



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**



FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN
ADICIONADOS CON ENZIMAS MALTOGÉNICAS**

T E S I N A

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA

MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ LUCATERO

ASESORA ACADÉMICA

DRA. ANDREA YAZMIN GUADARRAMA LEZAMA

CO-ASESOR

DR. DANIEL DIAZ BANDERA

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MARZO 2025

ABREVIATURAS

NGE: New Generation Enzymes

DSC: Calorimetría Diferencial de Barrido

TPA: Análisis de perfil textural.

La LpMA: Amilasa maltogénica originada a partir de *L. plantarum*

GRAS: Generalmente reconocido como seguro.

MA: Amilasa maltogénica

AP: Amilopectina

AMM: Amilomaltosa

MAase: Amilasa maltogénica

BW: Beeswax (encapsulamiento de amilasa maltogénica) film en alimentos

MD: Maltodextrina

DE: Dextrosa

FE: Enzima libre sin encapsulación

EnE-LMD: Enzima encapsulada con baja concentración de maltodextrina

EnE-HDM: Enzima encapsulada con alta concentración de maltodextrina.

SEM: Microscopios electrónicos de barrido.

POD: Peroxidasa

PPO: Polifenol oxidasa

ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIAS	2
ABREVIATURAS	3
INDICE DE TABLAS	7
INDICE DE CUADROS	8
INDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. ANTECEDENTES	13
2. IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA	16
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN (HIPOTESIS)	18
4. OBJETIVOS	20
5. JUSTIFICACIÓN	22
6. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADOS	24
7. DESARROLLO TEMÁTICO	26
7.1 Definición de pan	27
7.1.1 Tipos de pan	27
7.1.1.1 Pan étnico occidental	27
7.1.1.2 Pan étnico	28
7.1.1.3 Pan con valor agregado	28
7.1.2 Características del pan	29
7.2 Proceso de elaboración del pan	30

7.3 Propiedades viscoelásticas de la masa para elaboración de pan	32
7.3.1 Definición de viscoelasticidad	32
7.3.2. Importancia de las propiedades reológicas en los productos de panificación	33
7.3.3 Propiedades reológicas y enzimas de los productos de panificación	33
7.3.3.1 Pasos de la elaboración del pan que influyen en la reología y viscoelasticidad	34
7.3.3.1.1 El mezclado	34
7.3.3.1.2 El laminado	34
7.3.3.1.3 La fermentación	34
7.3.4 Factores que afectan la reología de los productos de panificación	35
7.3.4.1 Efecto de la temperatura sobre la reología de la masa	38
7.3.4.2 Retrogradación del almidón o endurecimiento de la masa	38
7.4 Funciones de los ingredientes en panificación	39
7.4.1. Harina	40
7.4.2. Gluten	40
7.4.3. Leche	41
7.4.4. Agua	41
7.4.5. Levadura	42
7.4.6 Sacarosa	42
7.4.7 Sal	42
7.4.8. Lípidos: mantequilla, aceite, manteca	43
7.4.9. Huevo	44

7.5. Enzimas adicionadas en productos de panificación	44
7.5.1. Características	44
7.5.2. Enzimas maltogénicas adicionadas a las masas para productos de panificación	45
7.5.3 Enzimas no maltogenicas adicionadas a productos de panificación	45
7.5.3.1 Alfa amilasas	45
7.5.3.2 Lipasas	46
7.5.3.3Proteasas	46
7.5.3.4Hemicelulasas	47
7.5.3.5 Oxidoreductasas	47
8.Resultados y Discusión de resultados	48
9. Conclusiones	73
10. Perspectivas futuras	75
REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan.	50
Tabla 2. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan libre de gluten.	59
Tabla 3. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan blanco.	65
Tabla 4. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pasteles.	70

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1.** Formulaciones de pan integral con enzimas y su actividad enzimática. 54
- Cuadro 2.** Valores fisicoquímicos obtenidos con diferentes concentraciones de enzimas maltogénicas en formulaciones de pan. 58
- Cuadro 3.** Tabla con diferentes parámetros de suavidad y viscoelasticidad de panes empleando enzimas maltogénicas libres y encapsuladas. 64
- Cuadro 4.** Diferentes formulaciones de pan blanco con enzimas maltogénicas y enzimas maltogénicas de alto rendimiento. 67
- Cuadro 5.** Tabla con los valores obtenidos de diferentes atributos sensoriales de las tres diferentes formulaciones. 72

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Grafica de barras que indica la diferencia entre volúmenes específicos en formulaciones de pan con la implementación de enzimas maltogénicas y enzima amilasa. 52
- Figura 2.** Graficas de barras que representan la producción de maltoligosacaridos referentes a la formación de maltosa tras la aplicación de enzimas maltogénicas y amilasas tras varios días de reposo. 53
- Figura 3.** Grafica de barras que representan la producción de azúcares y maltoligosacaridos tras la aplicación de enzimas de en pan integral durante tiempos de 2h, 22h y 48h. 55
- Figura 4.** Grafica de barras que representan la producción de azúcares y maltoligosacaridos tras la aplicación de enzimas de en pan integral durante tiempos de 2h, 22h 48h y 96h. 56
- Figura 5.** Imágenes de la miga y poros de las formulaciones de pan a diferentes concentraciones de enzimas maltogénicas. 57
- Figura 6.** Encapsulación de amilasa maltogénica con Beeswax (combinación de cera con maltodextrina) 62
- Figura 7.** Micrografías con Microscopio electrónico de barrido (SEM) de la miga de diferentes panes sin gluten. (a) Control, sin MAase y BW; (b) con MAasa libre; (c) contiene BW; (d) contiene MAase encapsulada en BW. La ampliación fue de 100×. 63
- Figura 8.** Prueba de amasado en forma de bola de la miga del pan. 68
- Figura 9.** Rebanadas de pastel con 20g/100 g de grasa y a: 0, b:500 y c:1000 mg/kg de α -amilasa maltogénica. 71

RESUMEN

La finalidad de este trabajo es el de analizar como la aplicación de las enzimas maltogénicas influye en las propiedades fisicoquímicas de los productos de panificación mediante el empleo de una revisión documental de diversos estudios recientes. Las enzimas, reconocidas como aditivos GRAS (Generalmente Reconocidos Como Seguros), son coadyuvantes tecnológicos que, con dosis mínimas, pueden mejorar significativamente atributos de textura, volumen, suavidad, humedad y vida útil del pan. En particular, las amilasas maltogénicas promueven la producción de maltosa y otros maltoligosacáridos durante el almacenamiento, permitiendo reducir el contenido de azúcares añadidos sin comprometer la calidad sensorial.

Durante la revisión se evaluaron diversas formulaciones en productos de panificación; integrales, sin gluten, blancos y pasteles utilizando enzimas libres y encapsuladas. En todos los casos se observaron mejoras en las propiedades fisicoquímicas de porosidad, elasticidad, color y vida útil que dependían o estaban en función de la concentración empleada en las diversas formulaciones. Las enzimas encapsuladas mostraron un mejor rendimiento a través del tiempo.

El análisis de la información confirma que el empleo de las enzimas maltogénicas puede ser una opción viable para mejorar caracteres reológicos de las masas y a su vez ser una alternativa viable para la mejora de formulaciones, aportar en la reducción de costos y también en el desarrollo de productos de panificación innovadores y más saludables. Tecnológicamente las enzimas en los próximos años pueden posicionarse como una herramienta primordial para el desarrollo de alimentos funcionales, beneficiando en el aspecto costo-beneficio, mientras conserva su calidad y optimiza la producción.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo efectúa una investigación documental de diversas fuentes, acerca de las enzimas maltogénicas como aditivo en el sector de panadería con la finalidad de evidenciar la mejora en las formulaciones y propiedades fisicoquímicas del pan y productos de panificación, debido a que en la actualidad, muchas de las formulaciones están adicionadas con exceso de azúcares y grasa, por ello las formulaciones deben ser elaboradas tomando en cuenta las necesidades del consumidor; asegurando alimentos saludables y de calidad, manteniendo por mayor tiempo sus características fisicoquímicas de textura, viscoelásticas y uniformidad de la miga que son fundamentales en aspectos de textura, sensoriales de sabor y la apariencia. Las enzimas son un aditivo que se requiere en cantidades mínimas en las formulaciones ya que al estar concentradas y ser adicionadas a los productos de panificación, es más sencillo adquirir los caracteres deseados. Por otra parte, las enzimas también cuentan con funciones de conservación que impactan directamente en la vida de anaquel del pan, en donde dependiendo del tipo de enzima junto con la concentración utilizada, puede ocasionar que el pan mantenga durante más tiempo su textura en la miga o inclusive su color, lo que permite ahorrar en costos ya que se genera menos cantidad de desperdicio.

Por ello, el objetivo del trabajo es recopilar información documental enfocada en el uso de las enzimas maltogénicas y como la adición de estas impacta las características de los productos de panificación.

El empleo de estos coadyuvantes tecnológicos es relativamente novedoso y siempre va a estar en función de las condiciones óptimas, así como los ingredientes y aditivos necesarios, esta alternativa sugiere de igual forma un ahorro en las formulaciones y por ende en la producción de productos de panificación convirtiéndose en una ruta viable para mejorar e innovar en la industria.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

Actualmente la información relacionada con el uso de las enzimas maltogénicas está en desarrollo, ya que constantemente se está investigando su implementación en productos de panificación, al ser coadyuvantes que están dando sus primeros pasos en la producción de este tipo de productos. También se está recolectando información de sus efectos positivos en las características fisicoquímicas de los productos obtenidos con las formulaciones incorporando enzimas maltogénicas. Estas enzimas usualmente provienen de microorganismo que a través de procesos metabólicos producen este tipo de enzimas que pueden ser aprovechadas los productos de panificación, además una de las cosas más favorables de este tipo de coadyuvante es que en cantidades pequeñas puede proporcionar el efecto deseado, se reconocen como seguras (GRAS). Con el uso de las enzimas maltogénicas, los productores e investigadores consideraran la elaboración de productos de panificación como una alternativa más viable, no solo por la seguridad de que su incorporación es inocua, si no que al ser enzimas que convierten los almidones en azúcares, el empleo de azúcares se verá reducido en las formulaciones de los productos de panificación optimizando también los procesos y formulaciones. La α -amilasa maltogénica provenientes de *Geobacillus stearothermophilus* aumenta los niveles de dextrina en el pan de trigo. Las dextrinas obstaculizan la cristalización de hélices de amilopectina y puede aumentar la humedad relativa de la miga con lo que la retrogradación del almidon en los productos de panificación se ve retardada. En cuanto a la cantidad de azúcares que un pan puede contener tras el empleo de las enzimas maltogenicas con la finalidad de ser considerada en la formulación, se encontró en el siguiente trabajo propuesto por Chen et al. (2021), que el pan tratado con amilasa maltogénica el día 1 también tenía una cantidad elevada de maltosa. Además, constaba de una pequeña cantidad de maltotriosa, maltotetraosa y maltopentaosa. El día 14, se observó un nivel más alto de maltosa ($62,7 \pm 1,3$ mg/g de miga en base seca) en comparación con el que se pudo observar el día 1, lo que indica que la amilasa maltogénica podría seguir activa después del horneado. Además, el contenido significativamente mayor de maltosa observado en el pan que contiene amilasa maltogénica en comparación

con los otros dos tipos de panes analizados el día 14 podría deberse a los diferentes modos de acción enzimática, ya que la amilasa maltogénica hidroliza principalmente los polímeros de almidón en maltosa. De acuerdo a un estudio realizado por Chen et al., 2021 revela que la viscosidad máxima se puede reducir cuando se añaden amilasas. Lo más probable es que esto se deba a la hidrólisis de las moléculas de almidón por las amilasas, lo que provoca una reducción del tamaño molecular. Según Rebholz et al., citado en Chen et al., 2021. La amilasa maltogénica degrada las moléculas de amilopectina relativamente lentamente y, por tanto, tiene un impacto menor sobre el peso molecular del almidón. El tamaño molecular reducido del almidón a su vez daría como resultado una menor viscosidad. El trabajo anteriormente mencionado aporta un panorama más claro sobre como influyen las enzimas maltogénicas en la viscosidad de los panes y esto da como resultado en la disminución de la misma en estos productos, lo que puede provocar que la red de que se forma de gluten se vea debilitada, derivando en productos de panadería más desmoronables, lo que impactaría directamente en la textura del pan. Las imágenes mostradas en un estudio realizado por Barbosa et al. (2018) Se puede observar la estructura heterogénea causada por el tamaño de poro, formado durante el proceso de horneado y generación de CO₂. La heterogeneidad del tamaño de poro aumentó con la concentración de las Nuevas Generaciones de Enzimas (NGE), es decir, mostró una estructura de miga densa y menos uniforme. El aumento de la concentración de Nueva Generación de Enzimas (NGE), producción excesiva de dextrinas como recurso de azúcares fermentables indujo una estructura de poros con características similares a la formulación B0 (sin empleo de enzimas), aunque sin un nivel de agua aceptable, contenido (54-58% p/p del peso total de la formulación). Esto está de igual forma relacionado con la reducción de la viscosidad, mencionado en el párrafo anterior debido a que la red de gluten se ve afectada por la reducción del almidón a azúcares más simples como las dextrinas, lo que ocasiona que los poros de la miga cuenten con tamaños variados y falta de homogeneidad que está en función de la cantidad de dextrinas formadas durante la hidrólisis de las cadenas alargadas de almidón, derivando de cierto modo en una afectación hacia la estructura del pan en general (Barbosa et al., 2017).

CAPITULO II
IMPORTANCIA DE LA
TEMÁTICA

2. IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA

La importancia de este trabajo radica en reunir información con respecto al uso de enzimas maltogénicas en los productos de panificación, con la finalidad de tener un panorama exacto e informativo que permita conocer las ventajas del uso de estos coadyuvantes, así como los beneficios fisicoquímicos que adquiere el pan una vez que se emplean en las cantidades pertinentes. También se busca indagar respecto a cómo se modifica o altera la composición del pan en cuanto las cantidades de azúcares o carbohidratos adicionados en las formulaciones que a su vez permitirá diseñar formulaciones con menos azúcares añadidas, ofreciendo beneficios a los consumidores. Por lo tanto, es importante tener en cuenta las condiciones para usar las enzimas, así como las condiciones del proceso de horneado cuando se implementan. Otro aspecto importante es vislumbrar como las enzimas actúan en la red de gluten que tiene efecto en la porosidad y tamaño del producto terminado (pan), así como en la conservación de este después de varios días o semanas en el anaquel. También se documentará información respecto a cómo el uso de estas enzimas puede beneficiar los costos de producción de los productos de panadería, lo que significaría un menor costo en comparación al uso de formulaciones convencionales.

CAPITULO III
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La adición de enzimas maltogénicas evita agregar cantidades excesivas de azúcares a las formulaciones de panificación e influye positivamente en las propiedades fisicoquímicas texturales, de porosidad y viscosidad para posteriormente mantenerlas en su tiempo de vida de anaquel?

CAPITULO IV

OBJETIVOS

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

- Analizar como las enzimas maltogénicas influyen en las propiedades fisicoquímicas de los productos de panificación.

4.2 ESPECÍFICOS

- Analizar la composición y los procesos de panificación tradicionales y los adicionados con enzimas.
- Indagar sobre los tipos de enzima que pueden ser utilizados en los productos de panificación.
- Identificar las características fisicoquímicas de interés en los productos de panificación.
- Analizar y comparar las distintas formulaciones de productos de panificación adicionados con enzimas malotgenicas para verificar los beneficios que se pueden obtener con su uso.

CAPITULO V

JUSTIFICACIÓN

5. JUSTIFICACIÓN

La finalidad de este trabajo de investigación es documentar y recopilar de fuentes informativas como los libros, artículos o documentos de internet información con respecto al empleo de las enzimas en las formulaciones de panificación, tomando como consideración aspectos fisicoquímicos del pan como su textura, humedad, volumen, miga y color en relación a la calidad que el producto debe de presentar. El empleo de las enzimas en la panificación actualmente es un tema de sumo interés para la tecnología de alimentos ya que a través de este coadyuvante se pueden mejorar y optimizar las formulaciones, ayudando a que los costos disminuyan mientras a su vez se obtienen panes con la calidad e inocuidad buscadas en el mercado de la panificación. Uno de los beneficios más remarcables del uso de las enzimas en panificación es que se ocupan en cantidades mínimas para lotes o cantidades grandes de producto por lo que puede ser muy redituable el adquirir cantidades pequeñas de enzima para utilizarse en grandes volúmenes de pan, otra ventaja es que hay varios microorganismos que a través de procesos metabólicos fermentativos pueden proporcionar las enzimas por lo que independientemente de que no se cuente con algún microorganismo en específico se puede ocupar otro con caracteres similares para producir las enzimas que se buscan y así implemente el efecto deseado. Aunque, las enzimas son coadyuvantes relativamente nuevos en el uso de productos de panadería, pueden ser de suma utilidad para los nuevos procesos que se desarrollan día con día para garantizar mejoras e innovaciones en los productos de panificación que pueden ser llamativos o requeridos por los consumidores regulares de pan.

CAPITULO VI

MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADOS

6. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADAS

El tipo de método empleado para la realización de este trabajo de investigación relacionado con los productos de panificación y el uso de las enzimas maltogénicas en las formulaciones es el documental, ya que se busca consultar diversas fuentes de investigación tanto físicas como electrónicas para encontrar información de relevancia que permita aportar un panorama más completo sobre los usos de las enzimas maltogénicas en la panificación, así como los beneficios en sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales.

Una de las razones principales por las cuales es primordial abordar esta temática es debido a que la información actualmente sobre el uso de las enzimas maltogénicas es escasa, y es difícil de encontrar información disponible, además de que el uso de las enzimas en las formulaciones de panificación es un tema relativamente nuevo en el área de la alimentación por lo que hoy en día se sigue experimentando y descubriendo nuevos tipos de enzimas que permitan una mejora considerable en esta clase de productos. Actualmente las cantidades que se ocupan de las enzimas son relativamente bajas puesto que con cantidades mínimas se puede alcanzar el efecto deseado. Finalmente vale la pena remarcar que el objetivo es conseguir información del tipo cualitativa que permita aportar una mayor claridad al tema, además de qué pueda resumir la relevancia de incorporar estas enzimas en. Los productos de panificación, mientras a su vez permita ser un documento para futuras referencias.

CAPITULO VII

DESARROLLO TEMÁTICO

7. DESARROLLO TEMÁTICO

7.1 Definición de pan

El pan es un alimento básico muy relacionado con la vida diaria de las personas. Se prepara horneando una masa que se compone de harina, agentes leudantes y agua. El pan es popular en todo el mundo y uno de los alimentos más antiguos. Se le reconoce como una fuente importante de carbohidratos en la pirámide alimenticia que garantiza a una persona que pueda obtener la nutrición suficiente para su organismo (Ibrahim et al., 2015).

7.1.1 Tipos de pan

7.1.1.1 Pan étnico occidental

Masa madre es un término utilizado para describir el pan producido donde el agente leudante es un producto natural levadura o bacteria salvaje, el pan tiene un característico sabor agrio sabor y es tan antiguo como la propia historia del pan con levadura. Los tipos de pan reconocidos son de acuerdo con Collar,2016:

- Pan Pita: es el más antiguo de los tipos de pan conocidos, lo que indica una gama de posibles países de origen que rodean el Mar Mediterráneo.
- El pan de agave es un pan de trigo ligeramente leudado, que se enrolla y tiene forma redonda u ovalada y tamaño variable, es comúnmente utilizado como envoltura para una variedad de panes rellenos o enrollados.
- El pan de hogar debe tener un aspecto, sabor y aroma distintivos con un sabor abierto y textura gruesa. Baguette (pan francés y pan de Viena) es un estilo de pan duro y crujiente. La baguette es más blanca, más ligera y dulce que el tradicional pan de masa madre que estaba destinado a reemplazar. La baguette de color marrón dorado, con su corteza crujiente, sabor dulce, aspecto externo característico con cortes superficiales y migajas blancas con grandes agujeros irregulares, es uno de los estilos de pan más famosos del mundo. Pan de solera es el término utilizado para describir el tradicional método de horneado en el que se hornea un trozo de masa fermentada. Se deja fermentar el bizcocho hasta 4 h antes.

- La focaccia se originó con los antiguos griegos. Es probable que sea temprano precursor de la pizza y, aunque popular en Italia, se ha extendido por todas partes. sobre el mundo. Se compone de una masa de pan con levadura, a menudo mezclado o untado con aceite, hierbas, cebolla, ajo, salvia, romero u orégano, y cocinado rápidamente a altas temperaturas.
- Un bagel es un panecillo tradicionalmente moldeado a mano en forma de un anillo de masa de trigo con levadura, que inicialmente se hierve durante un poco tiempo en agua y luego al horno. El resultado es una densa, Interior masticable y pastoso con una superficie dorada y con exterior crujiente.

7.1.1.2 Pan étnico

Están hechos de una variedad de distintos cereales, especialmente sorgo, mijo africano y teff, y parecen panques. A diferencia de los panqueques que se sirven en Occidente, muchos de estos productos tienen una textura leudada y un sabor ácido, estas características son el resultado de una mezcla de ácido láctico, fermentación de bacterias y levaduras. Estas características son el resultado de una mezcla de ácido láctico, fermentación de bacterias y levaduras. Probablemente los dos panes más conocidos sean el injera y el kiswa, de textura esponjosa de unos 5 mm de espesor procedente de Etiopía y Eritrea. Su superficie tiene apariencia de panal, muy similar a una esponja, creado por el dióxido de carbono que se escapa durante la cocción al vapor, en comparación con la injera elaborada con otros cereales como sorgo, Kiswa, de Sudán, es mucho más delgada (1–1,5 mm de espesor) y más pequeña (30 cm de diámetro) que la Injera. Es más, como una oblea delgada y flexible (Collar, 2016).

7.1.1.3 Pan con valor agregado

Los productos de panificación con valor agregado son aquellos en los que se hace uso de materias primas tradicionales como ingredientes que aporten una propiedad funcional, como la avena, arroz, maíz, sorgo, mijo, quinoa, amaranto y el trigo que han adquirido una posición especial, como Ingredientes básicos utilizados solos y/o

en mezclas para hacer panes funcionales de trigo, sin gluten y con aceptabilidad sensorial y valor nutricional. Incorporación de garbanzos y guisantes en la fórmula del pan que retrasa la hidrólisis del almidón y el índice glucémico. El uso de harina de soja desgrasada que promueve el aumento de la actividad antirradicalaria del pan. (Collar,2016)

7.1.2 Características del pan

El pan es un alimento universalmente aceptado como importante para todas las poblaciones. Es una buena fuente de macronutrientes (carbohidratos, proteínas y grasas) y micronutrientes (minerales y vitaminas) que son esenciales para la salud humana (Nwokorie y Ezeibe, 2017).

El pan fresco es un producto con una vida útil corta y durante su almacenamiento se producen una serie de alteraciones químicas y físicas conocidas como envejecimiento. Como resultado de estos cambios, la calidad del pan se deteriora gradualmente a medida que pierde su frescura y su textura crujiente, mientras que la firmeza y rigidez de la miga aumentan. El agradable aroma desaparece y el sabor produce una sensación rancia (Giannou, 2003).

El volumen del pan se ve afectado por el proceso de fermentación de la masa, durante el cual se libera dióxido de carbono, fermentando la masa y provocando un aumento en el volumen del pan. Mientras que una masa mal cocida y sometida a cocción producirá pan de pequeño volumen. El proceso prolongado de fermentación tiene un efecto negativo sobre la plasticidad del gluten, produciendo panes de volumen reducido. La ampliación del tiempo de amasado de la masa, hasta un límite, permite obtener pan de gran volumen, mientras que un amasado excesivamente prolongado provocará que el pan producido sea de calidad insatisfactoria. La porosidad se define como la relación entre el volumen del pan ocupado por los poros y el volumen total del pan. La determinación de la porosidad del pan se puede realizar con la ayuda de las llamadas tablas Dallman (Błaszczak et al., 2004 citado en Różyło y Laskowski,2011). La estructura celular de la miga del

pan tiene un efecto considerable en sus propiedades mecánicas. Scanlon et al. ,2000 observaron que las características de la microestructura de la miga del pan estaban relacionadas con la estimación de su textura. La humedad de la miga, es otro índice importante de la calidad del pan, , también se realizan mediciones de la actividad del agua con la ayuda de medidores automáticos especiales. Las propiedades mecánicas de la miga del pan se determinan comúnmente mediante una prueba de compresión simple o doble (prueba TPA) (Różyło y Laskowski,2011).

7.2 Proceso de elaboración del pan

El proceso de elaboración del pan depende de las características específicas y tipo de producto a obtener, sin embargo; se puede de forma general abordar las siguientes operaciones mencionadas en Mesas y Allegre, 2002:

- Amasado: Sus objetivos son lograr la mezcla íntima de los distintos ingredientes y conseguir, por medio del trabajo físico del amasado, las características plásticas de la masa, así como su perfecta oxigenación.
- División y pesado: Su objetivo es dar a las piezas el peso justo. Si se trata de piezas grandes se suelen pesar a mano. Si se trata de piezas pequeñas se puede utilizar una divisora hidráulica, pesando a mano un fragmento de masa múltiplo del número de piezas que da la divisora. En las grandes panificadoras donde el rendimiento horario oscila entre las 1000 y 5000 piezas se suele recurrir a las divisoras volumétricas continuas.
- Boleado: Consiste en dar forma de bola al fragmento de masa y su objetivo es reconstruir la estructura de la masa tras la división. Puede realizarse a mano, si la baja producción o el tipo de pan así lo aconsejan. Reposo: Su objetivo es dejar descansar la masa para que se recupere de la degasificación sufrida durante la división y boleado. Esta etapa puede ser llevada a cabo a temperatura ambiente en el propio obrador o mucho mejor en las denominadas cámaras de bolsas, en las que se controlan la temperatura y el tiempo de permanencia en la misma.
- Formado: Su objetivo es dar la forma que corresponde a cada tipo de pan. Si la pieza es redonda, el resultado del boleado proporciona ya dicha forma. Si la pieza es grande o tiene un formato especial suele realizarse a mano. Si se trata de barras,

que a menudo suponen más del 85% de la producción de una panadería, se realiza por medio de máquinas formadoras de barras.

- Fermentación: Consiste básicamente en una fermentación alcohólica llevada a cabo por levaduras que transforman los azúcares fermentables en etanol, CO₂ y algunos productos secundarios. En el caso de utilizar levadura de masa se producen en menor medida otras fermentaciones llevadas a cabo por bacterias. Los objetivos de la fermentación son la formación de CO₂, para que al ser retenido por la masa ésta se esponje, y mejorar el sabor del pan como consecuencia de las transformaciones que sufren los componentes de la harina.
- Corte: Operación intermedia que se hace después de la fermentación, justo en el momento en que el pan va a ser introducido en el horno. Consiste en practicar pequeñas incisiones en la superficie de las piezas. Su objetivo es permitir el desarrollo del pan durante la cocción. Cocción: Su objetivo es la transformación de la masa fermentada en pan, lo que conlleva: evaporación de todo el etanol producido en la fermentación, evaporación de parte del agua contenida en el pan, coagulación de las proteínas, transformación del almidón en dextrinas.

7.3 Propiedades viscoelásticas de la masa para elaboración de pan

Los estudios reológicos en los alimentos han mostrado que se afectan por los cambios químicos en procesos de elaboración de alimentos. En panificación, la viscoelasticidad de la masa es afectada por los cambios producidos por el horneado y son reflejados en el volumen del pan (Gerardo et al., 2019).

Las masas para pan generalmente se formulan con harina de trigo, en las cuales predomina un comportamiento elástico controlado por la fracción de proteína de gluten. Estas propiedades son importantes en la industria panadera, debido al comportamiento de flujo, deformación y recuperación de la masa que permiten determinar las condiciones de procesamiento. (Osorio et al., 2003 citado en Figueroa y Salcedo, 2016).

7.3.1 Definición de viscoelasticidad

La reología está ahora bien establecida como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia. Es el estudio de la manera en que los materiales responden al estrés o deformación aplicados. Todos los materiales tienen propiedades reológicas. Estas propiedades se describen mediante reómetros. Se utilizan muchos tipos de reómetros para medir las propiedades reológicas de la masa, como el penetrómetro, el consistómetro, el amilógrafo, el farinógrafo, el mixógrafo, el extensógrafo y el alveógrafo que se describen más adelante. La masa de pan es un material viscoelástico y adelgazante combinado de un sólido de Hook y un líquido viscoso no Newtoniano. La masa tiene un comportamiento reológico no lineal, pero en deformaciones muy bajas tiene un comportamiento lineal. La cantidad de baja deformación en la que la masa tiene un comportamiento lineal depende del tipo de masa, método de amasado y prueba (Mirsaeeghhazi et al., 2008). La tensión se define como una fuerza dividida por el área sobre la que se aplica esta fuerza. Ambos necesitan magnitud y dirección para describir una fuerza y una tensión, tales variables son llamadas vectores. Se puede aplicar una fuerza

perpendicularmente a una superficie generando un esfuerzo normal o paralelo a una superficie, generando un esfuerzo cortante (Kutz,2013).

La respuesta de fuerza resultante se mide para dar una indicación del material en parámetros como rigidez, módulo, viscosidad, dureza, resistencia o tenacidad. (Bogdan y Morgenstern, 2003).

7.3.2. Importancia de las propiedades reológicas en los productos de panificación

La evaluación de las propiedades reológicas es una herramienta muy útil para observar cambios químicos y físicos en los alimentos a nivel molecular, en cuanto a cocción, extensibilidad, elasticidad, dureza, textura y viscoelasticidad son parámetros reológicos que influyen directamente en el volumen específico del pan. (Gerardo et al., 2019).

Antes de hornear la masa se somete a una serie de tratamientos mecánicos para obtener las propiedades necesarias para producir un pan de cierto tamaño, forma y calidad. Estas acciones aplican tensiones al material en la forma de deformación por corte y alargamiento, predominando el comportamiento de corte cuando el material está en contacto con Interfaces sólidas, por ejemplo, en extrusión y corte (Hicks et al., 2011).

7.3.3 Propiedades reológicas y enzimas en los productos de panificación

Cuando se añade agua a la harina y se mezcla, se produce una progresión de cambios. Las partículas de harina se hidratan. La masa se vuelve gradualmente más cohesiva, perdiendo su aspecto húmedo y grumoso, produciéndose una masa suave, aparentemente homogénea, que se endurece a medida que avanza la mezcla, hasta que se alcanza un punto de máxima consistencia (mínima movilidad), finalmente, si se continúa mezclando, la consistencia de la masa disminuye (es decir, la movilidad). Esta disminución suele ser progresiva, generalmente llamada "ruptura" o "reodestrucción", y finalmente da como resultado una masa extremadamente pegajosa pero muy cohesiva, capaz de estirarse en largas hebras. (Frazier et al., s/f)

7.3.3.1 Pasos de la elaboración del pan que influyen en la reología y viscoelasticidad

Durante el proceso de elaboración de productos de panificación se pueden hallar algunos que influyen directamente en la formación de las propiedades viscoelásticas y reológicas que en su mayoría se dan por el gluten que se encuentra en la masa, de acuerdo a Dobraszczyk y Morgenstern, 2003 se da una pequeña descripción a continuación de los procedimientos que influyen más:

7.3.3.1.1 El mezclado es una operación fundamental en el procesamiento de alimentos en la que, además de la función obvia de mezclar los ingredientes, a menudo se forma la estructura del alimento. Por ejemplo, en la producción de rebozados, pastas y masas, la naturaleza de la acción de mezclado desarrolla las propiedades viscoelásticas del gluten y también incorpora aire, lo que tiene un efecto importante en su reología y textura (Dobraszczyk y Morgenstern, 2003)

7.3.3.1.2 El laminado de masa con rodillos es una operación común en la fabricación de productos a partir de cereales. Hay un rango de diferentes productos y materias primas que se laminan. El propósito de las laminar es diferente para cada producto. La masa se lamina en una moldeadora para darle forma y controlar la distribución del tamaño de las burbujas. Las láminas repetidas pueden utilizarse para desarrollar la red de gluten en la masa de pan. Se lamina la masa de galleta tanto para formar la masa como para desarrollar el gluten. La masa de maíz se lamina para producir una lámina de masa cohesiva y masa de hojaldre se lamina y se dobla para producir una estructura en capas. Generalmente, la forma de la masa cambia durante el laminado y las propiedades reológicas de la masa Determinar las tensiones y deformaciones durante el laminado. Se debe tener en cuenta el uso de propiedades reológicas relevantes para la aplicación particular, tomando la magnitud de la deformación y en cuenta la tasa de deformación.

7.3.3.1.3 La fermentación es un paso importante en la elaboración del pan. proceso, donde la expansión de las burbujas de aire previamente incorporado durante la mezcla proporciona la característica Estructura aireada del pan, que es fundamental para su atractivo. (Dobraszczyk et al., 2000).

A continuación, también se aporta información sobre factores que importan o influyen directamente en la reología y viscoelasticidad de los productos de panificación de acuerdo a Emam-Djomeh et al., 2008

7.4 Factores que afectan la reología de los productos de panificación

Efecto de las enzimas añadidas. La masa de trigo contiene algunas enzimas como α y β -amilasa, proteasa, lipasa, fosfatasa y oxidasa. Estas enzimas se vuelven inactivas cuando el grano de trigo no germina. El efecto de las enzimas sobre las propiedades reológicas de la masa depende de la temperatura. Los módulos elásticos (G') aumentan lentamente con el tiempo a temperatura ambiente, mientras que durante el mismo tiempo (2 h) a 40°C, se observó un valor máximo de fluido por una disminución continua de módulo de almacenamiento (G'). El ángulo de fase, δ , aumenta ligeramente con el tiempo a 40°C. La presencia de α -amilasa provoca una disminución del módulo de almacenamiento G' después de un período de tiempo más corto y se obtienen valores de almacenamiento (G') más bajos (Lindahl & Eliasson, 1992). El uso de enzimas como peroxidasas o glucosa oxidasa en lugar de oxidantes químicos es una opción muy interesante para mejorar el rendimiento panificador de la masa. La peroxidasa aumenta solo el número o la vida útil de los enlaces transitorios, mientras que la glucosa oxidasa produce además enlaces cruzados que son permanentes en escalas de tiempo de hasta tres horas. La peroxidasa probablemente introduce una segunda estructura más transitoria (red de arabinoxilano) a través de la red del gluten, mientras que la glucosa oxidasa también puede haber fortalecido la red del gluten. La adición únicamente de glucosa oxidasa provoca un aumento del módulo de almacenamiento G' de orden 1,2 y una disminución parcial de la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$).

Los factores que más influyen en la reología son los componentes adicionados en la preparación de las masas, ya que ellos controlan la respuesta al aporte de energía mecánica. Por ejemplo; agua, agentes esterificantes, urea, sales, agentes que afectan los enlaces disulfuro, las subunidades de proteínas presentes. De todos ellos, el agua es la que plastifica la masa. Normalmente, el nivel de agua añadida a

la harina es del orden de 0,6 g de agua por gramo de harina, sin embargo, esto es suficiente para desarrollar la reología de la masa (Amjid et al., 2013).

El principal cambio en la reología de la masa durante el mezclado deriva de factores bioquímicos y físicos. Las tensiones incurridas pueden ser de hasta 500% durante el procesamiento de la mezcla y estos tiene un efecto importante en la disposición molecular. La velocidad de corte en el mezclador elimina la capa exterior de partículas de harina a medida que se hidratan y expone una nueva superficie para la hidratación mientras se forma una masa grumosa de masa. La consistencia de la masa disminuirá a medida que el mezclado y la potencia disminuyen. La elasticidad de la masa disminuye y la masa se vuelve cada vez más extensible, si se mezcla demasiado, se vuelve demasiado pegajoso. Molecularmente, los cambios físicos que aparecen en la masa durante el proceso de mezclado resultan de la formación de una red de gluten, por la interacción de gliadinas y gluteninas hidratadas. La presencia de agua proporciona un medio para las interacciones moleculares y reacciones entre proteínas de la harina. Tanto los procesos químicos como los físicos ocurren y funcionan al mismo tiempo o en conjunto. El ácido ascórbico es un aditivo oxidante (a menudo conocidos como mejoradores) que acelera el proceso de desarrollo, pero requiere oxígeno a través del proceso de aireación de la masa. Las moléculas de glutenina se estiran y extienden en hebras formando películas. El proceso de mezclado ayuda a alinear las moléculas de gluten para construir una red formada por moléculas de glutenina no ramificada. La alineación de las moléculas de glutenina conduce a una gran cantidad de compuestos no covalentes como los enlaces de hidrógeno, los enlaces hidrófobos y el entrelazamiento de cadenas (Chin y Martin, 2014).

La adición de grasa a la masa tiene como objetivo mejorar la retención de gas de la masa mediante la estabilización de las burbujas de gas. La adición de grasa provoca que se forme el complejo lípido-almidón, cuya porción hidrocarbonada del lípido se forma junto con la cavidad helicoidal de amilosa, lo que reduce la solubilidad en agua e inactiva tanto la α -amilasa como la β -amilasa. Además, se forma el complejo con la fracción de amilopectina. Así, se alteran las características reológicas de la

masa y del pan. Se reduce la naturaleza elástica de la masa y puede aparecer el encogimiento de la masa durante el moldeo. Además, se produce una gelatinización insuficiente del almidón que influye en las propiedades texturales (Clegg et al., 2011 citado en Srikanlaya et al., 2017). Usualmente para la panificación se utilizan productos como la manteca, la mantequilla o margarina que cuentan con combinaciones de distintos tipos de grasa, normalmente se utilizan dependiendo el tipo de pan a elaborar, esto debido a que aportan diferentes propiedades texturales que se ven reflejadas en la reología del pan. Por ello, es importante mantener un equilibrio en su formulación para garantizar que el producto de panificación final no muestre una textura muy rígida.

Se sabe que la adición de huevo en las formulaciones de panificación estabiliza la estructura de la miga en productos horneados, mientras que sus propiedades espumantes tienen el potencial de soportar las estructuras de la miga de pan a través de la dispersión, la unión a polisacáridos y la estabilización de burbujas de gas en ausencia de gluten (Crockett et al., 2011; Kato et al., 1993; Schober, 2009 citado en Ahlborn et al., 2022).

Dicho de otra forma, el huevo es un excelente agente estabilizante para la masa de los productos de panificación que puede reforzarse aún más con la interacción del gluten y sus respectivas proteínas (gliadinas y gluteinas). Este efecto permite tener una red más fuerte y elástica que aporta propiedades deseables de textura y porosidad al pan.

La temperatura promueve la formación de estructuras, La red proteica se vuelve relevante y cuanto menor es el nivel del huevo, menor es el valor de la fuerza y extensión de la red. Esto indica que las proteínas del huevo afectan fuertemente la respuesta mecánica sólo después del proceso de gelificación. Estos efectos pueden atribuirse al almidón y las interacciones de proteínas; Se sabe (Rao, 1999 citado en Migliori et al., 2009) que la proteína y el almidón son polímeros termodinámicamente diferentes y su presencia conjunta puede conducir a consecuencias significativas sobre la textura, dependiendo de las interacciones específicas, las dos redes actúan de forma independiente y el total de la fuerza depende de ambos.

7.4.1 Efecto de la temperatura sobre la reología de la masa.

El efecto de la temperatura en los módulos de almacenamiento y pérdida. (G') y (G'') disminuyen al aumentar la temperatura antes de 87°C . La disminución de G' es causada por la complejidad del comportamiento del flujo del polímero y el aumento de la movilidad molecular y cuando la temperatura aumenta a 90°C , G' aumenta gradualmente. Este fenómeno se puede atribuir a las interacciones de reticulación que se inducen en el gluten durante la formación de la estructura de red. Las interacciones proteína-proteína a través de reacciones de intercambio de tioldisulfuro comenzarían a proporcionar una estructura cada vez más reticulada, lo que daría como resultado valores de G' más altos y, en general, de G'' más bajos.

7.4.2 Retrogradación del almidón o endurecimiento de la masa

La calidad del gluten, especialmente su capacidad para agregarse y el contenido de almidón junto con la cantidad del agua, son los tres parámetros principales que explican el grado de endurecimiento de la masa. El endurecimiento de la masa observado en ensayos reológicos que involucran grandes deformaciones uniaxiales debe deberse al comportamiento dilatante de los agregados de almidón. Aumenta cuando se reduce el contenido de agua o cuando se aumenta el contenido de almidón, ya sea mediante la adición de almidón o cuando el contenido de proteína de la harina es bajo (Kieffer y Stein, 1999).

Los principales tipos de pruebas reológicas fundamentales utilizadas en las pruebas de cereales son: oscilación dinámica, fluencia y relajación de tensiones, mediciones extensionales y viscosimetría de flujo (Dobraszczyk, 2004; Ajmid et al., 2013).

La reología de los productos de panificación se puede describir a través de diferentes parámetros De acuerdo a Dahiya et al., 2020:

- **Elasticidad:** Es el grado en que una porción de masa intentará restaurar su forma original después de que se haya eliminado la fuerza deformante.
- **Extensibilidad:** La capacidad de la masa para cambiar de forma o estirarse. Las presiones de moldeo y láminas intervienen como fuerzas deformantes. **Resistencia a la deformación:** Es similar a la suavidad de la masa. Debe tener cierta resistencia

a la deformidad y se relaciona con facilidad de cambio de forma en el momento del moldeado y laminado para evitar daño e inestabilidades.

El tratamiento enzimático de las harinas de trigo es una alternativa interesante para mejorar sus propiedades funcionales. Dado que enzimas con diferentes actividades bioquímicas podrían inducir efectos sinérgicos sobre el comportamiento de la masa o la calidad del producto, el uso individual y combinado de una amplia gama de enzimas (glucosa oxidasa, transglutaminasa, lacasa, proteasa, pentosanasa, α -amilasa) aplicadas hoy en día en el pan. La mezcla de enzimas permite mejorar el comportamiento reológico de las masas y la calidad del producto final. La presencia simultánea de transglutaminasa (TG) y glucosa oxidasa (GO), así como de transglutaminasa (TG) y proteasa (PROT) produce un efecto sinérgico sobre los parámetros alveográficos. Las enzimas que degradan polisacáridos ejercen un efecto significativo sobre la reología sólo cuando se usan en combinación con otras enzimas, afectando principalmente a los parámetros consistográficos (Caballero et al., 2007).

La masa de pan es un material viscoelástico y adelgazante combinado de un sólido Hookeano y un líquido viscoso no Newtoniano. La masa tiene un comportamiento reológico no lineal, pero en deformaciones muy bajas tiene un comportamiento lineal. La cantidad de baja deformación en la que la masa tiene un comportamiento lineal depende del tipo de masa, método de amasado y prueba. El módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') pueden describir las propiedades reológicas de los materiales.

7.4 Funciones de los ingredientes en panificación

Cada uno de los ingredientes usados y adicionados en los productos de panificación juegan un rol importante en el desarrollo de la masa y por ende de sus características fisicoquímicas. A continuación, se describen las características físicas y químicas de los ingredientes principales usados en las diferentes formulaciones de productos de panificación.

7.4.1. Harina

La harina de trigo es el principal ingrediente en la elaboración de pan por tener las proteínas gluteninas y gliadinas que, al mezclarse con agua, forman el gluten que al combinarse con el almidón forman estructuras que favorecen la retención de gases para, después de la cocción, tener un producto elástico y poroso. Aproximadamente el 85 % del total de las proteínas están representadas por estas dos en una proporción de 3:2 (glutenina: gliadina). Cada una de ellas tiene un efecto sobre las características del gluten. En éste las gluteninas se encuentran polimerizadas mediante puentes disulfuro formando un esqueleto insoluble. Su firmeza depende del tipo de subunidades implicadas y el grado de polimerización, por lo que la presencia de aminoácidos que favorezcan los puentes disulfuro es de importancia (Calvo et al.,2020).

7.4.2 Gluten

El gluten es el principal responsable de diversos tipos de pan elaborados a partir de harina de trigo. El trigo está compuesto aproximadamente en un 50% de prolamina, proteínas solubles en alcohol, que tienen diferentes denominaciones según su origen. En el trigo, la fracción soluble en alcohol se llama gliadina. El gluten es sumamente importante para la industria alimentaria porque confiere características de calidad, especialmente en productos de panadería. En el caso de la harina de trigo, la gliadina es la responsable de la cohesividad de la masa y la glutenina es la responsable de la resistencia a la extensión de la masa (Hoseney, 1994).

Las propiedades funcionales de la masa de pan dependen en gran medida de las proteínas que forman la red del gluten. Las enzimas afectan a diferentes fracciones proteicas (gluteninas, gliadinas, albúminas o globulinas) según su particular mecanismo de acción. El tipo de proteína que se reticula parece ser más importante que el agente reticulante o el tipo de reticulación formada y está altamente correlacionado con el carácter de los cambios cualitativos en el producto final. Se han reportado como mejoradores de la calidad del pan. Las enzimas fortalecedoras son aquellas que se implementan para mantener y mejorar las propiedades

texturales, de porosidad y la vida de anaquel de los productos de panificación a través de la optimización de la red de gluten. Se ha reportado que TG/amilasa/hemicelulasa (Gottmann y Sproessler, 1994) y TG/pentosanasa/ α -amilasa (Bollaín et al, 2005; Collar et al., 2005; Collar y Bollaín, 2005 citado en Caballero et al.,2007) mejoran la calidad del pan. Se han propuesto como una forma de contribuir activamente a la calidad del pan fresco y al comportamiento de envejecimiento durante el almacenamiento.

El gluten se puede fraccionar aún más en gliadinas monoméricas solubles en alcohol y gluteninas poliméricas insolubles. La propiedad viscoelástica única del gluten se atribuye principalmente a la glutenina elástica y gliadina viscosa. Las gluteninas están compuestas de proteínas polimerizadas con un peso molecular que oscila entre 100.000 y millones Da, que están entrecruzados con subunidades individuales intermolecularmente, enlaces disulfuro y contribuye a la resistencia y elasticidad de la masa. La gliadina es una mezcla de proteínas monoméricas de 30.000 a 80.000 Da y confieren propiedades espumosas y viscosas a la masa. Durante el desarrollo de la masa en la etapa de mezclado, la hidratación y los cambios conformacionales de las proteínas del gluten ocurrirían simultáneamente. (Sang et al., 2020)

7.4.3. Leche

La leche en polvo, leche fresca y suero se utilizan a menudo para proporcionar lactosa al producto final, Proteínas y sales minerales. Las sales aumentan la consistencia de la masa, haciéndola más moldeable, desacelerando; fermentaciones secundarias, reacción de Maillard y favoreciendo la formación de costra (Perego et al., 2007).

7.4.4 Agua

Es el segundo componente mayoritario de la masa y es el que hace posible el amasado de la harina. El agua hidrata la harina facilitando la formación del gluten, con ello y con el trabajo mecánico del amasado se le confieren a la masa sus

características plásticas: la cohesión, la elasticidad, la plasticidad y la tenacidad o nervio (Calvel, 1983 citado en Mesas y Allegre, 2002).

7.4.5. Levadura

En panadería se llama levadura al componente microbiano aportado a la masa con el fin de hacerla fermentar de modo que se produzca etanol y dióxido de carbono. Este dióxido de carbono queda atrapado en la masa la cual se esponja y aumenta de volumen. (Mesas y Allegre, 2002).

Durante la fermentación, la levadura convierte la glucosa en (principalmente) dióxido de carbono y etanol, lo que lleva a una celda de gas más grande y volumen de masa de pan. Para obtener una estructura de miga fina, es necesario conservar tantas celdas de gas como sea posible, estabilizar la interfaz de las celdas de gas y evitar la coalescencia (Pareyt et al., 2011).

7.4.6. Sacarosa

Tiene muchas funciones en los alimentos además de proporcionar dulzor. En pequeñas cantidades, el azúcar agregado ayuda a que la levadura comience a producir gas para levantar la masa de levadura. El azúcar en grandes cantidades ralentiza la fermentación de la levadura; en una masa muy dulce el tiempo de levado es mayor. El azúcar ablanda la masa y los productos rebozados y puede ayudar a que el producto horneado se dore. La humedad se retiene mejor en los panes endulzados que en los panes sin azúcar. Reducir la cantidad de azúcar en más de 1/3 puede provocar pérdida de suavidad, humedad, dorado y dulzor. El volumen puede aumentar en una receta de pan cuando se reduce el azúcar. (Lauterbach y Albrecht, 1994)

7.4.7 Sal

Se utiliza para realzar los sabores y la dulzura de otros ingredientes de los alimentos. Si se omite o reduce la sal, se deben aumentar ligeramente otras especias o saborizantes de la receta. En la masa de levadura, la sal retarda la fermentación de la levadura. Omitir o reducir la cantidad de sal en la masa de

levadura puede hacer que la masa suba demasiado rápido, afectando negativamente la forma y el sabor del pan. (Lauterbach y Albrecht, 1994)

7.4.8. Lípidos: mantequilla, aceite, manteca

Los lípidos de la harina de trigo influyen en la retención de gases y la estabilidad de la espuma. La manteca afecta la retención de gases a medida que los cristales de lípidos se adsorben en el Interfaz de la celda de gas. Dependiendo de su naturaleza, los tensioactivos impactan el gas, estabilidad celular y/o crear una red de gluten más fuerte (Pareyt et al., 2011).

Los lípidos para las formulaciones panarias, se pueden agregar en forma de manteca o mantequilla (lípidos -sólidos) y aceite (lípidos- líquidos). Los lípidos naturales no afectan las propiedades de la masa mientras se mezcla, pero sí estabilizan la estructura similar a la espuma de la masa ascendente (Buehler ,2017).

El contenido de lípidos dentro de la composición de un producto de panadería es importante ya que junto con la sinergia de las enzimas maltogénicas que se pueden aplicar, optimizan la elasticidad y por ende la esponjosidad del pan que se esté realizando, debido a que la red de gluten es más estable cuando hay una correcta interacción de macro compuestos, como lo son las proteínas, lípidos y carbohidratos.

La mantequilla se elabora a partir de nata y tiene un contenido de grasa de al menos el 80 por ciento. El 20 por ciento restante es agua con algunos sólidos lácteos. La mantequilla imparte un buen sabor sin sensación grasosa a los productos horneados porque se derrite a la temperatura corporal. (Lauterbach y Albrecht, 1994)

El aceite se utiliza en algunas recetas de muffins, pan y pasteles. La masa de aceite es más harinosa que hojaldrada. Si se usa aceite en lugar de grasa sólida para algunas recetas de pasteles, la textura será más espesa a menos que se aumenten el azúcar y el huevo. (Lauterbach y Albrecht, 1994).

7.4.9. Huevo

El huevo, cumplen muchas funciones en los productos horneados. Agregan sabor y color, contribuyen a la estructura, incorporan aire cuando se baten, aportan líquido, grasa y proteínas y emulsionan la grasa con ingredientes líquidos. Reducir u omitir las yemas de huevo puede resultar en menos suavidad. Reducir u omitir las claras de huevo puede resultar en menos volumen. Es posible que los pasteles elaborados sin la acción emulsionante de la yema de huevo no tengan un sabor y una textura uniformes (Lauterbach y Albrecht, 1994).

7.5. Enzimas adicionadas en productos de panificación

7.5.1. Características

Una enzima es una sustancia que realiza un comportamiento catalítico al regular la velocidad de las reacciones químicas. Una enzima que puede catalizar el proceso de hidrólisis del almidón se llama amilasa. La amilasa maltogénica (MAG1) es un catalizador potencial para producir oligosacáridos. Los oligosacáridos son polímeros de carbohidratos compuestos de dos a diez monosacáridos unidos por enlaces glicosídicos y se han utilizado ampliamente en las industrias alimentaria y farmacéutica. El sabor ligeramente dulce con sensación en la boca característico de los oligosacáridos funcionales los hace adecuados para convertirse en un sustituto parcial de azúcares y grasas para mejorar la textura de los alimentos en la industria alimentaria (Ibrahim, 2018 citado en Kumar et al., 2022).

Las enzimas, en general, se utilizan ampliamente en productos de panadería porque mejoran el volumen, el sabor, el aroma, la suavidad, la estructura de la miga y aumentan la vida útil (Lagrain et al., 2008; Guy & Sahi, 2006 citado en Bedoya y Steel, 2014). La α -amilasa maltogénica se utiliza en la cocción para permitir una hidrólisis extensa de la amilopectina cristalizante, evitando su recristalización (retrogradación) durante el almacenamiento (Bedoya y Steel, 2014).

7.5.2. Enzimas maltogénicas adicionadas a las masas para productos de panificación

Las amilasas maltogénicas exhiben características únicas que se diferencian de otras α -amilasas en que exhiben: Una actividad dual de escisiones de enlaces α -D-1,4 y α -D-1,6-glucosídicos que producen maltosa; una actividad de transglicosilación de α -D-1,4- a α -D-1,3-, α -D-1,4- o α -D-1,6 que genera oligosacáridos de DP 3- 6; y una actividad de escisión de acarbosa, un inhibidor competitivo de pseudotetrasacárido de α - amilasas (Kim et al 1999). Algunas de estas propiedades de las amilasas maltogénicas, si no todas, son compartidas por otras dos enzimas amilolíticas con nombres diferentes, incluidas neopululanasas y ciclomaltodextrinasas, las cuales son homólogas a las amilasas maltogénicas con una identidad de secuencia del 40-86%. Estos tres grupos de amilasas tienen actividad intracelular en bacterias (*Bacillus* sp. y *Thermus* sp) y hongos (*A. oryzae* y *P. expansum*) (Arora,2003)

7.5.3 Enzimas no maltogénicas adicionadas a productos de panificación

7.5.3.1 Alfa amilasas

Las amilasas son las enzimas que descomponen el almidón o glucógeno. Estas enzimas son producidas por una variedad de organismos vivos, desde bacterias hasta plantas y humanos. Bacterias y hongos secretan amilasas al exterior de sus células para llevar a cabo la digestión extracelular, que descompone el almidón insoluble y luego los productos finales solubles (como la glucosa o maltosa) son absorbidos por las células. Las amilasas constituyen una clase de enzimas industriales que ocupan aproximadamente el 25% del mercado. (Pandey et al., 2017)

La alfa-amilasa actúa sobre los enlaces α -1,4-glicosídicos de los polímeros de almidón, produciendo oligosacáridos y dextrinas α -límite. La beta-amilasa y la glucoamilasa luego finalizan la conversión a maltosa, glucosa y dextrinas β -límite adicionales. Las enzimas descalificantes adicionales pueden ayudar a una mayor conversión de polímeros de almidón a glucosa. La hidrólisis de los gránulos de

almidón dañados y la liberación de agua ligada durante la fermentación también influyen en las propiedades reológicas de la masa, especialmente durante la fermentación y las primeras etapas del horneado. Esto genera un mayor volumen de pan en el pan final. Finalmente, la levadura no utiliza toda la glucosa producida por la acción de las amilasas. Una abundancia de azúcares reductores mejora el oscurecimiento de Maillard de la corteza cuando está presente con las proteínas de trigo disponibles (Bock, 2024).

Muchos procesos industriales, ambientales y de biotecnología alimentaria emplean la α -amilasa en alguna etapa u otra. Además de utilizarse como una fuente importante de alimentos (Aditi et al., 2019). En panificación se utiliza en muffins, panecillos suaves, bollos y panes donde se deseen características adicionales, como mejoramiento de la masa o mejor color de la corteza.

La α -amilasa también afecta el antienviejamiento en la cocción del pan y ayuda a mejorar la suavidad (Gupta et al., 2008 citado en Aditi et al., 2019). Esto se da debido a que la enzima al hidrolizar los enlaces α -1,4-glicosídicos genera azúcares más simples y al hacer esto sucesivamente para la levadura es más sencilla metabolizar y por consecuencia producir más CO₂ que aporta mayor porosidad junto con una mayor suavidad en los productos de panificación.

7.5.3.2 Lipasas

Las lipasas se pueden utilizar en productos de panadería para mejorar el procesamiento de la masa, aumentar su resistencia y viscoelasticidad. Pueden mejorar la estabilización de las burbujas de aire en la masa en las primeras etapas del horneado. (Mustafa y Mehmed. 2024)

7.5.3.3 Proteasas

Las proteasas provenientes de *A. oryzae* se mezclan en masa de harina, reducen el tiempo de mezclado y generan un pan con mejor textura y color de corteza. Las proteasas bacterianas se derivan principalmente de *B. subtilis*. Estas enzimas en polvo son muy estables y permanecen activas en un 95% hasta por 1 año. (Aditi et al., 2019).

7.5.3.4 Hemicelulasas

Estas enzimas facilitan la distribución del agua en la masa y el pan, facilitan el procesamiento de la masa, aumentan la tolerancia a la fermentación, la estabilidad del horneado, el rebote en el horno y el volumen del pan, y afectan positivamente el color del pan, la estructura de los poros, la textura y la estabilidad (Cauvain y Young, 2006 citado en Mustafa y Mehmed, 2024)

7.5.3.5 Oxidoreductasas

Las oxidorreductasas son enzimas que catalizan el intercambio de electrones o equivalentes redox entre una molécula donante (reductora) y una aceptora (oxidante) (Dong y Hosene, 1995 citado en Mustafa y Mahmed, 2024). La peroxidasa (POD), el polifenol oxidasa (PPO), la catalasa, la lipoxigenasa y la glucosa oxidasa se encuentran entre las enzimas de la clase oxidorreductasa asociadas con los alimentos (Motta et al., 2023 citado en Mustafa y Mehmed, 2024). Es más común utilizar glucosa oxidasa en 50–100 ppm junto con ácido ascórbico para aprovechar sus vías de reacción sinérgicas como un medio para reducir la cantidad de gluten de trigo vital requerido en una formulación. También se utiliza comúnmente en combinación con xilanasas para reducir la viscosidad inducida por la degradación de arabinosilanos. Los beneficios en el pan final incluyen un volumen de pan mejorado en niveles bajos, así como propiedades de miga mejoradas. La sobredosificación conduce a masas excesivamente fuertes y que no se expanden al hornearse. (Bock, 2024)

CAPITULO VIII

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 1 se reportan los trabajos realizados donde se adicionan enzimas maltogénicas en pan. Se encontró que el uso de amilasa maltogénica de origen bacteriana (*Bacillus*) en pan, beneficio su volumen así como la textura del mismo, conservándolo con una esponjosidad y suavidad mayor al control, mientras que a su vez beneficio tras dos semanas de reposo y almacenamiento la producción de maltosa, aportando una mayor cantidad de azúcares a la formulación, esto es positivo ya que aporta azúcares posterior al proceso de elaboración lo que permitiría realizar formulaciones de panificación con menor cantidad de azúcares añadidos.

En el caso del pan integral, al igual que el pan sin especificaciones tuvo un impacto significativo en la liberación de unidades de azúcar tras el reposo y el almacenamiento del producto de panificación, como prácticamente todos los casos anteriores el origen de la enzima es microbiano y las unidades de azúcares liberadas son maltopentosas y maltohexosas tras varias horas transcurridas, esto como en el caso anterior ayuda para que las formulaciones lleven un menor contenido de azúcar sin elevar los azúcares en tablas nutrimentales y manteniendo los atributos sensoriales del producto.

Para el caso del pan dulce ocurre algo similar al integral en donde tras el empleo de las enzimas maltogénicas de igual forma de origen microbiano a concentraciones bajas y tiempos de reposo o almacenamiento adecuados permite una textura más suave y mantiene la corteza del pan crujiente, esto debido a que se conserva la elasticidad del pan gracias a los azúcares liberados, siendo en este caso específico dextrinas, estas permiten mantener al pan en buenas condiciones gracias a que al ser cadenas pequeñas siendo liberadas constantemente, retienen agua más fácilmente sin exceder el límite y permitiendo que la recristalización de la miga y poros sea mucho más lenta y ayudando su vez a que la miga tenga una apariencia más homogénea por la reducción del diámetro de poros. Como en otros casos ya comentados también beneficia la cantidad de azúcares

presentes en el pan, para que así no se tenga que agregar una cantidad mayor e inclusive permitiendo regular la ingesta de azúcares en la dieta de las personas.

Tabla 1. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan

Pan	Amilasa maltogénica	La amilasa maltogénica utilizada en el estudio fue Novamyl10000 BG, de <i>Bacillus subtilis</i> . El pan de control presentó un volumen específico de $2,8 \pm 0,1$ mL/g, y el pan suplementado con amilasa maltogénica produjo un volumen específico ligeramente mayor, ($3,1 \pm 0,1$ ml/g). En el día 14, se pudo observar un nivel más alto de maltosa ($62,7 \pm 1,3$ mg/g en base seca)	Chen Y et al., 2021
Pan integral	Amilasa maltotetrágica y α -amilasa maltogénica	Se adicionó amilasa maltotetrágica de <i>Pelomonas saccharophila</i> y α -amilasa de <i>Geobacillus stearothermophilus</i> a masa para la elaboración de pan integral. Las preparaciones de α -amilasa maltogénica mostraron diferencias considerando que el porcentaje de α -amilasa maltogénica osciló entre 5,4% hasta 96,9%. El contenido total de azúcar fue de 39,1 mg/g ($\pm 3,8$) para la preparación (I) y 58,9 mg/g ($\pm 5,4$) para la preparación (II) 2 h después del horneado. Además, se detectó maltopentosas después de 48 h y maltohexaosa después de 96 h de almacenamiento en las muestras que contenían la preparación (VI). El contenido total de azúcar osciló entre 55,3 mg/g ($\pm 4,4$) (V) y 108,4 mg/g ($\pm 1,6$) (VI) después de 2 h. No se determinó ningún aumento significativo en las concentraciones de azúcar para los panes con preparación(III)	Rebholz G et al., 2021

Pan dulce	alfa amilasas de nueva generación	<p>Alfa-amilasas y amilasas maltogénicas bacterianas y fúngicas identificadas como enzimas de nueva generación, fueron ocupadas para evaluar la heterogeneidad del tamaño de los poros de pan dulce. Estos aumentaron con la concentración de enzimas adicionadas, mostrando una estructura de miga densa y menos uniforme. En este sentido, la estructura general de la miga parece ser más pequeña cuando se disminuyó la concentración de las enzimas, lo que produce una mayor homogeneidad de los poros. A medida que aumentó la concentración de enzimas, la producción excesiva de dextrinas como recurso de azúcares fermentables indujo una estructura de poros con un contenido de agua aceptable (54-58% p/p del peso total de la formulación). Para contenidos de agua superiores al 54 y 58 % (p/p), la red comenzó a romperse y a sufrir deformaciones desde el interior hacia el exterior.</p> <p>Comentario: Es positivo que el tamaño de poro sea más homogéneo y por ende tenga un tamaño más reducido, ya que durante el almacenamiento permite conservar la corteza del pan más fresca permitiendo que mantenga su textura crujiente.</p>	Barbosa-Ríos et al., 2017
-----------	-----------------------------------	--	---------------------------

En la tabla 1 se presenta el resumen de los trabajos donde se adicionaron enzimas maltogénica a pan sin gluten. En este caso, se presentó una pérdida significativa del peso y volumen del producto, debido a que al no estar presente la red de gluten que a su vez se conforma de gliadinas y glutelinas la estructura en general pierde más forma

probablemente dando una apariencia más plana o sencilla. En este caso se aplicó la enzima de forma natural y encapsulada para este tipo de pan, en donde ese encontró que su aplicación redujo la pérdida del volumen del producto terminado, además de aportar datos más bajos de dureza y masticabilidad, evidenciando que de igual forma apporto en la textura suave del pan a comparación del control.

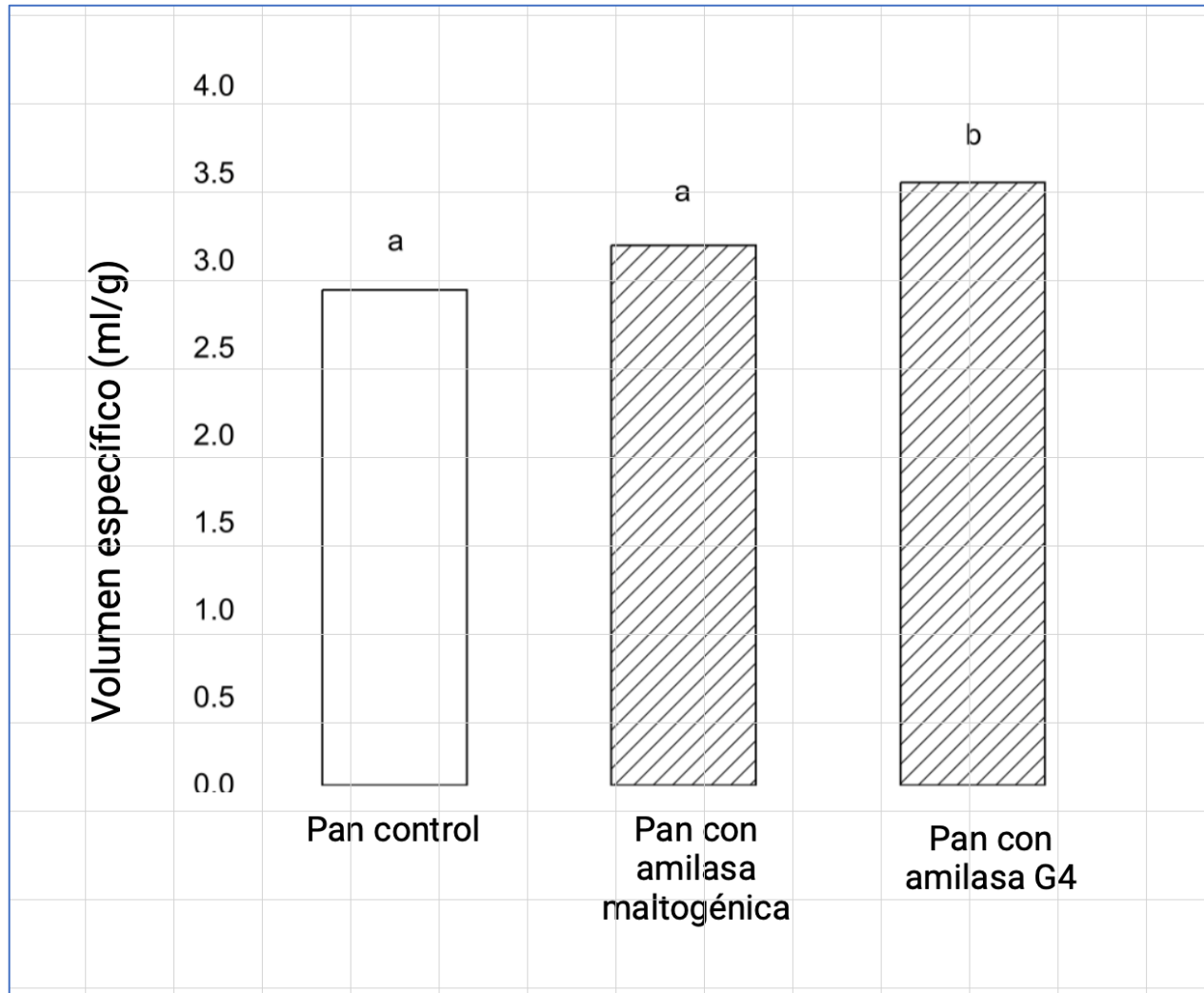


Figura 1. Grafica de barras que indica la Diferencia entre volúmenes específicos en formulaciones de pan con la implementación de enzimas maltogénicas y enzima amilasa. Figura adaptada (Chen et al., 2021)

En estudios realizados por Chen et al. (2021) se compara el volumen específico de panes con enzimas y uno que no contiene, obteniendo un mayor volumen de aquellos con

enzimas maltogénicas y amilasas. Este punto es benéfico para los productos de panificación, ya que el volumen es una propiedad fisicoquímica que puede indicar cosas sobre la calidad del pan, además de que en cuanto a atributos sensoriales como la de visualmente verse más esponjoso, puede ser determinante a la hora de tomar una elección sobre cual pan llevar. En este caso, aunque las amilasas aportan un mayor volumen específico en comparación a la amilasa maltogénica, ambas enzimas empleadas en las formulaciones son benéficas ya que aportan mayor volumen en comparación al pan denominado control en donde no se emplea ningún tipo de tecnología enzimática. Se debe tomar en cuenta que las amilasas maltogénicas tienen más efectos positivos que solo mantener y mejorar los caracteres fisicoquímicos.

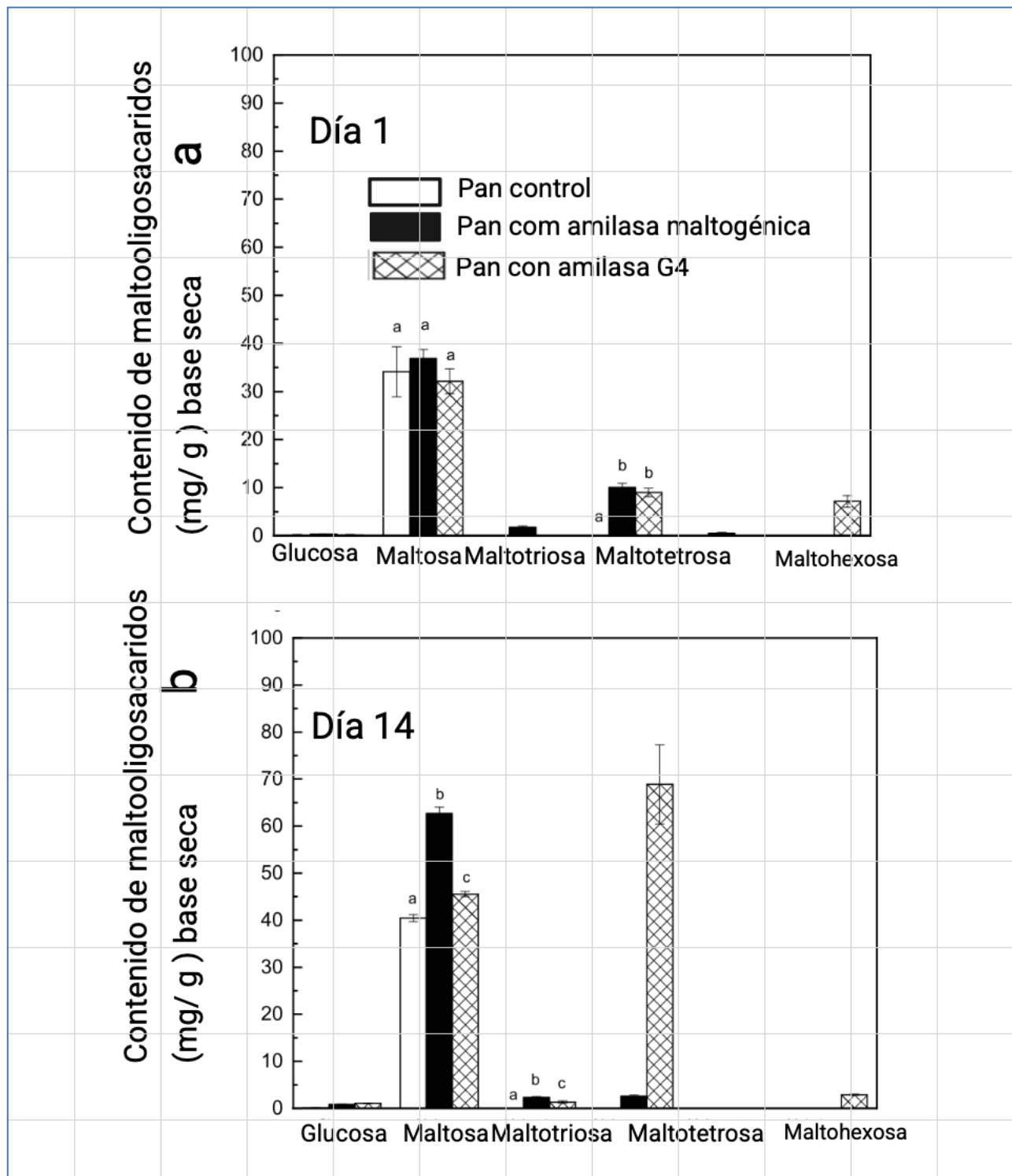


Figura 2. Graficas de barras que representan la producción de maltoligosacaridos referentes a la formación de maltosa tras la aplicación de enzimas maltogénicas y amilasas tras varios días de reposo. Figura adaptada (Chen et al., 2021)

Estudios realizados por Chen et al. (2021) reportaron el comportamiento del pan en función de la producción de azúcares tras el paso de los días, al igual que la gráfica anterior se consideraron el pan control, el elaborado con amilasas y aquél con enzima amilasa maltogénica. En el caso del control vemos que su producción tras el paso de los días no es significativa, en cambio con los dos en donde se utilizaron las enzimas maltogénicas, vemos que en ambos casos hay un aumento considerable en la producción de los azúcares, en su mayoría claro está, azúcares de malta. Tanto en el día uno, así como en el 14 se obtiene una mayor producción de maltosa en el pan con enzima maltogénica, dando a entender que la producción es constante y aumenta en función de los días en los que se deja reposar el pan, mientras que, por otro lado, aquél con enzima amilasa muestra su mayor producción de azúcares en el día 14 en donde el tipo que mayormente se produce son maltotetraosas que son un oligosacárido derivado de la maltosa que se compone de 3 moléculas de glucosa unidas entre sí. Esto es un gran indicador ya que inclusive el reposo beneficia la producción de azúcares en ambos casos, esto siempre y cuando se empleen las dosis adecuadas, ya que si hay una sobredosificación de enzimas lo que puede ocurrir es que el exceso de producción de azúcares puede deformar y hacer la masa más pegajosa.

Cuadro 1. Formulaciones de pan integral con enzimas y su actividad enzimática. Tomado de Rebholz et al. (2021)

	Enzima de preparación	Número CE otros ingredientes	Dosificación (mg/kg de harina)	Actividad (nkat/Edm)	Actividad residual (nkat/g) Media (%)	Rango (%)
I	Amilasa maltogénica 3.2.1.60	Cloruro de sodio almidón de trigo	850	85.8	0.9±0.3	0.6-1.4
II	Amilasa maltotetraogénica 3.2.1.60	Cloruro de sodio almidón de trigo celulosa microcristalina	300	31.7	0.9±0.3	1.2-2.9
III	Alfa Amilasa maltogénica 3.2.1.133	Harina de trigo, cloruro de sodio	100	22	0.9±0.3	38-47.7
IV	Alfa Amilasamaltogénica 3.2.1.133	Maltodextrina, cloruro de sodio	100	43	0.9±0.3	11.3-35.7
V	Alfa Amilasa maltogénica 3.2.1.133	Maltodextrina, cloruro de sodio y aceite de girasol	100	38.6	0.9±0.3	18.5-43.9
VI	Alfa Amilasa maltogénica 3.2.1.133	Harina de trigo, cloruro de sodio	100	31.5	0.9±0.3	36.3-51
VII	Alfa amilasa maltogénica 3.2.1.133	Maltodextrina, cloruro de sodio y aceite de girasol	50	41	0.9±0.3	11.9-15

En la investigación realizada por Rebholz et al (2021), se muestran siete diferentes formulaciones de pan en donde el cambio fue la aplicación de diferentes porcentajes de enzimas y tipos de enzima, en donde puede observarse que las formulaciones 1 y 2 que

son las que cuentan con un mayor porcentaje de enzima maltotetragénica por kg de harina resultan ser las que cuentan con un mayor porcentaje de producción de azúcares tras el paso de los días, también se puede considerar que a través de los datos recopilados de la tabla. La actividad enzimática fue proporcional a la cantidad de enzima adicionada, aunque en este parámetro también pueden influir otro tipo de parámetros como la temperatura de activación de la enzima, tiempo y temperatura de horneado, así como humedad. En el caso de actividad residual se puede traducir como la actividad enzimática que se encontró tras efectuar algún tipo de procedimiento a la enzima con la finalidad de poder conseguir información de que tan bien puede aguantar tras ciertos tratamientos como en el pan puede ser el tiempo y temperatura de horneado que suelen ser un poco extensos a temperaturas altas. En el caso de estas enzimas se puede entender que ambas aguantaron muy bien el procedimiento empleado.

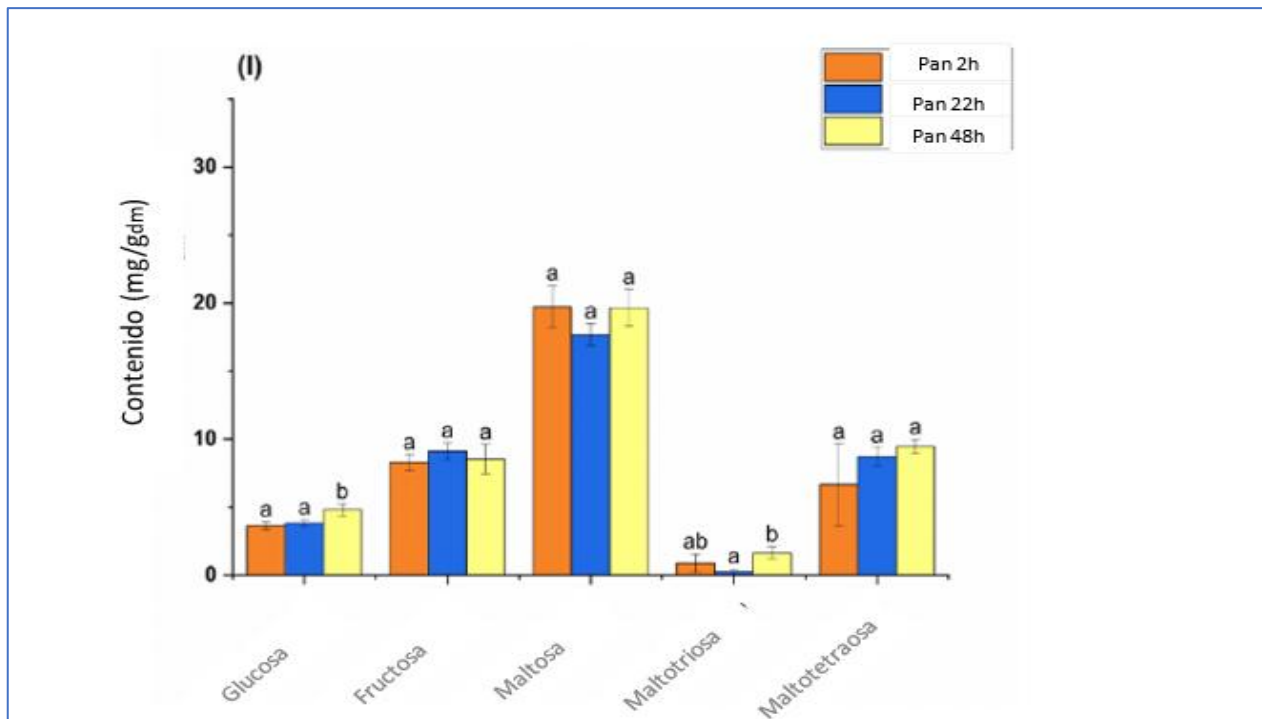


Figura 3. Grafica de barras que representan la producción de azúcares y maltoligosacáridos tras la aplicación de enzimas de en pan integral durante tiempos de 2h, 22h y 48h. Figura adaptada de Reholz et al.,2021.

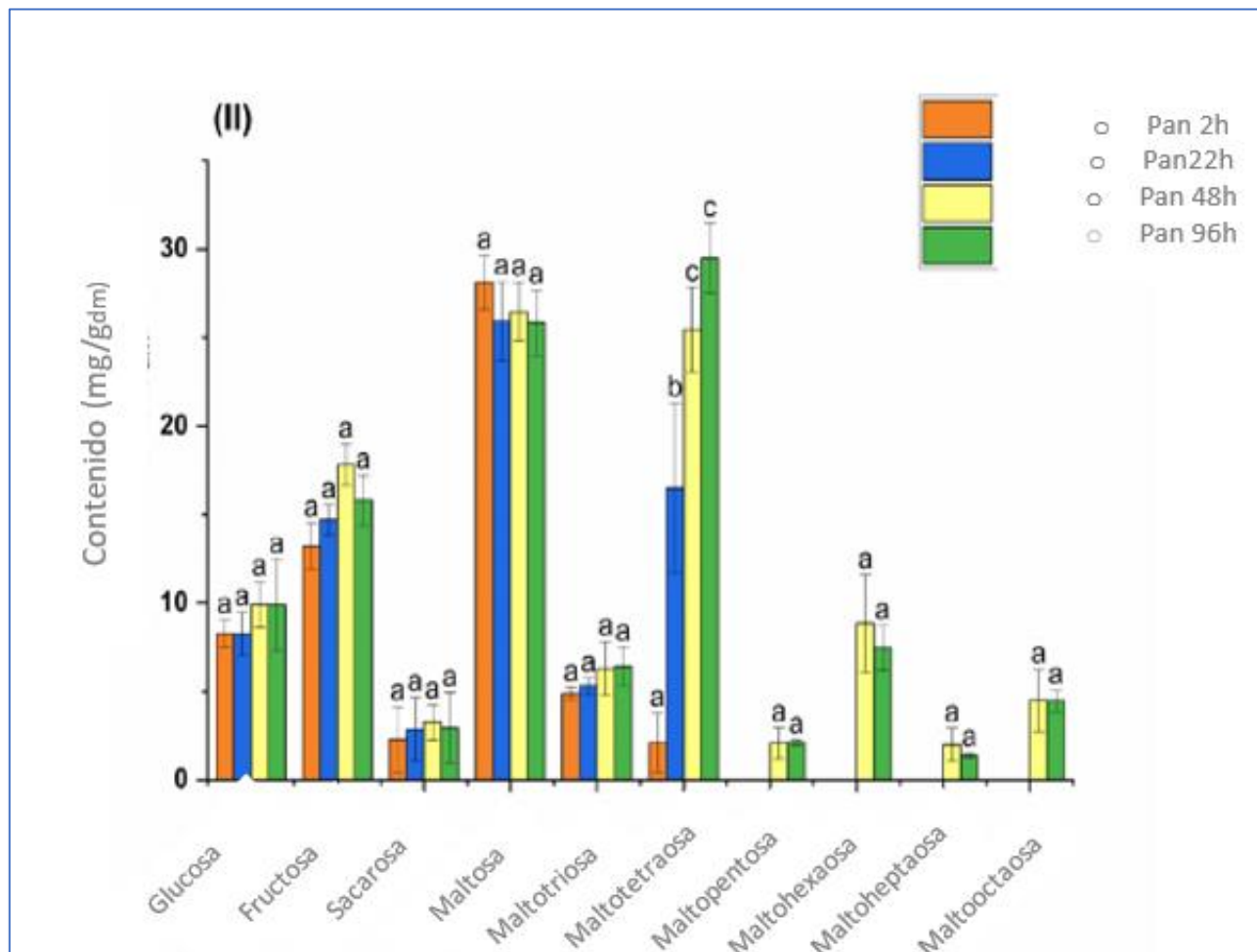


Figura 4. Grafica de barras que representan la producción de azúcares y maltoligosacáridos tras la aplicación de enzimas de en pan integral durante tiempos de 2 h, 22 h 48 h y 96 h. Figura adaptada de Rebholz et al., 202.

En la figura 3 se contempla la formulación 1 con 850mg de enzima por kg de harina y la figura 4, 300mg de enzima por cada kg de harina, en ambos casos se puede ver los diferentes azúcares y, los niveles de estos tras el transcurso de los días. En cuanto a glucosa y fructosa se mantienen con una producción constante pero no tan alta a comparación de los diferentes azúcares de malta que en ambos casos salen en una cantidad mayor conforme pasan los días de elaboración del pan integral, con esto podemos afirmar que en su mayoría la aplicación de la enzima amilasa maltotetrágica permanece con una actividad enzimática alta constantemente alta aún después de la

etapa de horneado del pan a altas temperaturas, así como aún en el reposo puede seguir manteniendo un efecto positivo con la producción de más azúcares tras el transcurso del tiempo.

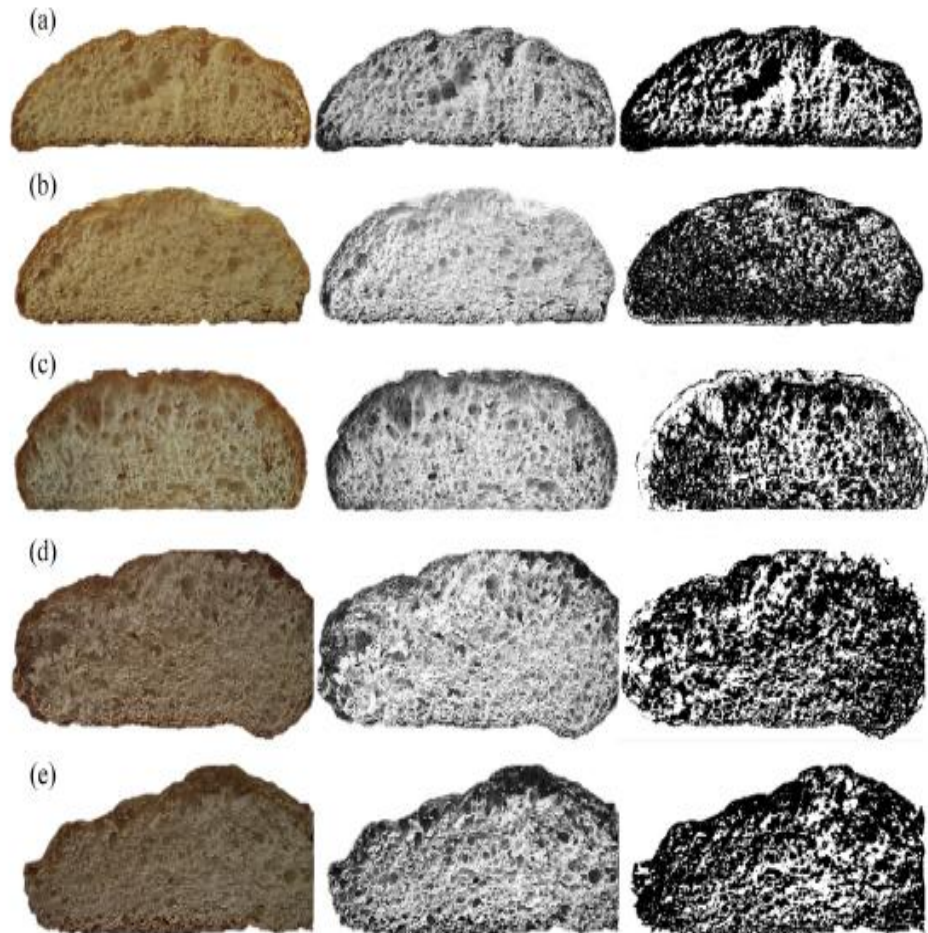


Figura 5. Imágenes de la miga y poros de las formulaciones de pan a diferentes concentraciones de enzimas maltogénicas. Figura adaptada de Barbosa-Ríos et al., 2017

En el cuadro 2 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos de pan obtenido con diferentes concentraciones de enzimas maltogénicas.

Cuadro 2. Valores fisicoquímicos obtenidos con diferentes concentraciones de enzimas maltogénicas en formulaciones de pan. Figura adaptada de Barbosa-Ríos et al., 2017.

Muestra	Velocidad de calentamiento(°C/min)	Área media de poros (mm ²)	Uniformidad de poros	Pérdida de peso (g)	Volumen(cm ³)	Parámetros de color		
						L´	a*	b*
B0	10.2±0.30	1.23±0.24	2.61±0.31	16.18±0.34	238.60±4.77	45-07±1.31	10.58±0.18	35.3±0.77
B0.25	10.50±0.20	0.26±0.04	0.33±0.02	15.56±0.26	243.20±6.08	41.26±1.14	11.05±0.24	34.54±0.71
B0.5	10.90±0.10	0.82±0.17	0.96±0.10	15.08±0.18	261.20±7.84	40.71±1.08	12.97±0.30	33.90±0.65
B0.75	11.20±0.30	2.05±0.35	4.18±0.63	14.32±0.15	270.50±6.55	39.97±0.99	14.14±0.35	32.40±0.61
B1.0	6.20±0.20	3.11±0.62	5.09±0.92	16.26±0.38	265.20±8.03	34.13±0.92	15.02±0.37	31.67±0.57

El trabajo realizado por Barbosa-Ríos et al. (2017) aportan mucha información sobre como el empleo de las enzimas maltogénicas impacta de forma positiva en la homogenización de los poros en la miga del pan ya que en función de los datos que se presentan en la tabla se puede apreciar cómo se llevaron a cabo 5 formulaciones distintas de pan con diferentes concentraciones de enzima maltogénica empezando por el control para posteriormente encontrar dosis de 0.25, 0.5, 0.75 y 1 por ciento, los datos arrojan que las que mejor sirvieron en los parámetros fisicoquímicos que se midieron son la de 0.25 y 0.5 ya que desde el rango de área con el que cuenta el poro es más pequeño, esto es benéfico ya que quiere decir que se encuentra más homogéneo lo que impacta directamente en la textura del pan haciéndolo más suave y conservándose así durante varios días gracias al efecto de las enzimas maltogénicas que aumentan la vida de anaquel del producto. Otro aspecto importante que se puede rescatar de la tabla es que

a mayor concentración de enzimas adicionada se puede observar un aumento en el volumen específico del pan con valores más altos, aunque se observa que a una concentración de 1%, este beneficio decrece su valor por lo que se entiende que es importante aplicar la dosis adecuada, ya que la sobredosificación lleva a efectos adversos que perjudican el producto final. En cuanto a los valores de color que se obtienen en la tabla, se puede observar que consideraron 3 parámetros, estos son la claridad del color, las notas amarillas y los tonos rojizos. En cuanto a las notas claras y amarillezcas se puede interpretar que a mayor concentración de enzimas estas notas decrecen, mientras que las notas rojizas u oscuras aumentan, esto se debe a que cuando se ocupa una mayor cantidad de enzima en el producto hay una mayor producción de azúcares libres (en su mayoría dextrinas) que por calentamiento e interacción con otras macromoléculas da origen a reacciones como la de Maillard que proporciona notas oscuras por caramelización de azúcares, por ello los panes con mayor concentración en las imágenes cuentan con menos tonos tenues o brillosos a comparación de aquellos que tienen concentraciones menores.

Tabla 2. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan libre de gluten

Pan libre de gluten	amilasa maltogénica y amilasa maltogénica encapsulada	Se adicionó amilasa maltogénica libre y encapsulada a una formulación de pan libre de gluten. Todos los panes sin gluten mostraron pérdida de peso durante la cocción, siendo la menor relacionada con los panes que contenían la enzima maltogénica libre y encapsulada (26,24% y 26,97%, respectivamente). La encapsulación de la enzima maltogénica en maltodextrina tuvo una menor pérdida de peso en lugar de su encapsulación en cera (24,17% frente a 26,97%, respectivamente). Aunque no hubo diferencias significativas en la dureza y masticabilidad del control y el pan con adicionado con enzima maltogénica y el pan con enzima maltogénica encapsulada en cera	Kharazi et al., 2020
---------------------	---	---	----------------------

		(p > 0.05), los panes adicionados con enzima maltogénica encapsulada en cera mostraron la dureza y masticabilidad más bajas que otros panes.	
Pan libre de Gluten	amilasa maltogénica y amilasa maltogénica encapsulada	<p>La aplicación de enzimas encapsuladas en la formulación de pan sin gluten dio como resultado un color más oscuro de la corteza (valores más bajos de blancura) que los panes adicionados con la enzima libre y encapsulamiento de amilasa maltogénica con cera (BW). Esto debido a que en la formulación hay más azúcares disponibles en la masa, que son susceptibles a las reacciones de Maillard y caramelización, dando como resultado pigmentos marrones. Sin embargo, en el caso del pan adicionado con enzimas libres con la misma concentración de enzimas encapsuladas, mostró una ligera diferencia.</p> <p>Comentario: Se mostraron diferencia en los valores de color. Para el pan enzima libre hubo mayor blancura en la corteza mientras que para el pan con la enzima encapsulada el pan de blancura de miga es más bajo por lo que tiene tonos más oscuros por efecto de la reacción de Maillard que ocurre con los azúcares contenidos en la formulación.</p>	Kharazi et al., 2020
Pan libre de gluten	amilasa maltogénica encapsula con maltodextrina	<p>Los panes con formulaciones que contiene la enzima encapsulada con bajo porcentaje de maltodextrina (MD) y la enzima libre sin encapsulación dieron como resultado la corteza más clara y oscura, respectivamente. El color más oscuro para el pan con la formulación de enzima sin encapsular se debe a la presencia de alta cantidad de azúcares, seguidos por los que son susceptibles a las reacciones de</p>	Kharazi et al., 2019

		<p>Maillard y caramelización y dan como resultado la pigmentación marrón.</p> <p>La formulación de panes adicionada con amilasa maltogénica encapsulada en maltodextrina con bajos equivalentes de dextrosa (4-7 DE), presentó menores valores de color, en comparación con la adición de enzima encapsulada en maltodextrina con altos valores de equivalentes de dextrosa (16.5- 19.5. DE), debido a que se encuentran mayor cantidad de azúcares reductores disponibles para los panes.</p>	
--	--	--	--

Se debe tomar en cuenta que, para el pan sin gluten, aún hay poca información al respecto de su comportamiento tras la adición de enzimas maltogénicas. Se encontraron en la literatura pocos estudios al respecto, aun así Karazhi et al., 2019 junto a su segunda investigación Karazhi et al., 2020 mostraron en sus investigaciones como la encapsulación de enzimas, influye en el color del pan, debido a que la maltodextrina puede aportar tonos más blancos o claros en la dosis adecuada y de acuerdo a los equivalentes de dextrosa de la maltodextrina, siempre y cuando los azúcares libres disponibles que pueden encontrarse en la formulación e inclusive en las mismas encapsulaciones de estas enzimas no sean muy altos, ya que de lo contrario, una cantidad o concentración elevada de azúcares se atribuye a tonos más oscuros provocados por reacciones de caramelización y Maillard, debido a las altas temperaturas a las que se hornean los productos de panificación.

En esta imagen (figura 6 y 7) obtenida de la investigación de Kharazi et al. (2020) se puede ver la encapsulación que se aplicó a la enzima maltogénica con la finalidad de experimentar su rendimiento en comparación a la enzima libre, normalmente los componentes que se ocupan para este tipo de encapsulaciones suelen ser ceras, gomas, almidones, etc. Con la finalidad de experimentar si estos diversos materiales son viables

para conservar las propiedades de la enzima para que pueda implementar su función de una mejor manera que si solo se añadiera sin ningún tipo de recubrimiento. En este tipo de encapsulamientos pueden considerarse imágenes o mediciones para corroborar el diámetro de la capsula, así como la actividad de la enzima antes y después de ser expuesta a condiciones de temperatura o humedad.

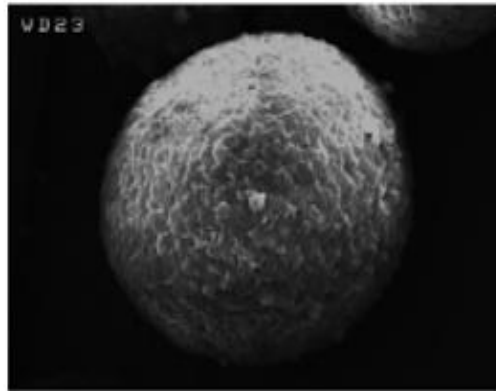


Figura 6. Encapsulación de amilasa maltogénica con Beeswax (combinación de cera con maltodextrina). Imagen tomada de Kharazi et al.,2020.

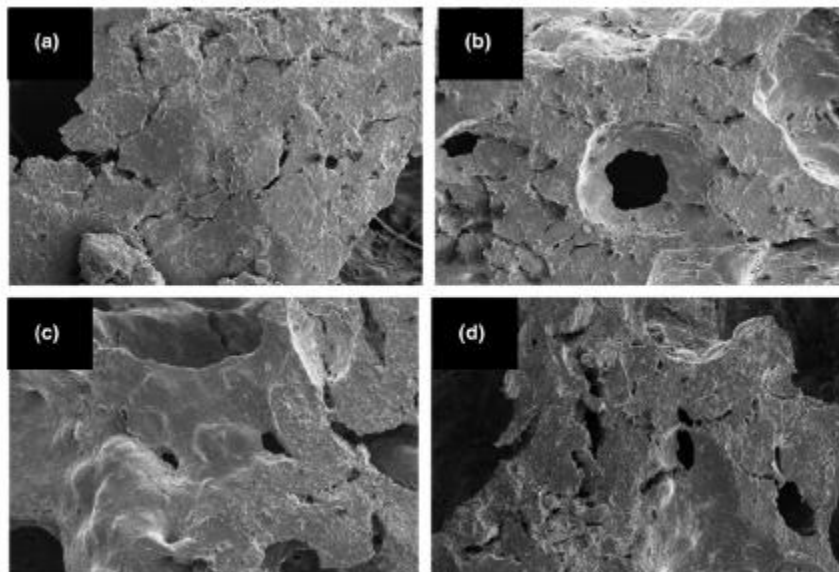


Figura 7. Micrografías con Microscopio electrónico de barrido (SEM) de la miga de diferentes panes sin gluten. (a) Control, sin MAase y BW; (b) con MAasa libre; (c) contiene BW; (d) contiene MAase encapsulada en BW. La ampliación fue de 100×. Imagen tomada de Kharazi et al.,2020.

En el cuadro 3 se muestran los resultados obtenidos de la investigación de Kharazi et al. (2020), donde se puede observar que se están midiendo los parámetros fisicoquímicos de 4 diferentes formulaciones de pan; la primera es el control, la segunda adicionada con enzima maltogénica, la tercera con enzima maltogénica encapsulada y la última es híbrida con amilasas maltogénica y maltogénica encapsulada. En este caso en particular se puede observar que la de mejor rendimiento fue la híbrida ya que para valores como la dureza.

Cuadro 3. Tabla con diferentes parámetros de suavidad y viscoelasticidad de panes empleando enzimas maltogénicas libres y encapsuladas. Figura adaptada de Kharazi et al.,2020.

Parámetros	Muestra de pan			
	Control	Maase	BW	BW-Maase
Corteza L	56.41±0.22	60.79±1.44	57.91±1.31	56.91±2.91
Corteza a	15.5±0.08	11.54±1.46	15.32±0.99	17.46±2,31
Corteza b	42.46±0.10	46.41±0.42	46.09±0.51	46.15±1.28
Blancura de la corteza	36.95±0.28	38±1.48	35.55±1.44	34.26±1.64
Miga L	76.53±1.04	76.31±0.65	75.99±0.65	78.68±1
Miga a	(-0.96) ±0.21	(-1.26) ±0.40	(-0.99) ±0.32	(-1.24) ±0.30
Miga b	26.91±0.00	29.74±0.18	29.19±0.17	27.26±0.32
Blancura de la miga	64.15±0.68	61.91±0.52	62.10±0.53	65.33±0.35
Dureza (N)	5.27±0.08	4.85±1.61	5.3±0.39	3.42±0.61
Resiliencia	0.42±0.04	0.39±0.01	0.37±0.02	0.43±0.03
Cohesión	0.71±0.08	0.62±0.01	0.6±0.02	0.65±0.01
Elasticidad (mm)	7.24±0.30	7.05±0.00	7.03±0.11	6.94±0.25
Gomosidad (N)	3.72±0.33	2.99±0.93	3.15±0.33	2.23±0.35
Masticabilidad (mj)	26.40±3.54	20.65±6.43	21.7±2.55	15.20±2,97

En la tabla 3 se resumen los trabajos donde se ha incorporado amilasa en pan blanco. Se puede observar que la adición de enzima maltogénica proveniente de bacterias,

permite que la textura del pan blanco mejore aportando una suavidad mayor a la miga del pan y conservando más crujiente la corteza, comparado con la adición de enzimas maltotgénicas proveniente de otras fuentes. Por otro lado, varios de estos estudios demostraron de igual forma a través del estudio de vida de anaquel durante varias semanas que el uso de enzimas a dosis pequeñas ayuda a preservar las condiciones de suavidad del pan blanco, mientras que aquellas que eran el control a los pocos días daba lugar la retrogradación del almidón aportando mayor dureza en el pan, esto debido a que las enzimas inciden en los enlaces de cadena larga formando azúcares más simples como las dextrinas, permitiendo una mayor retención del agua, que a su vez favorece la retención de agua, auxiliando a que la retrogradación del almidón tenga lugar de manera más lenta, ya que si se tiene un rango de humedad apropiado la recristalización no puede darse de una forma óptima. De igual forma, los análisis sensoriales implementados mostraron que los productos presentaron suavidad por la adición de las enzimas

Tabla 3. Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pan blanco

Pan Blanco	Amilasas maltogénicas	<p>La amilasa maltogénica se obtuvo a partir del microorganismo <i>Bacillus stearothermophilus</i></p> <p>En panes de recetas que contienen amilasa maltogénica, el grado de retrogradación del almidón disminuyó al aumentar la dosis de enzima. Al mismo tiempo, se observaron menores aumentos en la firmeza de la miga durante el almacenamiento. A mayor cantidad de cadenas de amilopectina, más cortas se correlacionó negativamente con el grado de retrogradación del almidón. Esto por el agua disponible en las cadenas de amilopectina que frenaba la recristalización en los panes. La firmeza de la miga de los panes que contenían amilomaltosa fue</p>	Korompokis et al., 2021
------------	-----------------------	--	-------------------------

		inferior al de los panes de control sólo durante los primeros 2 días de almacenamiento y alcanzó los mismos niveles que el control después de 6 días de almacenamiento.	
Pan Blanco	Enzima amilasa maltogénica y amilasa maltogénica de alto rendimiento	En cuanto a la capacidad elasticidad, los panes adicionados con amilasa maltogénica presentaron valores de capacidad de elasticidad más altos que el control, pero la diferencia no fue estadísticamente significativa. Los panes adicionados con amilasa maltogénica de alto rendimiento fueron más resistentes porque tenían una elasticidad significativamente mejor que el control. En general, los panes con amilasa maltogénica de alto rendimiento tuvieron los valores de elasticidad más altos, pero su diferencia entre panes con amilasa maltogénica no fue estadísticamente significativa. En cuanto a la suavidad, los panes tuvieron la suavidad sensorial más altas que el control, pero no se encontró que la diferencia de suavidad sensorial fuera estadísticamente significativa.	Leung et al., 2023
Pan blanco	Enzima amilasa maltogénica y amilasa maltogénica de alto rendimiento	Se analizó el efecto de la amilasa maltogénica y la amilasa maltogénica de alto rendimiento sobre la firmeza de las rebanadas de pan durante 21 días de vida útil a temperatura ambiente. En el día 1, los panes con enzima la amilasa maltogénica fueron entre un 22 y un 38 % más blandos en firmeza y suaves que el control, y esta diferencia fue estadísticamente	Leung et al., 2023

		significativa. El pan adicionado con 0,0100% de amilasa maltogénica de alto rendimiento fue el pan más suave (valor más bajo de firmeza de rebanada).	
Pan blanco	Amilasa maltogénica a partir de <i>L.plantarum</i>)	Se incorporó amilasa maltogénica de <i>L. plantarum</i> , Después de almacenar el pan preparado durante 7 días se comprobó que se retardo envejecimiento. El pan adicionado con la enzima fue un 35 % menos rancio y un 63 % menos duro que el pan de control preparado sin enzimas. En general, se confirmó que el uso de la enzima fue eficaz para el anti-endurecimiento del pan.	Seung-Hye et al., 2020
Pan blanco	amilasa maltogénica a partir de <i>G. Stearothermophilus</i>	Se añadió amilasa maltogénica de <i>G. stearothermophilus</i> a la masa hasta un máximo de 100 µg por g de harina. Esto correspondió teóricamente a una actividad de amilasa de 3,4 de unidad catalítica de la enzima (nkat) en la masa. En conclusión, las actividades de amilasa endógenas en la masa teóricamente fueron más de 100 veces mayores que la actividad de amilasa de <i>G. stearothermophilus</i> exógena añadida. La amilasa maltogénica exógena resistió el proceso de horneado del pan y se demostró que no había actividad de amilasa endógena de la harina de trigo ni de la levadura determinable después del horneado del pan.	Anja et al.,2020

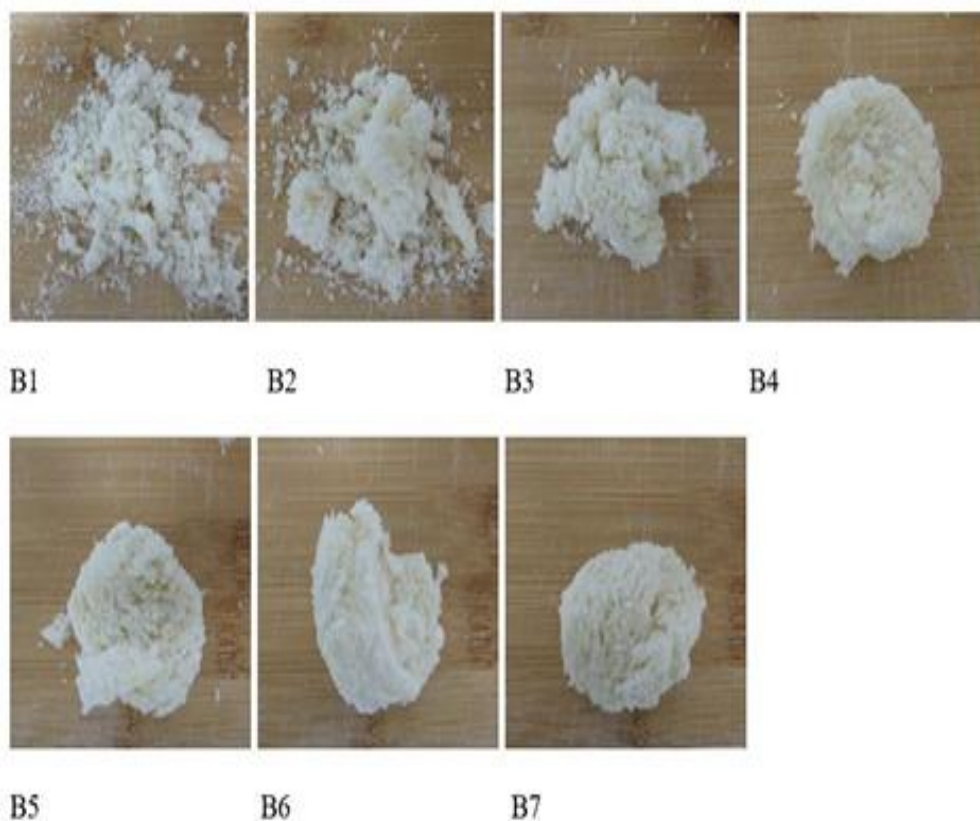


Figura 8. Prueba de amasado en forma de bola de la miga del pan (Leung et al., 2023)

La principal diferencia entre las amilasas endógenas de harina de trigo o levadura y la amilasa exógena de *G. stearothermophilus* es la extraordinaria estabilidad térmica de esta última amilasa, debido a que la temperatura óptima en la cual presenta actividad es entre 60 y 65 °C (Derde et al. 2012 citado en Anja et al., 2020). Se debe tener en cuenta que la actividad enzimática es de suma importancia en el estudio de la implementación de las tecnologías para la preparación de productos de panificación, debido a que proporciona información sobre cómo se desempeña la enzima durante y al finalizar el proceso de horneado de los productos de panificación. En el caso de la investigación de Anja et al., 2020 se encontró que la actividad enzimática de la amilasa maltogénica se conserva e inclusive incrementa gracias a su estabilidad durante la cocción del pan, indicando que soporta altas temperaturas sin que ponga en riesgo su función principal de mejorar los atributos fisicoquímicos de los productos de panificación.

En la tabla 4 se analizan los trabajos donde se adicionan enzimas maltogénicas en pasteles. En este caso el estudio revisado para la sección de pasteles tiene que ver con lo encontrado por Bedoya y Steel en dónde se pudo atribuir que tras la implementación de enzimas maltogénicas en pasteles;, hubo dos efectos que impactaron positivamente en el producto terminado, el primero de estos tiene que ver así como en el caso del pan blanco con la textura, en donde gracias a que se conservó una humedad intermedia apporto una miga más suave junto a un volumen aceptable en este tipo de productos, mientras que por el otro grado y favorablemente también impacto en el contenido de grasa total de los pasteles, ya que al tener una concentración de 1000mg de enzima para 1 kg de producto junto con la adición de grasa que puede ser reducida de 40g/100g producto a 20g/100g permite mantener una textura igual de suave, esto debido a la sinergia de los componentes y la humedad que se conserva por las cadenas de amilopectina tras el uso de las enzimas, que a su vez es un punto a favor para las formulaciones reducidas en grasa de los panes, ya que se puede mantener en buenas condiciones el producto final durante varios días con menor contenido de grasa.

Tabla 4 . Análisis del tipo de enzima y resultados de su adición en pasteles

Pastel	alfa- amilasas y amilasas maltogénicas	Se evaluó la adición de α -amilasa maltogénica (0, 500 y 1000 mg/kg) proveniente de <i>Bacillus stearothermophilus</i> La formulación 1000 mg/kg de α -amilasa maltogénica (base harina) fue la que mostró mejores resultados de textura (mayor volumen específico, menor pérdida de humedad, mejor textura, mejor evaluación sensorial), representando un beneficio alternativo desde el punto de vista nutricional ya que la adición de la enzima proporcionó mejoras en la calidad.	Bedoya y Steel, 2014
Pastel	alfa- amilasas y amilasas Maltogénicas	Se analizó la firmeza de la miga de pastel, durante el almacenamiento, de acuerdo con la concentración de enzima adicionada. La enzima	Bedoya y Steel, 2014

		<p>era proveniente de <i>Bacillus stearothermophilus</i>. El estudio se llevó a cabo durante 21 días de almacenamiento. La firmeza de las nueve formulaciones de los pasteles aumentó durante el almacenamiento. El uso de la enzima presentó un efecto positivo en los pasteles, suavizando la miga y evitando un aumento de firmeza drásticamente durante el almacenamiento. La adición de la enzima α-amilasa maltogénica, especialmente a la concentración de 1000 mg/kg, dio como resultado la obtención de pasteles con firmeza reducida en todos los días de análisis, minimizando el efecto del contenido de grasa. Con la adición de la enzima maltogénica se pueden obtener pasteles con menor contenido de grasa (20 g/100 g) y con una firmeza similar a la de pasteles con 40 g/100 g de grasa, lo que podría ser benéfico desde el punto de vista nutricional.</p>	
--	--	--	--

En la figura 9 se encuentran rebanadas de las diferentes formulaciones que fueron elaboradas por Bedoya y Steel, 2014 en donde se puede ver que lo que cambia es la dosis de amilasa maltogénica empleada, ya que la cantidad de grasa se encuentra constante en las tres formulaciones. Tan solo observando las imágenes se pueden apreciar algunas diferencias entre sí; una de ellas es que en las formulaciones con menos concentración de enzima se pueden observar un mayor número de alveolos, así como también de un mayor tamaño, por otro lado también se puede observar una diferencia en el volumen, ya que aquella formulación con 1000mg/kg de enzima cuenta con una mayor altura que los otros dos, por otro lado también se puede apreciar una textura más uniforme de la rebanada en donde se podría traducir que es más lisa en comparación a las otras dos e inclusive se puede vislumbrar con una mayor firmeza porque se encuentra en una posición más vertical que las rebanadas con menos concentración de enzima.

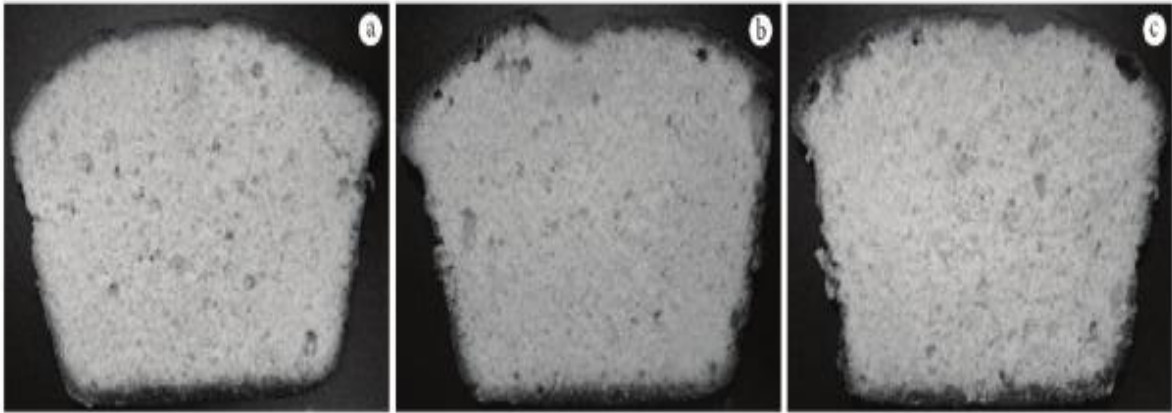


Figura 9. Rebanadas de pastel con 20g/100 g de grasa y a: 0, b:500 y c:1000 mg/kg de α -amilasa maltogénica. Imágenes tomadas de Bedoya y Steel, 2014.

En el cuadro 5 se pueden apreciar los valores obtenidos por Bedoya y Steel 2014 en donde se encuentran diferentes atributos sensoriales, que están en función de la cantidad aportada de enzima maltogénica. En general, así como en los aspectos fisicoquímicos mencionados arriba el pastel con concentración de 1000mg de enzima por kg de producto es la que destaca más ya que su impresión general fue la de más alto valor; esto gracias a las calificaciones obtenidas en los atributos de textura, sabor y apariencia. Como ya se ha visto en otros productos de panificación, también en el caso de los pasteles podemos ver que se mejoran las propiedades fisicoquímicas y sensoriales. Atribuyendo mejoras significativas más que nada en propiedades viscoelásticas que impactan directamente en las cuestiones de textura, volumen y apariencia de los productos de panificación.

Cuadro 5. Tabla con los valores obtenidos de diferentes atributos sensoriales de las tres diferentes formulaciones. Tabla adaptada (Bedoya y Steel, 2014)

Muestra	Apariencia	Aroma	Sabor	Textura	Impresión general
F20-0	6.58±1.68	7.26±1.23	7.12±1.22	6.66±1.52	7±1.29
F20-500	6.52±1.83	7.54±1.11	7.12±1.31	7.34±1,14	7.1±1.30
F20-1000	7.54±1.26	7.36±1,29	7.22±1.27	7.50±1.20	7.38±1,12

IX. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Las enzimas maltogénicas en formulaciones de panificación mejoran significativamente las propiedades fisicoquímicas de los productos en donde suelen destacar; textura, volumen, humedad, porosidad y vida útil. Esto en distintos tipos de pan como el integral, blanco, sin gluten y productos de repostería como pasteles.

Se pueden reducir los azúcares añadidos en las formulaciones, ya que la enzima maltogénica promueve la hidrólisis controlada del almidón, generando maltosa y otros azúcares fermentables, derivados cadenas largas de polisacáridos, sin comprometer el sabor ni la aceptabilidad sensorial del producto final.

Optimización tecnológica y económica. El uso de estas enzimas en concentraciones mínimas desarrolla un efecto positivo en los productos de panificación, siempre y cuando sea la proporción adecuada y permita el desarrollo durante el reposo tras el pasar de los días mejorando su vida útil, conservando propiedades y en algunos casos aportando una funcionalidad. Esto es benéfico para la industria enfocada en la panificación ya que hay reducciones en el desperdicio y un mejoramiento en el costo- beneficio.

Eficacia del encapsulamiento enzimático. Las enzimas maltogénicas encapsuladas con maltodextrina y cera de abeja aportaron un efecto más controlado y prolongado de la liberación de la enzima, permitiendo que los productos de panificación conservaran sus propiedades durante un mayor tiempo sin deteriorar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales.

Aplicabilidad en diversos productos de panificación. En productos libres de gluten, las se optimizaron la textura y el color de la miga, compensando la ausencia de gluten. En productos integrales, fueron auxiliares en la producción de azúcares y manteniendo la suavidad de la miga. Esto demostrando la gran variabilidad de productos.

IX. PERSPECTIVAS FUTURAS

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Las enzimas no son una tecnología nueva en la aplicación de alimentos como lo son los productos de panificación, ya que se han estado probando alrededor de 1950-1970, lo que sí es innovador son las enzimas maltogénicas que por lo regular son una subclase de las enzimas alfa amilasas, que aportan varios beneficios como se vio durante esta investigación en su adición en los productos de panificación. De seguir desarrollando más subtipos de estas enzimas se podría decir que podría mejorar la producción de estos productos de forma significativa. Por otro lado este tipo de enzimas puede ser utilizada más a menudo en un gran repertorio de productos que contenga harina de trigo, ya que suele funcionar de mejor forma en conjunto con las harinas que aporten gluten por lo que puede ser utilizada más frecuentemente en productos como lo son las pastas para mejorar sus propiedades viscoelásticas, aportándoles posiblemente una mayor extensibilidad y versatilidad al momento de ser elaboradas y manteniendo esas mismas propiedades durante un mayor tiempo, así como su vida útil en el anaquel e inclusive aportar mejoras de textura y en general de las propiedades sensoriales. Las enzimas son una tendencia muy probable en los años venideros ya que a partir de dosis mínimas en las formulaciones los efectos fisicoquímicos del producto son notables y benéficos, además de que cada vez es más sencilla su síntesis en laboratorios gracias a ciencias como la química, biotecnología y biología a precios accesibles sin pasar los márgenes de costos. Estas enzimas sin duda serán un gran auxiliar tecnológico en las próximas formulaciones por su practicidad y empleo en las masas de panificación y muy posiblemente más adelante se sigan descubriendo nuevos tipos con aún mayores mejoras a costos razonables. Por otro lado también es importante considerar que el uso de enzimas como tecnología en alimentos actualmente no se considera que deba ser declarado en el etiquetado de los alimentos por lo que es un punto a favor en no tener que declarar debido a la tendencia de etiquetado limpio en alimentos que muchos consumidores actualmente buscan en los productos de panificación que frecuentan, así como en el futuro también se van crear enzimas con una mejor actividad que permita prolongar aún más sus efectos o inclusive mejorarlos para una mayor variedad de productos

REFERENCIAS

Referencias

- Aditi S., Rachana S., Shweta S. (2019). Enzymes Used in the Food Industry: Friends or Foes?.
- A. Pandey, P. Binod, R. Sindhu (2017) 1 - α -Amylases. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, pp. 3-24.
- Ahlborn G., Domike K., Jackson, K., Domike, R. (2022). A Comparison of Egg White and Egg Yolk in Gluten-Free Bread. Food Chemistry Advances.
- Amjid, M., Shehzad, A., Hussain S., & Shabbir, M. A., & Khan, M. R., Shoaib, M. (2013). A comprehensive review on wheat flour dough rheology. 23. 105-123.
- Anja L., Seitzl I., Fischer L., Katrin R. (2020). Determination of the Direct Activity of the Maltogenic Amylase from *Geobacillus stearothermophilus* in White Bread. Food Analytical Methods. 13.
- Arora S. (2003). The effect of enzymes and starch damage on wheat flour tortilla quality. Tesis de Maestría, Texas A&M University.
- Barbosa-Ríos, J.A., Castellón-Jardón, J., Guadarrama-Lezama A., Ponce-García, N., Álvarez-Ramírez, J., Carrillo-Navas H. (2017). Effect of new generation enzymes addition on the physical, viscoelastic and textural properties of traditional Mexican sweet bread. Journal of Cereal Science. 79.
- Bedoya-Perales, N. S., y Steel, C. J. (2014). Effect of the concentrations of maltogenic α -amylase and fat on the technological and sensory quality of cakes. *Food Science and Technology*, 34, 760-766.
- Bock, J.E. (2024). Enzymes in breadmaking.
- Buehler E. (2017) Bread science The Chemistry and Craft of Making Bread. Two Blue Books. Carrboro, North Carolina.
- Caballero, P.A., Gómez, M. Rosell C. (2007). Bread quality and dough rheology of enzyme-supplemented wheat flour. European Food Research and Technology. 224. 525-534.

- Calvo M.C., Lopez O., Carranco M.E., Marines J. (2020) Evaluación Físicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*Triticum spp*) y chicharo (*Pisum sativum L.*) Universidad de Sonora. *Biotecnia*. XXII: 116-124.
- Chen Y., Eder S., Schubert S., Gorgerat S., & Boschet E., Baltensperger L., Städeli, C., Kuster S., Fischer P & Windhab E. (2021). Influence of Amylase Addition on Bread Quality and Bread Staling. *ACS Food Science & Technology*.
- Chin N., Martin P. (2014). *Rheology of Bread and Other Bakery Products*.
- Collar C. (2016). Bread: Types of Bread. *Encyclopedia of Food and Health*.
- Dahiya, S., Bajaj, B., Kumar A., & Tiwari S., Singh B. (2020). A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making. *Process Biochemistry*. 99. 290-306.
- Dobraszczyk B., Morgenstern M. (2003). Review: Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*. 38. 229.
- Emam-Djomeh Z., Mirsaeedghazi, H., Mousavi, M. (2008). Rheometric Measurement of Dough Rheological Characteristics and Factors Affecting It. *Int J Agric Biol*. 10.
- Figueroa J., Salcedo J. (2016). Viscoelasticity of bakery doughs formulated with wheat flour and cassava bran. *Agronomía colombiana*. 1. 367-370.
- Frazier, P. J., Daniels, N. W. R., & Russell Eggitt, P. W. (s/f). *Rheology and the continuous breadmaking process*.
- Gerardo Rodríguez J.E. Ramírez-Wong B., Torres-Chávez P.I., Ledesma-Osuna A.I., Carvajal-Millan E., López-Cervantes J., Vásquez-Lara F., Silvas-García M.I. (2019) Viscoelastic characteristics of part-baked bread under different process condition. *Biotecnia*, vol. 21, núm. 1, pp. 68-78 Universidad de Sonora.
- Giannou, V., Kessoglou, V., Tzia, C. (2003). Quality and safety characteristics of bread made from frozen dough. *Trends in Food Science & Technology - TRENDS FOOD SCI TECHNOL*. 14. 99-108.

- Ibrahim, U., Salleh, R., Maqsood Ul H., Siti Noor S. (2015). Bread towards Functional Food: An Overview. ETP International Journal of Food Engineering. 39-43.
- Lauterbach S., Albrecht J. (1994). NF94-186 Functions of Baking Ingredients. 186_Functions_of_Baking_Ingredients
- Leung S., Montes A., Keo M., Al Ammar A., Roda D., Rathi V. (2023) Effect of a Maltogenic Amylase and High-Performing Maltogenic Amylase on Freshness and Other Quality Attributes of White Sandwich Bread. Global Journal of Microbiology and Biotechnology. Volume 11, Number 1 (2023), pp. 1-16.
- Giannou, V., Kessoglou, V., Tzia, C. (2003). Quality and safety characteristics of bread made from frozen dough. Trends in Food Science & Technology - TRENDS FOOD SCI TECHNOL. 14. 99-108.
- Hicks, C.I., See H., Ekwebelam, C. (2011) The shear rheology of bread dough: Modeling. Rheol Acta 50, 701–710 (2011).
- Korompokis K., Deleu L., Brier N., Delcour, J. (2021). Investigation of starch functionality and digestibility in white wheat bread produced from a recipe containing added maltogenic amylase or amyloamylase. Food Chemistry. 362.
- Kumar N., Meng, C., Abdul M., Nor H., Ahmad, Rabi'Atul A., Mohd F., Siti Fatimah Z., Rahman R., Illias, R (2022). Immobilization of maltogenic amylase in alginate-chitosan beads for improved enzyme retention and stability. Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences. 18. 43-51.
- Kutz, M. (2013). Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition.
- Kharazi, S., Milani, J.M., Kasaai, M.R., Khajeh, K. (2019) Use of encapsulated maltogenic amylase in maltodextrins with different formulations in making gluten-free breads, LWT - Food Science and Technology.
- Kharazi, Sepideh & Kasaai, Mohammad Reza & Milani, Jafar & Khajeh, Khosro. (2020). Antistaling properties of encapsulated maltogenic amylase in gluten-free bread. Food Science & Nutrition. 8. 10.

- Liu Z., Zhong Y., Khakimov B., Fu Y., Pawel T., Czaja J., Kirkensgaard K., Blennow A., Shen Q., Balling Engelsen S. (2023) Insights into high hydrostatic pressure pre-treatment generating a more efficient catalytic mode of maltogenic α -amylase: Effect of multi-level structure on retrogradation properties of maize starch. *Food Hydrocolloids*. Volume 138.
- Mesas, J. M.; Alegre, M. T. (2002) *El pan y su proceso de elaboración*. Ciencia y Tecnología Alimentaria, vol. 3, núm. 5, pp. 307-313 Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de Alimentos Reynosa, México.
- Mustafa S., Mehmet K. (2024). Enzymes used in bakery.
- Migliori M., Gabriele, D., Baldino N., Lupi F., De Cindio B. (2009). Rheological properties of batter dough: Effect of egg level. *Journal of Food Process Engineering*. 34. 1266 - 1281.
- Mirsaeedghazi, H., Z. Emam-D., Mousavi S.M.A. (2008). Rheometric measurement of dough rheological characteristics and factors affecting it. *Int. J. Agri. Biol.*, 10: 112–119.
- Pareyt, B., Finnie, S., Putseys, J. Delcour J. (2011). Lipids in Bread Making: Sources, Interactions, and Impact on Bread Quality. *Journal of Cereal Science*. 54. 266.
- Perego, P., Sordi, A., Guastalli R., Converti A. (2007). Effects of changes in ingredient composition on the rheological properties of a biscuit industry dough. *International Journal of Food Science & Technology*. 42. 649 - 657.
- Preichardt, Leidi & Gularte, M. (2013). Gluten formation: Its Sources, composition and health effects. *Gluten: Sources, Composition and Health Effects*. 55-70.
- Rahim, A. & Kadir, S. & Jusman,. (2017). The influence degree of substitution on the physicochemical properties of acetylated arenga starches. *International Food Research Journal*. 24. 102-107.
- Rebholz, G.F., Sebald, K., Dirndorfer, S. et al. (2021) Impact of exogenous maltogenic α -amylase and maltotetraogenic amylase on sugar release in wheat bread. *Eur Food Res Technol* 247, 1425–1436 (2021).

- Różyło, R., Laskowski, J. (2011). Breads: Physical Properties.
- Srikanlaya, C., Therdtha, N. Ritthiruangdej P., Zhou W. (2017). Effect of butter content and baking condition on characteristics of the gluten-free dough and bread. *International Journal of Food Science & Technology*. 52.
- Seung-Hye W., Yu-Jeong S., Hyun-Mo J., Ji-Soo K., Dam-Seul K., Jung Sun H., Hee-Don C., Jae-Hoon S. (2020) Effects of maltogenic amylase from *Lactobacillus plantarum* on retrogradation of bread, *Journal of Cereal Science*, Volumen 93.
- Sang, S., Xu, D., Ma, Y., Jin Y., Xu, J., Xu X. (2020). Effect of egg yolk on the properties of wheat dough and bread. *Food Bioscience*. 37.