó utilizando las enzimas α -amilasa (AM) pancreática porcina (6 U/ml, Type VI-B, ≥ 10 units/mg solid, Sigma Aldrich, St. Louis, USA) y la amiloglucosidasa de *Rizhopus sp* (33 U/ml, Sigma Aldrich, St. Louis, USA) (AMG). La muestra se incubó con AM en baño maría con a 37°C y 200 rpm a diferentes tiempos de incubación entre 5 y 180 min. Luego, la muestra fue incubada con AMG a 50°C y 400 rpm por 30 minutos. La glucosa obtenida luego de la hidrólisis enzimática se midió utilizando la enzima glucosa oxidasa/peroxidasa (GOPOD). La absorbancia se leyó a 510 nm a 25 °C en un lector de microplacas (Biotek Instruments, Winooski, Estados Unidos).

Siguiendo el procedimiento de Englyst *et al.* (1992) se clasificó las fracciones del almidón a partir de la hidrólisis enzimática. El almidón de rápida digestión (ARD) es el que se hidrolizó hasta los 20 min y el almidón de lenta digestión es el que se hidrolizó entre los 20 y 120 min. El contenido de almidón resistente de los panes de banana libres de gluten se midió con el kit de Megazyme Kit Resistant Starch K-RSTAR (Megazyme International Ireland Limited, Wicklow, Irlanda).

El modelo no lineal de Goñi et al., (1997), se utilizó para describir la cinética de la hidrólisis del almidón definida en la ecuación 3:

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

donde C corresponde al porcentaje de almidón hidrolizado en el tiempo t, C_{∞} es el porcentaje de equilibrio del almidón hidrolizado después de 150 min, k es la constante cinética y t es el tiempo (min). Para calcular los parámetros del modelo se utilizó el análisis de regresión no lineal en Statgraphics Centurion XVI.

El índice glucémico esperado (IGe) se calculó utilizando la ecuación descrita por Granfeldt (1994) :

$$IGe = 8,198 + 0,862IH \quad (7)$$

Donde IH es el índice de hidrólisis, que corresponde a la división del área bajo la curva de hidrólisis de almidón de cada muestra por el área de hidrólisis de pan blanco.

Los análisis de digestibilidad se realizaron con dos réplicas (n=3) en las harinas y con cinco réplicas en muestras de pan (n=6).

3.8. Análisis estadístico

Para los análisis estadísticos se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton, USA). Por cada corrida de pan se obtuvieron tres muestras y se realizó una réplica por cada tipo de secado.

Para establecer si los datos siguen una distribución normal, se utilizó paralelamente prueba de Shapiro Wilk y prueba de bondad de ajuste. Seguidamente, para los datos normales. El test de análisis de varianza (ANOVA) se aplicó para determinar si existe diferencia significativa entre los grupos de datos con un 95% de confianza ($P < 0.05$). Para verificar homogeneidad de las medias se utilizó el test de Prueba de Múltiples Rangos cuyo método empleado es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Para datos no paramétricos se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis y gráfico de caja y bigotes para determinar diferencias significativas entre las medianas.

Se realizó un análisis de correlación de las variables utilizando el método de Pearson. Los coeficientes de correlación superiores a 0.67 fueron considerados como significativos.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Harina de banano

La Tabla 3 muestra los resultados de las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de la harina de banano obtenida por liofilización (HBL) y por secado en bandejas (HBSB).

El contenido de humedad y la actividad de agua (A_w) es significativamente superior en la HBSB. Las propiedades de hidratación difieren significativamente ($P < 0.05$) entre los dos tipos de harinas, con excepción del ISA. La HBL presenta una mayor capacidad de retención de agua (CRA), ligación de agua (CLA) e índice de absorción de agua (IAA) que la HBSB. Estos resultados coinciden con los de Ahmed et al. (2020), para harina de banano verde, quien obtuvo una CRA de 3.20 ± 0.54 (g/g) para harina obtenida por liofilización y 2.73 ± 0.24 (g/g) para harina obtenida por secado en bandejas. Según Zhang et al. (2014), el proceso de liofilización produce una estructura más porosa en la harina debido al mecanismo de salida de agua por medio de sublimación. El incremento de la porosidad facilitaría el ingreso del agua a la estructura del almidón presente en la harina, aumentando la CRA y la CLA. El IAA del HBL es superior no solamente al de la HBSB sino a otras harinas libres de gluten, como los determinados por Cornejo & Rosell (2015a) y Cornejo & Rosell (2015b), en varias harinas de arroz, lo que es un indicativo de su potencial para la captación de agua y formación de red durante la gelatinización. Por otro lado, la mayor capacidad de absorción de agua podría estar relacionada al grado de cristalinidad de la harina. Según Pico et al., (2019) y Zhang et al., (2014), la harina liofilizada posee una menor cristalinidad que la harina secada en bandeja, lo que indicaría de una estructura más amorfa en la cual el agua ingresaría con mayor facilidad al granulo de almidón (Sandoval et al., 2005). Existe una fuerte correlación negativa entre la A_w y las propiedades de hidratación ($r < -0.95$, $P < 0.01$), con lo que se explica el hecho de que la HBL que tiene una A_w significativamente inferior a la HBSB tenga una mayor CRA, CLA e IAA.

En la tabla 3 se observa que la HBL posee un color más claro que HBSB. En efecto, HBL presentó un valor L^* significativamente mayor que en HBSB ($P < 0.05$). El bajo valor de L^* en HBSB podría deberse al pardeamiento enzimático y no enzimático durante el secado, evidenciado también por un mayor valor de b^* en HBSB, que tiende hacia un color más amarillo que la harina HBL. Efectivamente, la enzima polifenol oxidasa actuaría en presencia de oxígeno durante el secado en bandeja. En cambio, durante la liofilización la acción enzimática estaría limitada debido a las presiones de vacío en el que se desarrolla este proceso. Adicionalmente, la temperatura y el tiempo aplicado en secador de bandejas promueve las reacciones de pardeamiento no enzimático de Maillard. Por otro lado, el parámetro a^* de la tonalidad rojiza a verdosa no presente diferencia significativa ($P > 0.05$) para los dos tipos de secado.

Con lo relacionado a propiedades térmicas de ambos tratamientos, la tabla 3 evidencia que solo T_p presenta una diferencia significativa entre las muestras, siendo mayor en HBL en comparación con HBSB. Por otro lado, se evidenció una fuerte correlación negativa entre A_w y T_p ($r=-0.91$, $P<0.05$), lo que explicaría por qué la HBL tiene una mayor T_p .

Las características nutricionales de los dos tipos de harina también son detalladas en la tabla 3. En ambos tipos de harina el contenido de AR supera el 30% en base seca. De acuerdo con la clasificación de Goñi et al. (1996), la harina de banano puede considerarse un alimento de muy alto contenido de AR ($>15g/100g$); haciendo de esta harina un apropiado ingrediente funcional para el desarrollo de panes libres de gluten. Por otro lado, la tabla 3 muestra diferencias significativas en el contenido de AR en HBL y HBSB. HBL presenta un contenido de AR significativamente mayor que HBSB ($P < 0.05$), confirmado resultados de Ahmed et al. (2020) y Khoozani et al. (2019). La disminución del contenido de AR en la HBSB se puede deber a las altas temperaturas durante el proceso de secado en bandejas que puede producir cambios estructurales en el almidón. Sin embargo, estudios previos han reportado que la liofilización aumenta la digestibilidad del almidón (Pico et al., 2019; Zhang et al., 2014; Agama-Acevedo et al., 2018; Zeng et al., 2016). Según estos investigadores, la forma en que el agua congelada es expulsada crea microporos en la superficie de los gránulos de almidones reduciendo la cristalinidad y aumentando su susceptibilidad a la hidrólisis por acción enzimática. Por su parte, (Agama-Acevedo et al. 2018) determinó que la liofilización reduce el contenido de AR en masas pregelatinizadas que se someten a secado.

Los resultados del coeficiente de Pearson muestran una fuerte correlación positiva entre AR y las propiedades de hidratación de la harina CRA y CLA ($r>0.90$; $P<0.05$), lo que sugiere que a mayor porcentaje de AR en HBL mayor absorción de agua intermolecular e intramolecular durante la hidratación de la harina. Adicionalmente se observó una correlación positiva entre T_p y AR ($r =0.94$; $P<0.01$), lo cual coincide con los resultados obtenidos por Khoozani et al., (2019).

En cuanto a la fracción digerible del almidón, se encontró que HBSB tiene un contenido de ALD y de ARD significativamente mayor que HBL ($P<0.05$). Este resultado demostraría que durante el proceso de secado a altas temperaturas ($>60^{\circ}C$), el AR que contiene las frutas es degradado, reduciendo el orden estructural del almidón. En este sentido, (Khoozani et al., 2019) demostraron que a medida que aumenta la temperatura de secado en bandejas, el AR disminuye. En efecto, en estudios previos se ha demostrado que los tratamientos térmicos producen una reducción del AR y un incremento de ALD en harina de banano (Cahyana et al., 2019). Según Zeng et al., (2016), el menor contenido de ALD en HBL se atribuye a la destrucción de cristales imperfectos y a su textura con aspecto suelto y poroso, lo que facilita el ataque enzimático de las cadenas de almidón.

Existen muchas referencias que resaltan los beneficios nutricionales del AR y ALD (Bello-Perez et al., 2020; Lockyer & Nugent, 2017; Martinez, 2021), sin embargo, el contenido ALD en la harina de banano es bajo en relación a otras harinas libres de gluten como la de arroz y sorgo (Bednar et al., 2001) y harina de yuca (Odey & Lee, 2020).

En cuanto al almidón dañado (AD), la tabla 3 muestra que esta variable es significativamente mayor en HBSB que en HBL ($P<0.05$), corroborando resultados de Ahmed et al. (2020). EL daño del almidón en HBSB puede deberse a las altas temperaturas aplicadas durante el secado (Aichayawanich et al.2012), Al incrementarse el contenido AD,

produce efectos adversos durante la elaboración de pan. Barrera et al., (2007), demostró que a mayor contenido de AD, se incrementa significativamente la capacidad de retención de agua, lo que disminuye la resistencia de las masas y reduce la capacidad de retención de gas durante la fermentación. En efecto, el análisis de Pearson muestra una correlación negativa entre el AD y las propiedades CRA, CLA, IAA ($r < -0.94$; $P < 0.01$). Generalmente el AD afecta directamente las propiedades de hidratación de las harinas, haciendo que éstas absorban tres veces más que la que absorbe el almidón que se encuentra en los gránulos sanos (Leon & Rosell, 2007a). Sin embargo, en la harina de banano no se observa este comportamiento probablemente por el bajo porcentaje de AD (0.90 ± 0.09 para HBL y 1.65 ± 0.06 para HBSB) en comparación con otras harinas molidas en seco (harina de trigo, trigo sarraceno, trigo durum, cebada, maíz, arroz) con contenidos de AD desde 5.8 hasta 28.00%, según la revisión realizada por Wang et al.,(2020).

Tabla 3
Características físico químicas y nutricionales de harina de banano secada por liofilización y secada en bandejas

Propiedad	HBL	HBSB
Composición química		
Humedad (%)	5.20 ± 0.29^b	10.18 ± 0.17^a
Aw	0.14 ± 0.01^b	0.43 ± 0.00^a
AT (%) ^{bs}	74.82 ± 2.46^a	77.75 ± 0.06^a
AD (%) ^{bs}	0.90 ± 0.09^b	1.65 ± 0.06^a
Color		
L*	76.00 ± 1.73^a	67.67 ± 3.06^b
a*	1.67 ± 0.58^a	2.67 ± 0.58^a
b*	5.00 ± 1.00^b	8.33 ± 1.53^a
Propiedades Hidratación		
CRA (g/g)	4.96 ± 0.41^a	2.95 ± 0.10^b
CLA (g/g)	2.30 ± 0.06^a	1.86 ± 0.07^b
IAA	13.73 ± 0.21^a	10.92 ± 0.72^b
Propiedades Térmicas		
T _o (°C)	71.82 ± 0.11^a	71.54 ± 1.39^a
T _p (°C)	76.61 ± 0.10^a	74.07 ± 0.30^b
T _f (°C)	86.63 ± 0.47^a	84.81 ± 1.17^a
ΔH (J/g)	3.07 ± 0.09^a	4.32 ± 1.20^a
Ig (°C)	14.81 ± 0.58^a	13.27 ± 2.56^a
Propiedades nutricionales		
AR (%) ^{bs}	39.32 ± 1.82^a	32.51 ± 0.56^b
ARD (%) ^{bs}	3.17 ± 0.00^b	3.58 ± 0.24^a
ALD (%) ^{bs}	3.76 ± 0.59^b	8.70 ± 0.74^a

Fuente: Autor

Nota de tabla. Los resultados se presentaron como media \pm desviación estándar. Los valores seguidos de diferentes letras dentro de la misma fila representan diferencias significativas ($P < 0.05$). HBL: harina de banano secada por liofilización; HBSB: harina de banano secada en bandejas; Aw: actividad de agua; CRA: capacidad de retención de agua; CLA: capacidad de ligación de agua; IAA: índice de absorción de agua; ISA: índice de solubilidad en agua; T_o: temperatura inicial de gelatinización; T_p: temperatura pico de gelatinización; T_f: temperatura final de gelatinización; ΔH: Entalpía de gelatinización; Ig: rango de temperatura de gelatinización; AT almidón total; AD: almidón dañado, AR: almidón resistente; ANR: almidón no resistente; ARD: Almidón de rápida digestión; ALD: Almidón de lenta digestión; el superíndice bs significa en base seca.

4.2. Calidad de pan de banana libre de gluten

La Figura 4.1 muestra los panes obtenidos con los dos tipos de harina y un pan comercial libre de gluten elaborado con harina de arroz y almidón de yuca como ingredientes principales. Las diferencias en altura y color de la miga entre los panes de banana y el pan de control son marcadas. La tabla 4 muestra las características fisicoquímicas de los panes analizados. El pan elaborado con HBL tiene una tonalidad más clara, brillante y menos rojiza que el pan elaborado con HBSB. En efecto la variable L^* de la claridad – oscuridad es significativamente menor en el pan HBSB que el pan HBL ($P < 0.05$). El indicador a^* de tonalidad rojiza a verde es significativamente mayor en pan HBSB, mostrando que posee una coloración más rojiza. Ambas variables de color, L^* y a^* , indican un mayor pardeamiento en el pan HBSB, corroborado por el alto valor de IP. Por otro lado, la variable b^* (de amarillo a azul) se mantiene sin diferencia entre ambos panes. El oscurecimiento del pan de banana se debe a las reacciones enzimáticas ocurridas durante la fermentación y a las no enzimáticas debido a la acción de la temperatura durante el horneado (170°C), pirólisis y reacción de Maillard. Sin embargo, como ambas masas de pan están sometidas a estas mismas reacciones de oscurecimiento, esto implicaría que el color más pardo del pan HBSB se debe que su harina es más oscura, por lo que se sugiere que el color de la harina es el factor predominante para el color del pan.

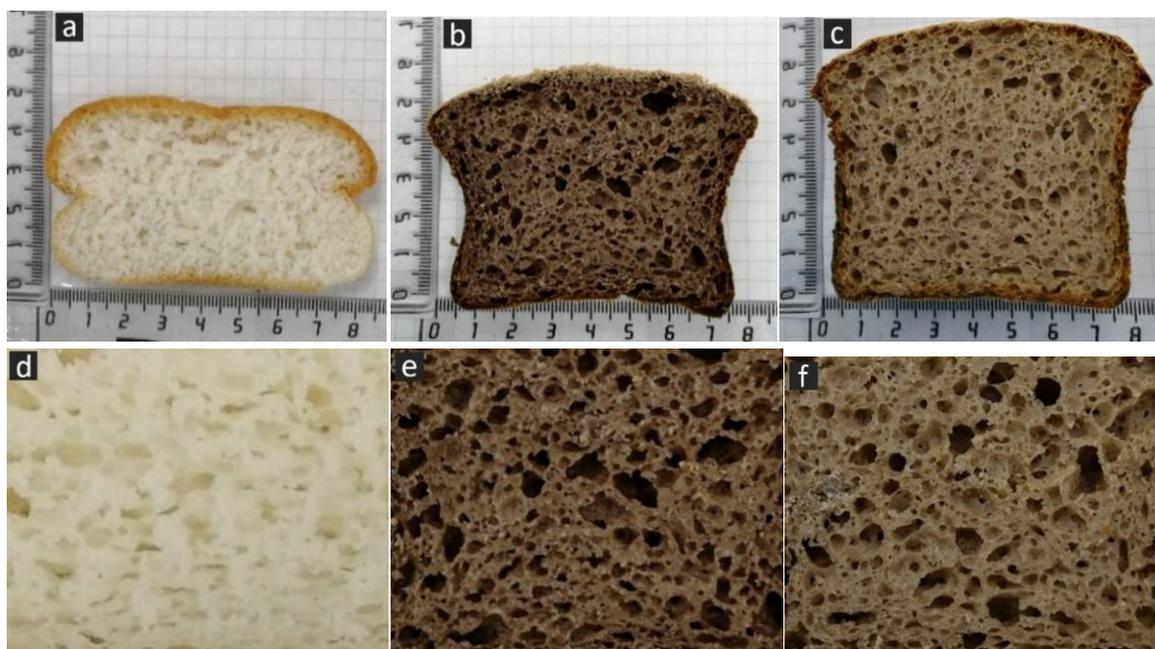


Figura 4.1 Cortes transversales de panes libres de gluten

Fuente: Autor

Nota de Figura. Cortes tomados del centro: a y d, pan de control; b y e, pan elaborado con harina de banana seco en bandeja (HBSB); c y f, pan elaborado con harina secada por liofilización (HBL)

Tabla 4
Características físicas y composición proximal de pan de banano libre de gluten y pan de control

	Control	Pan HBL	Pan HBSB
Características físicas			
Ancho/Altura	1.27± 0.11 ^a	1.03± 0.05 ^b	1.18± 0.04 ^a
VE (mL/g)	2.77±0.18 ^a	2.63±0.08 ^a	2.26±0.07 ^b
Composición proximal			
Humedad (g/100)	51.23 ± 1.30 ^b	54.30 ± 0.25 ^a	54.98 ± 0.74 ^a
Aw	0.96 ± 0.01 ^b	0.98 ± 0.00 ^a	0.98 ± 0.00 ^a
Cenizas ^{bs} (g/100)	4.01 ± 0.04 ^b	4.41 ± 0.19 ^a	4.37 ± 0.09 ^a
Proteína ^{bs} (g/100)	8.48 ± 0.12 ^a	6.11 ± 0.19 ^b	6.36 ± 0.10 ^b
Grasa ^{bs} (g/100)	0.02 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.00 ^a	0.07 ± 0.00 ^a
Carbohidratos ^{bs} (g/100)	87.52 ± 0.15 ^b	89.12 ± 0.01 ^a	89.38 ± 0.01 ^a
APT			
Dureza (N)	4.58±0.85 ^b	10.56±0.81 ^a	11.17±0.88 ^a
Resiliencia	0.19±0.01 ^c	0.34±0.03 ^a	0.25±0.04 ^b
Cohesividad	0.43±0.03 ^b	0.52±0.03 ^a	0.44±0.05 ^b
Elasticidad (mm)	2.84±0.30 ^b	4.67±0.07 ^a	4.55±0.02 ^a
Firmeza (N)	1.94±0.22 ^c	5.54±0.46 ^a	4.91±0.21 ^b
Masticabilidad (mJ)	5.54± 1.09 ^c	25.87±1.70 ^a	22.18±1.19 ^b
Alveolos			
Diámetro (D _{4.3})(mm)	0.19 ^a (0.10 - 0.40)	0.20 ^a (0.10 - 0.48)	0.14 ^b (0.07 - 0.28)
Color			
L*	68.0 ^a (67-71)	44 ^b (43-52)	29 ^c (29-29)
a*	1 ^c (0-1)	9 ^b (8-9)	12 ^a (12-13)
b*	18 ^b (17-19)	21 ^a (21-23)	22 ^a (21-22)
IP	31.67 ^c (26.71-33.10)	76.54 ^b (69.82-80.58)	154.92 ^a (145.89-157.19)

Fuente: Autor

Nota de tabla. Los resultados se presentan como media ± desviación estándar para los datos paramétricos y mediana (Q1, Q3) para los datos no paramétricos. Los valores seguidos de diferentes letras dentro de la misma fila representan diferencias significativas ($P < 0.05$). HBL: Harina de banano secada por liofilizada, HBSB: Harina de banano secada en bandejas, APT: Análisis del perfil de textura, IP: Índice de pardeamiento. El superíndice bs significa base seca.

La tabla 4 también muestra que el volumen específico (VE) y los diámetros de los alvéolos son significativamente superiores en el pan HBL en comparación con el pan HBSB ($P < 0.05$), lo que implica que la masa tuvo una mayor expansión durante la elaboración del pan. El VE y la formación alveolar (diámetros) están asociados con una buena calidad del pan. Existe semejanza en estas dos variables entre el pan HBL y el pan de control (pan comercial). Los resultados muestran que el uso de HBL permite obtener un mejor desarrollo del pan. El VE está fuertemente relacionado con las propiedades de hidratación de la harina de banano CRA ($r=0.98$; $P < 0.01$), CLA ($r=0.96$; $P < 0.01$) e IAA ($r=0.94$; $P < 0.01$). En efecto, el CRA y CLA se ha relacionado con las características reológicas de las masas sin gluten incrementando la viscosidad y la elasticidad (Leon & Rosell, 2007). Estas características permitirían retener el gas producido en la fermentación, incrementado VE y favoreciendo la formación alveolar en el pan HBL. Los resultados de VE obtenidos en este estudio son inferiores a los obtenidos por Hernández-Aguirre et al. (2019), indistintamente del tipo de secado de la harina.

La T_p es otra variable con la que VE está fuertemente relacionado ($r=0.99$; $P < 0.01$), así como también con el diámetro de alveolos ($r=0.83$; $P < 0.05$). Este resultado sugiere una

ventaja en el desarrollo de la miga de pan durante la cocción debido a que como se requiere más tiempo de horneado para llegar a T_p , se logra una mejor expansión de la masa y formación de alvéolos (Cornejo & Rosell, 2015b; Blake et al., 2015).

En referencia a la composición proximal, no hay diferencia significativa entre los panes elaborados a partir de HBL y HBSB. Comparando el pan de control con los panes de banano se observa una diferencia significativa entre la humedad de los panes de banano y el pan de control, siendo superior en el pan de banano, lo que puede sugerir una mayor esponjosidad del pan. Todos los demás parámetros proximales son significativamente superiores al pan de control, excepto las proteínas, donde ocurre lo contrario.

En cuanto a la textura de los panes de banano libres de gluten, las mediciones realizadas muestran que la dureza de la miga no se ve afectada por el método de secado. Un estudio previo realizado por Amini Khoozani et al., (2020), demostró que no hay diferencia entre ambos métodos de secado en panes con 30% de sustitución de harina de trigo por harina de banano verde. Mientras tanto, las otras propiedades de textura: masticabilidad, resiliencia, cohesividad y firmeza, sí se ven afectadas significativamente ($P < 0.05$) por el método de secado, siendo mayores en el pan de HBL que en pan de HBSB. El pan de HBL es mucho más cohesivo que el pan de HBSB ($P < 0,05$). Por otra parte, el pan de HBL presenta mayor resiliencia que el pan de HBSB ($P < 0.05$). La resiliencia es un parámetro relacionado con la frescura debido a que muestra la capacidad del pan de recuperar su forma después de una compresión, por lo que incrementaría la aceptabilidad del pan con HBL (Cauvain, 2015). La masticabilidad, resiliencia y cohesividad tienen fuerte correlación con el índice de absorción de agua de la harina (IAA) ($r > 0.83$; $P < 0.05$), siendo esta mayor en la HBL. Por lo tanto, el alto nivel IAA de la HBL permite formar una masa más densa obteniéndose un pan más cohesivo y que requiere mayor trabajo de masticación. Por otro lado, las propiedades de textura, resiliencia, cohesividad y elasticidad, tienen una ligera correlación con el volumen específico ($r > 0.67$, $P < 0.01$).

4.3. Características nutricionales de los panes

La tabla 5 muestra la cinética de digestibilidad de los almidones y sus fracciones en los panes de banano libres de gluten analizados. Al comparar la digestibilidad entre los tres tipos de pan, se observa que el pan de HBL tiene un mayor contenido de AR que el pan de HBSB ($P < 0.05$). Los resultados obtenidos están en concordancia con los de Khoozani, Kebede, Birch, et al., (2020) que obtuvieron mayor AR en pan con sustituciones con HBL en comparación con pan con sustituciones con HBSB. Según la clasificación de Goñi et al., (1996), el pan libre de gluten elaborado con HBL puede ser considerado como un alimento de AR alto (5.0 – 15%), el pan elaborado con HBSB como alimento con AR intermedio (2.5 – 5%) y el pan comercial como de bajo contenido de AR (1 – 2.5%). Con estos resultados, el pan de harina de banano libre de gluten se sugiere como un alimento funcional por su contenido de AR. Sin embargo, también se evidencia una alta disminución del contenido de AR durante la elaboración de pan. El pan HBSB presenta una reducción del 85.4% de AR y el pan HBL refleja una reducción del 83.6%, lo que implica que el horneado sí afectó de manera importante el contenido de AR aunque con diferencia significativa considerando los dos tipos de secado.

El contenido de AR significativamente mayor en pan de HBL podría deberse a que por su mayor porosidad, en comparación con HBSB, verificada en trabajos previos (Zhang et al., 2014); Pico et al., 2019; Agama-Acevedo et al., 2018), podría existir un mayor nivel de agregación o conjugación molecular de componentes de la fórmula (proteínas,

carbohidratos y grasas) permitiendo aumentar el contenido de AR en el pan HBL. De la Rosa-Millan et al.(2013), validaron la presencia de agregados de almidón después de tiempos prolongados de cocido, concluyendo que esta agregación protege la molécula de almidón. Sin embargo, no existe un estudio en pan de harina de banano que puedan confirmar la formación de estos agregados, ni la formación de AR de tipo 3, 4 y 5. Es necesario realizar estudios más profundos en este aspecto.

Existe una correlación entre el contenido de AR del pan y las propiedades de textura del pan como resiliencia ($r=0.72$, $P<0.01$), cohesividad ($r=0.67$, $P<0.05$) y masticabilidad ($r=0.74$, $P<0.01$). En el presente estudio, el mayor contenido de AR en pan HBL, así como los mayores valores obtenidos para propiedades de textura, nos pueden indicar que existe una mayor retrogradación en este pan, en comparación al pan HBSB. Es necesario realizar más estudios para profundizar en este tema.

Por otro lado, se observa que la temperatura pico de gelatinización de la harina (T_p), tiene fuerte relación con el contenido de AR ($r=0.99$, $P<0.01$), lo que se podría explicar considerando que una T_p más alta implica mayor esfuerzo para gelatinizar el almidón (descomponer la estructura) y por lo tanto menos acceso a la actividad enzimática (Ren et al., 2021).

Tabla 5
Resultados de digestibilidad de almidón en el pan de banano libre de gluten

	Control	Pan HBL	Pan HBSB
AR (%)	1.40±0.03 ^c	5.04±0.16 ^a	3.71±0.14 ^b
ALD (%)	12.24±1.36 ^a	16.66±1.10 ^b	16.46±2.90 ^b
ARD (%)	70.77±1.23 ^a	46.61±1.30 ^b	42.39±1.06 ^c
IGe	122.35±2.08 ^a	75.91±0.79 ^b	69.33±0.77 ^c
IH	132.43±2.42 ^a	78.55±0.91 ^b	70.92±0.89 ^c
C_∞ (%)	84.81±1.92 ^a	63.30±0.52 ^b	56.75±0.90 ^c
k (min⁻¹)	0.12±0.01 ^a	0.07±0.00 ^b	0.07±0.01 ^b

Fuente: Autor

Nota de tabla. Los resultados se presentan como media \pm desviación estándar. Los valores seguidos de diferentes letras dentro de la misma fila representan diferencias significativas ($P < 0.05$). HBL: Harina de banano secada por liofilizada, HBSB: Harina de banano secada en bandejas, AR: Almidón resistente; ANR: almidón no resistente; ALD: almidón de lenta digestión; ARD: almidón de rápida digestión; IGe: índice glicémico esperado; IH: índice de hidrólisis de almidón; C_∞: Concentración de almidón hidrolizado después de 150 min de hidrólisis; k: constante de cinética de hidrólisis.

El presente estudio muestra una diferencia significativa entre el contenido de ARD de pan de HBL y el de pan de HBSB ($P<0.05$). Además, el contenido de ARD de ambos panes de banano son inferiores al del pan de control. Según Zhang et al. (2014), la liofilización promueve la formación de microporos en la molécula de almidón debido a la transferencia de agua por sublimación, especialmente de almidones polimórficos Tipo-B como el banano. Estos microporos interrumpen o desalinean la cristalinidad haciendo al almidón más susceptible al ataque enzimático e incrementando su digestibilidad.

En cuanto al contenido de ALD en pan de harina de banano, no existe diferencia significativa respecto al tipo de secado de la harina. El contenido de ALD en pan HBL y pan HBSB son superiores a los obtenidos en otros tipos de panes sin gluten como el de arroz (De La Hera et al., 2014), garbanzo (Hawkins & Johnson 2005) y en panes sin gluten comerciales (Matos Segura & Rosell 2011). El ALD permite una respuesta glicémica menor y provee un mayor

efecto de saciedad que los ARD presentando beneficios a la salud (Parada S & Rozowski N, 2008). Como podemos observar, el contenido de ALD en pan de banana, independientemente del proceso de secado de harina es alto.

Sumando las fracciones nutricionales del almidón, AR y ALD, se obtuvo un contenido de $21.71 \pm 1.19\%$ y $20.18 \pm 2.87\%$, para pan HBL y pan HBSB, respectivamente, no existiendo diferencia significativa entre ellos ($P > 0.05$). Este resultado demostraría que el método de secado no influye en el contenido de almidones beneficiosos (AR + ALD) en el pan de banana libre de gluten.

En cuanto al IGe, existe diferencia significativa dependiendo del tipo de secado, encontrando que el pan de HBL tiene un IGe mayor al del pan HBSB ($P < 0.05$). Los valores obtenidos de puede clasificar al pan con HBSB con un contenido moderado de eGI ($50 < eGI < 70$) y al pan con HBL con alto contenido de eGI ($eGI > 70$). El IGe está correlacionado con el proceso de gelatinización (T_p con un $r = 0.99$ y $P < 0.01$) ya que es durante la gelatinización que se modifica el almidón afectando su desorganización molecular, fraccionamiento y, por ende, la producción de la fracción digerible de almidón ALD y ARD. Si se compara con el pan de control, los panes con harina de banana presentaron valores de eGI significativamente más bajos. Esta tendencia se cumple al compararse con otras investigaciones (Matos Segura & Rosell, 2011; Wolter et al. 2013).

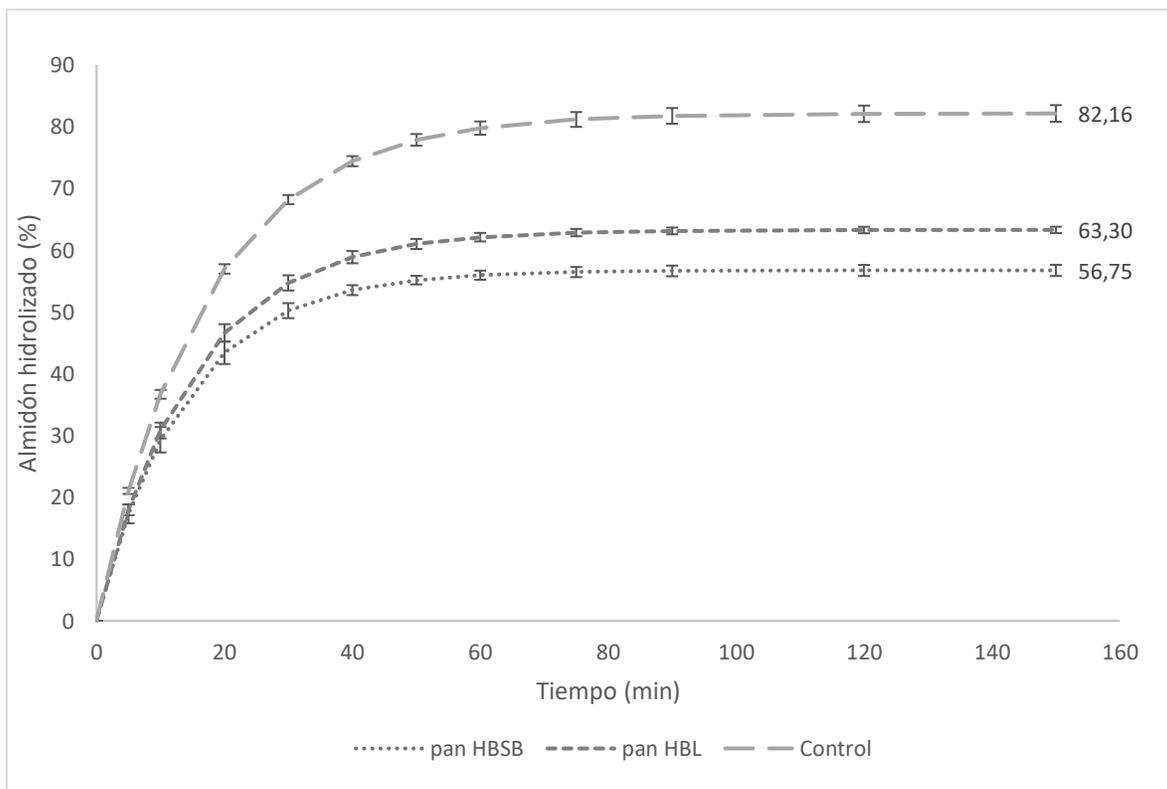


Figura 4.2 Digestibilidad in vitro de almidón en pan de banana libre de gluten, pan HBSB, pan HBL, pan de Control

Fuente: Autor

Las curvas de digestibilidad del almidón in vitro de los panes libre de gluten se muestran en la Fig. 4.2. La hidrólisis máxima, C^∞ de panes de banana libre de gluten de ambos métodos de secado son inferiores al del pan de control. El pan elaborado con HBL tiene un C^∞ más alto que el pan elaborado con HBSB, lo que se sustenta por su mayor contenido de ARD. Aunque existe una diferencia significativa en el C^∞ de ambos panes, el ratio de digestión (k) es igual tanto para pan HBL como para pan HBSB y significativamente inferiores al del pan de control.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El método de secado para obtención de la harina influye significativamente en propiedades físicas del pan que definen su calidad como el volumen específico, diámetro de alveolos, color y perfil de textura. El pan HBL presenta un mejor desarrollo de la miga (diámetro más grande de alveolos), mayor volumen específico en comparación con pan HBSB. El mayor crecimiento de la masa que resulta en un mayor volumen específico y diámetros del pan HBL está correlacionado con la mayor temperatura pico de gelatinización de su harina, así como también con sus propiedades de hidratación que son cuantitativamente mayores a las de HBSB. En cuanto al color, el pan HBSB presenta un mayor pardeamiento debido a que la harina secada en bandejas es más oscura que la harina liofilizada debido a su exposición al oxígeno y a una temperatura alta (70°C) en tiempo prolongado (6.5h). Por otro lado, las correlaciones estadísticas también permiten concluir que las mayores propiedades de hidratación de la HBL dan como resultado un pan con mayor cohesividad, resiliencia, firmeza y masticabilidad.
2. Desde el aspecto nutricional, existe un mayor contenido de AR en el pan HBL. Sin embargo, el IGe del pan HBL es mayor al del pan HBSB debido a su mayor contenido de ARD. Esto sugiere que durante la producción del pan HBL existe un mayor acceso de las enzimas digestivas al gránulo del almidón. En general, las fracciones nutritivas de almidón en el pan de banano (AR y ALD) superan el 20%, no existiendo diferencia significativa en relación con el tipo de secado de la harina. El IGe de ambos panes de harina de banano es inferior al reportado en estudios previos para panes libres de gluten que usan otras harinas e incluso inferior al IGe del pan de control analizado en este estudio. Estas ventajas permiten considerar al pan de harina de banano libre gluten como un alimento nutritivo indistintamente del tipo de secado de la harina.

5.2. Recomendaciones

1. Es importante tener en cuenta que estudios posteriores deben profundizar más en el uso de harina de banano como única fuente de almidón en pan libre de gluten, considerando los siguientes aspectos: 1) cinética de retrogradación del pan HBL y HBSB y su efecto sobre contenido de AR y ALD; 2) aceptación sensorial del producto; 3) características nutricionales y de calidad de pan con HBSB secada a menores temperaturas (<70°C); 4) efecto de temperaturas de horneado de pan de harina de banano sobre el contenido de AR y ALD; 6) análisis de textura de masas de pan de harina de banano y su relación con la textura del pan; 7) determinación del tipo de AR formado en el pan de harina de banano (AR3, AR4, AR5).

BIBLIOGRAFÍA

- AEBE. (2021). *Guía culinaria del banano*. Asociación de Exportadores de Banano Del Ecuador. <https://www.aebe.com.ec/guiaculinaria>
- Agama-Acevedo, E., Pacheco-Vargas, G., Bello-Pérez, L. A., & Alvarez-Ramirez, J. (2018). Effect of drying method and hydrothermal treatment of pregelatinized Hylon VII starch on resistant starch content. *Food Hydrocolloids*, 77, 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.025>
- Aguilar, N., Albanell, E., Miñarro, B., & Capellas, M. (2015). Chickpea and tiger nut flours as alternatives to emulsifier and shortening in gluten-free bread. *Lwt*, 62(1), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.045>
- Ahmed, J., Thomas, L., & Khashawi, R. (2020). Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions. *Food Hydrocolloids*, 99(August 2019), 105331. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105331>
- Aichayawanich, S., Nopharatana, M., Nopharatana, A., & Songkasiri, W. (2012). Effects of pneumatic conveying drying conditions on damaged starch content and particle size of Cassava starch. *Advanced Materials Research*, 554–556, 1433–1438. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.1433>
- Amini Khoozani, A., Birch, J., & Bekhit, A. E. D. A. (2019). Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 548–559. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-03562-z>
- Amini Khoozani, A., Birch, J., & Bekhit, A. E. D. A. (2020). Textural properties and characteristics of whole green banana flour produced by air-oven and freeze-drying processing. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1533–1542. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00402-7>
- AMSA, A. M. S. A. (2012). Meat Color Measurement Guidelines: AMSA. In *American Meat Science Association*. (Issue December).
- Antiga, E., Maglie, R., Quintarelli, L., Verdelli, A., Bonciani, D., Bonciolini, V., & Caproni, M. (2019). Dermatitis herpetiformis: Novel perspectives. *Frontiers in Immunology*, 10(JUN), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.01290>
- Arendt, E. K., Morrissey, A., Moore, M., & Dal Bello, F. (2017). *Gluten-free baking: Combating the challenges - A review*. 66, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
- Badui, S. (2006). Química de los Alimentos. In Pearson (Ed.), *Química de los alimentos* (Cuarta edi).
- Barrera, G. N., Pérez, G. T., Ribotta, P. D., & León, A. E. (2007). Influence of damaged starch on cookie and bread-making quality. *European Food Research and Technology*, 225(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0374-1>

- Bednar, G. E., Patil, A. R., Murray, S. M., Grieshop, C. M., Merchen, N. R., & Fahey, G. C. (2001). Nutrient metabolism: Starch and fiber fractions in selected food and feed ingredients affect their small intestinal digestibility and fermentability and their large bowel fermentability in vitro in a canine model. *Journal of Nutrition*, 131(2), 276–286. <https://doi.org/10.1093/jn/131.2.276>
- Bello-Perez, L. A., Flores-Silva, P. C., Agama-Acevedo, E., & Tovar, J. (2020). Starch digestibility: past, present, and future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5009–5016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8955>
- Berti, C., Riso, P., Monti, L. D., & Porrini, M. (2004). In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gluten-free foods and their gluten counterparts. *European Journal of Nutrition*, 43(4), 198–204. <https://doi.org/10.1007/s00394-004-0459-1>
- Bezerra, C. V., Amante, E. R., de Oliveira, D. C., Rodrigues, A. M. C., & da Silva, L. H. M. (2013). Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed - Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. *Industrial Crops and Products*, 41(1), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.035>
- Bezerra, C. V., Rodrigues, A. M. da C., Amante, E. R., & Silva, L. H. M. da. (2013). Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(4), 1140–1146. <https://doi.org/10.1590/s0100-29452013000400025>
- Bi, Y., Zhang, Y., Jiang, H., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., & Li, C. (2017). Molecular structure and digestibility of banana flour and starch. *Food Hydrocolloids*, 72, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.003>
- Blake, L. H., Jenner, C. F., Barber, A. R., Gibson, R. A., O'Neill, B. K., & Nguyen, Q. D. (2015). Effect of waxy flour blends on dough rheology and bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(4), 926–933. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12710>
- Cahyana, Y., Wijaya, E., Halimah, T. S., Marta, H., Suryadi, E., & Kurniati, D. (2019). The effect of different thermal modifications on slowly digestible starch and physicochemical properties of green banana flour (*Musa acuminata* colla). *Food Chemistry*, 274(July 2018), 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.004>
- Caproni, M., Antiga, E., Melani, L., & Fabbri, P. (2009). Guidelines for the diagnosis and treatment of dermatitis herpetiformis. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 23, 633–638.
- Cauvain, S. (2015). Technology of breadmaking. In *Technology of Breadmaking*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14687-4>
- Chakraborty, S. K., Gupta, S., & Kotwaliwale, N. (2016). Quality characteristics of gluten free bread from barnyard millet–soy flour blends. *Journal of Food Science and Technology*, 53(12), 4308–4315. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2429-z>
- Cornejo, F., & Rosell, C. M. (2015a). Influence of germination time of brown rice in relation to flour and gluten free bread quality. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6591–6598. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1720-8>
- Cornejo, F., & Rosell, C. M. (2015b). Physicochemical properties of long rice grain

- varieties in relation to gluten free bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 1203–1210. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.050>
- De La Hera, E., Rosell, C. M., & Gomez, M. (2014). Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry*, 151, 526–531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.115>
- de la Rosa-Millan, J., Agama-Acevedo, E., Osorio-Díaz, P., & Bello-Perez, L. A. (2013). Effect of Cooking, Annealing and Storage on Starch. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 371–378.
- Delcour, J. A., Joye, I. J., Pareyt, B., Wilderjans, E., Brijs, K., & Lagrain, B. (2012). Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1), 469–492. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101303>
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.004>
- Do Nascimento, A. B., Fiates, G. M. R., Dos Anjos, A., & Teixeira, E. (2013). Analysis of ingredient lists of commercially available gluten-free and gluten-containing food products using the text mining technique. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(2), 217–222. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.718744>
- El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., & Joye, I. J. (2018). A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. *Nutrients*, 10(10), 1–25. <https://doi.org/10.3390/nu10101410>
- Englyst, H., Kingman, S., & Cummings, J. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2, 33–50.
- Estévez, V., & Araya, M. (2016). Gluten-free diet and gluten-free foods. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(4), 428–433. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000400014>
- Fry, L., Madden, A. M., & Fallaize, R. (2018). An investigation into the nutritional composition and cost of gluten-free versus regular food products in the UK. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 31(1), 108–120. <https://doi.org/10.1111/jhn.12502>
- Gatti, S., Lionetti, E., Balanzoni, L., Verma, A. K., Galeazzi, T., Gesuita, R., Scattolo, N., Cinquetti, M., Fasano, A., Catassi, C., Annibaldi, R., Del Baldo, G., Franceschini, E., Palpacelli, A., Monachesi, C., Catassi, G. N., Trevisan, M. T., Anton, G., & Colombari, A. M. (2020). Increased Prevalence of Celiac Disease in School-age Children in Italy. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 18(3), 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2019.06.013>
- Giuberti, G., & Gallo, A. (2018). Reducing the glycaemic index and increasing the slowly digestible starch content in gluten-free cereal-based foods: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 50–60. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13552>
- Goñi, I., García-Diz, L., Mañas, E., & Saura-Calixto, F. (1996). Analysis of resistant starch: A method for foods and food products. *Food Chemistry*, 56(4), 445–449. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00222-7](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00222-7)

- Goñi, Isabel, García-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A STARCH HYDROLYSIS PROCEDURE TO ESTIMATE GLYCEMIC INDEX. *Nutrition Research*, 17(3), 427–437.
- Granfeldt, Y. (1994). *Food factors affecting metabolic responses to cereal products*. University of Lund, Sweden.
- Hawkins, A., & Johnson, S. K. (2005). In vitro carbohydrate digestibility of whole-chickpea and chickpea bread products. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 56(3), 147–155. <https://doi.org/10.1080/09637480500103920>
- Hernández-Aguirre, M. A., Islas-Hernández, J. J., Sánchez-Pardo, M. E., Rodríguez-Ambriz, S. L., & Osorio-Díaz, P. (2019). Response surface methodology for optimization of gluten-free bread made with unripe banana flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 1652–1660. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00082-y>
- Huang, J., Yang, Q., & Pu, H. (2018). Slowly digestible starch. In *Functional Starch and Applications in Food*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1077-5>
- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., & Goff, D. V. (1981). Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3), 362–366.
- Juarez-Garcia. (2006). *Composition , Digestibility and Application in Breadmaking of Banana Flour*. 131–137. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0020-x>
- Khoozani, A. A., Bekhit, A. E. D. A., & Birch, J. (2019). Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 938–946. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.010>
- Khoozani, A. A., Kebede, B., & Bekhit, A. E.-D. A. (2020). Rheological, textural and structural changes in dough and bread partially substituted with whole green banana flour. *Lwt*, 126(February 2020), 109252. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109252>
- Khoozani, A. A., Kebede, B., Birch, J., & El-Din Ahmed Bekhit, A. (2020). The effect of bread fortification with whole green banana flour on its physicochemical, nutritional and in vitro digestibility. *Foods*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/foods9020152>
- Leon, A., & Rosell, C. (2007). *De tales harinas, tales panes: : granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica* (A. Leon & C. Rosell (eds.)).
- Leonard, M. M., Sapone, A., Catassi, C., & Fasano, A. (2017). Celiac disease and nonceliac gluten sensitivity: A review. *JAMA - Journal of the American Medical Association*, 318(7), 647–656. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.9730>
- Li, X. (2018). Resistant starch and its applications. *Functional Starch and Applications in Food*, 63–90. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1077-5>
- Lockyer, S., & Nugent, A. P. (2017). Health effects of resistant starch. *Nutrition Bulletin*, 42(1), 10–41. <https://doi.org/10.1111/nbu.12244>
- Mancebo, C. M., San Miguel, M. Á., Martínez, M. M., & Gómez, M. (2015). Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels

- of water. *Journal of Cereal Science*, 61, 8–15.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.10.005>
- Mariotti, M., Lucisano, M., Ambrogina Pagani, M., & Ng, P. K. W. (2009). The role of corn starch, amaranth flour, pea isolate, and Psyllium flour on the rheological properties and the ultrastructure of gluten-free doughs. *Food Research International*, 42(8), 963–975. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.017>
- Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2013). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.07.005>
- Markets and Markets. (n.d.). *Gluten-free Products Market by Type (Bakery products, Snacks & RTE products, Condiments & dressings, Pizzas & pastas), Distribution channel (Conventional stores, Specialty stores and Drugstores & Pharmacies), Form & Region - Global Forecast to 2025*. Retrieved December 3, 2020, from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/gluten-free-products-market-738.html>
- Martinez, M. M. (2021). Starch nutritional quality: beyond intraluminal digestion in response to current trends. *Current Opinion in Food Science*, 38, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.024>
- Maskan, M. (2001). Kinetic of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177–182. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00155-2)
- Matos Segura, M. E., & Rosell, C. M. (2011). Chemical Composition and Starch Digestibility of Different Gluten-free Breads. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(3), 224–230. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0244-2>
- Miao, M., Jiang, B., Cui, S. W., Zhang, T., & Jin, Z. (2015). Slowly Digestible Starch—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(12), 1642–1657. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.704434>
- Miranda, J., Lasa, A., Bustamante, M. A., Churrua, I., & Simon, E. (2014). Nutritional Differences Between a Gluten-free Diet and a Diet Containing Equivalent Products with Gluten. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69(2), 182–187. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0410-4>
- Niewinski, M. M. (2008). Advances in Celiac Disease and Gluten-Free Diet. *Journal of the American Dietetic Association*, 108(4), 661–672. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2008.01.011>
- Norma tecnica obligatoria nicaragüense, 1 (2007). <https://martinurbinac.files.wordpress.com/2011/07/nton-haccp-diretrices.pdf>
- Odey, G. N., & Lee, W. Y. (2020). Evaluation of the quality characteristics of flour and pasta from fermented cassava roots. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 813–822. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14364>
- Oi, R. K., Santana, J. C. C., Tambourgi, E. B., & Júnior, M. (2013). Feasibility study for production of green banana flour in a spray dryer. *Chemical Engineering Transactions*, 32(October 2015), 1825–1830. <https://doi.org/10.3303/CET1332305>
- Parada S, J. A., & Rozowski N, J. (2008). Relación entre la respuesta glicémica del

- almidón y su estado microestructural. *Revista Chilena de Nutricion*, 35(2).
<https://doi.org/10.4067/S0717-75182008000200001>
- Pico, J., Xu, K., Guo, M., Mohamedshah, Z., Ferruzzi, M. G., & Martinez, M. M. (2019). Manufacturing the ultimate green banana flour: Impact of drying and extrusion on phenolic profile and starch bioaccessibility. *Food Chemistry*, 297(June), 124990.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124990>
- Pieczyńska, J. (2018). Do celiac disease and non-celiac gluten sensitivity have the same effects on reproductive disorders? *Nutrition*, 48, 18–23.
<https://doi.org/10.1016/j.nut.2017.11.022>
- Raigond, P., Ezekiel, R., & Raigond, B. (2015). Resistant starch in food: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(10), 1968–1978.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.6966>
- Ren, Y., Setia, R., Warkentin, T. D., & Ai, Y. (2021). Functionality and starch digestibility of wrinkled and round pea flours of two different particle sizes. *Food Chemistry*, 336(July 2020), 127711. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127711>
- Rocha Parra, A. F., Ribotta, P. D., & Ferrero, C. (2015). Apple pomace in gluten-free formulations: Effect on rheology and product quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 682–690. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12662>
- Rodrigo, L. (2006). Celiac Disease. *World J Gastroenterol*, 12(41), 6585–6593.
- Rodrigo, L., Hernández-Lahoz, C., Lauret, E., Rodríguez-Peláez, M., Soucek, M., Ciccocioppo, R., & Kruzliak, P. (2016). Gluten ataxia is better classified as non-celiac gluten sensitivity than as celiac disease: a comparative clinical study. *Immunologic Research*, 64(2), 558–564. <https://doi.org/10.1007/s12026-015-8750-1>
- Salehi, F. (2019). Improvement of gluten-free bread and cake properties using natural hydrocolloids: A review. *Food Science and Nutrition*, 7(11), 3391–3402.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.1245>
- Sánchez-Pardo, M. E., Ortiz-Moreno, A., Mora-Escobedo, R., Chanona-Pérez, J. J., & Necochea-Mondragón, H. (2008). Comparison of crumb microstructure from pound cakes baked in a microwave or conventional oven. *LWT - Food Science and Technology*, 41(4), 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.003>
- Sandoval, A., Rodríguez, E., & Fernandez, A. (2005). Application of analysis by differential scanning calorimetry (DSC) for the characterization of the modifications of the starch. *Revista de La Facultad de MINAS (DYNA)*, 72, 45–53.
- Sarawong, C., Gutiérrez, Z. R., Berghofer, E., & Schoenlechner, R. (2014). Effect of green plantain flour addition to gluten-free bread on functional bread properties and resistant starch content. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(8), 1825–1833. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12491>
- Seguchi, M., Tabara, A., Iseki, K., Takeuchi, M., & Nakamura, C. (2014). Development of gluten-free bread baked with banana (*musa spp.*) flour. *Food Science and Technology Research*, 20(3), 613–619. <https://doi.org/10.3136/fstr.20.613>
- Segundo, C., Román, L., Gómez, M., & Martínez, M. M. (2017). Mechanically fractionated flour isolated from green bananas (*M. cavendishii* var. *nanica*) as a tool to increase the dietary fiber and phytochemical bioactivity of layer and sponge cakes. *Food*

- Chemistry*, 219, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.143>
- Seo, J. W., Kwak, H. S., Chun, S. H., & Kim, C. (2019). Design of domestic electric oven using uniformity of browning index of bread in baking process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(9), 4311–4318. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0827-7>
- Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2016). Bioactive compounds in banana and their associated health benefits - A review. *Food Chemistry*, 206, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.033>
- SIPA. (2021). *Comercio exterior agropecuario y agroindustrial*. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/comercio-exterior>
- Tester, R. F., & Debon, S. J. . (2000). Annealing of starch — a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 27(1), 1–12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014181309900121X>
- Tribess, T. B., Hernández-Uribe, J. P., Méndez-Montevalvo, M. G. C., Menezes, E. W., Bello-Perez, L. A., & Tadini, C. C. (2009). Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 42(5), 1022–1025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.12.017>
- Tsatsaragkou, K., Kara, T., Ritzoulis, C., Mandala, I., & Rosell, C. M. (2017). Improving Carob Flour Performance for Making Gluten-Free Breads by Particle Size Fractionation and Jet Milling. *Food and Bioprocess Technology*, 10(5), 831–841. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1863-x>
- Villaroel, P., Gómez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Resistant starch: Technological characteristics and physiological intersts. *Revista Chilena de Nutricion*, 45(3), 271–278.
- Volta, U., Bardella, M. T., Calabrò, A., Troncone, R., Corazza, G. R., Bagnato, C., Belcari, C., Bellantoni, A., Caio, G., Calella, F., Cappello, M., Ciacci, C., D'Agate, C., De Vitis, I., Di Sabatino, A., Fava, G., Frau, M. R., Fugazza, A., Grassi, S. A., ... Satta, P. U. (2014). An Italian prospective multicenter survey on patients suspected of having non-celiac gluten sensitivity. *BMC Medicine*, 12(1), 4–11. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-12-85>
- Von Loesecke, H. (1950). *Bananas: Chemistry, physiology, technology*. Interscience Publishers, Inc.
- Wang, K., Lu, F., Li, Z., Zhao, L., & Han, C. (2017). Recent developments in gluten-free bread baking approaches: A review. *Food Science and Technology*, 37, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.01417>
- Wang, Q., Li, L., & Zheng, X. (2020). A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. *Food Chemistry*, 315(January), 126267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126267>
- Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. In *Food Microbiology* (p. Vol 24, Issue 2, Pag 115-119). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0740002006001535>
- Wolter, A., Hager, A. S., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2013). In vitro starch digestibility and

predicted glycaemic indexes of buckwheat, oat, quinoa, sorghum, teff and commercial gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 58(3), 431–436.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.09.003>

Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1 SPEC.), 137–142. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00195-X)

Zeng, F., Zhu, S., Chen, F., Gao, Q., & Yu, S. (2016). Effect of different drying methods on the structure and digestibility of short chain amylose crystals. *Food Hydrocolloids*, 52, 721–731. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.012>

Zhang, B., Wang, K., Hasjim, J., Li, E., Flanagan, B. M., Gidley, M. J., & Dhital, S. (2014). Freeze-drying changes the structure and digestibility of B-polymorphic starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(7), 1482–1491.
<https://doi.org/10.1021/jf405196m>

Zhang, P., & Hamaker, B. R. (2012). Banana starch structure and digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1552–1558.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.053>