

Influencia de las enzimas y los emulsificantes utilizados como mejoradores de pan en la textura del pan molde

Influence of enzymes and emulsifiers used as bread improvers on texture of sliced bread

Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama¹   Juan Felipe Murillo-Ramírez¹  Eduardo Rodríguez Sandoval¹ 
Guillermo Correa-Londoño¹  Alejandro Mejía-Villota² 

¹Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

² Alimentos y Productos en Polvo Poltec S.A.S, Medellín, Antioquia, Colombia

Resumen

Introducción: Los mejoradores de pan a base de emulsificantes y enzimas se utilizan ampliamente para mejorar el comportamiento de la masa y retrasar el endurecimiento; sin embargo, aún no se conocen con suficiente precisión sus efectos sinérgicos sobre la estabilidad de la textura durante el almacenamiento.

Metodología: Se evaluaron seis formulaciones de mejorantes que combinaban Monoglicéridos Destilados (DMG90), Estearoil Lactilato de Sodio (SSL), Ésteres de Ácido Tartárico Diacetílico (DATEM), lecitina de soja y dos sistemas enzimáticos (α -amilasa maltogénica y una mezcla multienzimática) en comparación con un mejorante comercial. Las propiedades de la masa se analizaron mediante parámetros del farinógrafo, mientras que la calidad del pan se evaluó mediante mediciones fisicoquímicas, análisis del color, perfil de textura y firmeza durante el almacenamiento.

Resultados: La formulación DMG90–SSL– α -amilasa maltogénica mostró el mejor rendimiento, con mayor estabilidad de la masa, mayor tiempo de desarrollo y menor dureza y firmeza de la miga. No se observaron diferencias significativas en la humedad ni en el volumen específico. Los sistemas a base de lecitina produjeron migas más ligeras, mientras que el DATEM y el SSL afectaron a la intensidad del color. Durante el almacenamiento, el sistema DMG90–SSL–M presentó una firmeza inferior a la del mejorador comercial. Los resultados ponen de relieve el papel sinérgico de los emulsionantes y las enzimas a la hora de reforzar la estructura del gluten, lo que mejora la textura de la miga y potencia la estabilidad de la textura durante el almacenamiento.

Conclusiones: El sistema DMG90–SSL– α -amilasa maltogénica constituye una alternativa tecnológica viable a los mejorantes comerciales, ya que mejora el comportamiento de la masa y conserva la suavidad del pan durante su conservación. Se recomienda optimizar esta formulación a escala industrial, realizar estudios para prolongar la vida útil y considerar nuevas combinaciones enzimáticas que mejoren la textura y reduzcan el endurecimiento del pan.

Palabras clave: Suavidad del pan; Farinógrafo; Elaboración de pan; Textura de la miga.

Abstract

Introduction: Bread improvers based on emulsifiers and enzymes are widely used to enhance dough performance and delay staling; however, their synergistic effects on texture stability during storage remain insufficiently understood.

Methodology: Six improver formulations combining Distilled Monoglycerides (DMG90), Sodium Stearoyl Lactylate (SSL), Diacetyl Tartaric Acid Esters (DATEM), soy lecithin, and two enzyme systems (maltogenic α -amylase and a multi-enzyme blend) were evaluated against a commercial improver. Dough properties were analyzed using farinograph parameters, while bread quality was assessed through physicochemical measurements, color, texture profile analysis, and firmness during storage.

Results: The DMG90–SSL–maltogenic α -amylase formulation showed the best performance, with higher dough stability, longer development time, and lower hardness and crumb firmness. No significant differences were observed in moisture or specific volume. Lecithin-based systems produced lighter crumbs, while DATEM and SSL affected color intensity. During storage, DMG90–SSL–M maintained lower firmness compared to the commercial improver. The results highlight the synergistic role of emulsifiers and enzymes in strengthening the gluten structure, thereby improving crumb texture and enhancing texture stability during storage.

Conclusions: The DMG90–SSL–maltogenic α -amylase system represents a viable technological alternative to commercial improvers, enhancing dough performance and preserving bread softness during storage. It is recommended to optimize this formulation at an industrial scale, conduct shelf-life extension studies, and consider new enzyme combinations that enhance texture and reduce bread staling.

Keywords: Softness bread; Farinograph; Bread making; Crumb texture.

¿Cómo citar?

Rodríguez E, Ayala-Valderrama JJ, Murillo-Ramírez JF, Correa-Londoño G, Mejía-Villota A. Influencia de las enzimas y los emulsificantes utilizados como mejoradores de pan en la textura del pan molde. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-21315820

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15820>

Recibido: 29/04/26

Revisado: 24/06/26

Aceptado: 20/08/26

Online: 27/08/26

Correspondencia

edrodriguezs@unal.edu.co

Spanish version

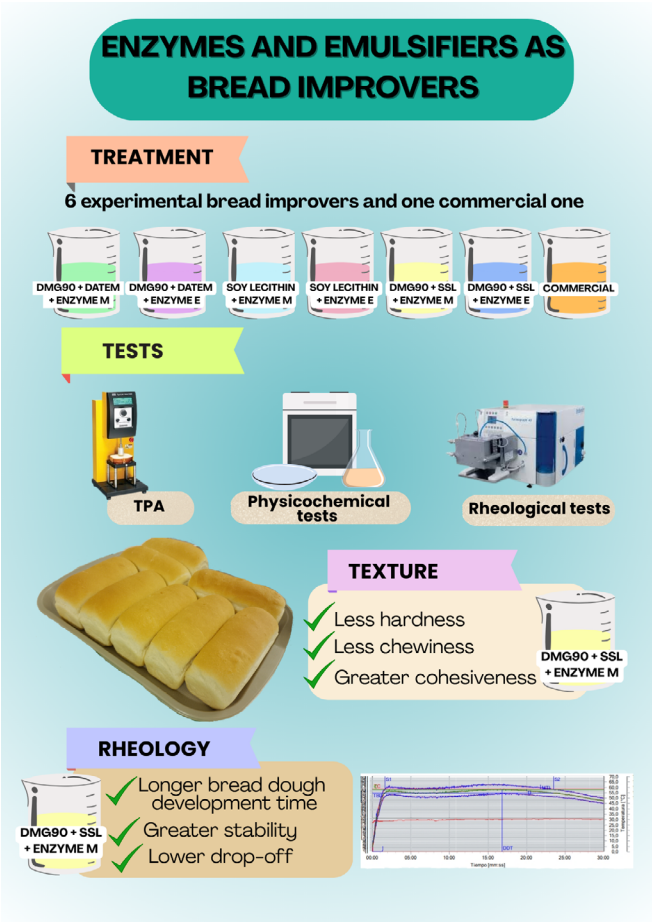


¿Por qué se realizó el estudio?
El estudio se realizó para evaluar los efectos de diferentes combinaciones de emulsionantes y sistemas enzimáticos sobre la reología de la masa, la calidad del pan y la estabilidad de la textura durante el almacenamiento. La investigación tuvo como objetivo identificar una formulación mejoradora capaz de optimizar el rendimiento de la masa y mantener la suavidad de la miga durante el almacenamiento, a la vez que proporciona una posible alternativa tecnológica a un mejorador de pan comercial.

¿Cuáles fueron los hallazgos clave?
La formulación DG90–SSL–M, que combina monoglicéridos destilados (DG90), estearoil lactilato de sodio (SSL) y α -amilasa maltogénica, mostró el mejor rendimiento general. Esta formulación exhibió características favorables de desarrollo y estabilidad de la masa y produjo un pan con menor dureza y firmeza de la miga que la mayoría de las formulaciones experimentales. Durante el almacenamiento, DG90–SSL–M mantuvo una menor dureza y firmeza de la miga que el mejorador comercial, lo que indica una mejor conservación de la suavidad de la miga y la estabilidad de la textura.

¿Qué aportan estos hallazgos?
Los hallazgos aportan evidencia práctica de que las combinaciones específicas de emulsionantes y α -amilasa maltogénica pueden mejorar el rendimiento de la masa y contribuir a mantener la textura del pan durante su almacenamiento. Los resultados ofrecen información valiosa para la formulación y optimización de mejoradores de pan y demuestran el potencial de estos sistemas como alternativas tecnológicas a los mejoradores comerciales, en particular para mejorar la suavidad de la miga y la estabilidad de la textura durante el almacenamiento.

Graphical Abstract



Introducción

El pan tajado es fundamental en la repostería industrial debido a su alta demanda y valor nutricional. Alimento básico, se consume a gran escala y es especialmente valorado por su miga blanda, sabor neutro y larga vida útil. Sin embargo, su producción se enfrenta a varios desafíos tecnológicos. El pan se queda duro durante el almacenamiento debido a la retrogradación del almidón, lo que endurece la miga y reduce la frescura (1). Se utilizan aditivos para contrarrestar este fenómeno reteniendo la humedad y retrasando el endurecimiento. Otro desafío clave es producir un producto uniforme de forma consistente, ya que los consumidores demandan panes con alto volumen, porosidad controlada y textura uniforme. Esta demanda de calidad constante y una larga vida útil ha impulsado el uso generalizado de aditivos tecnológicos, como emulsionantes, enzimas y oxidantes, en la formulación (2). Los mejoradores también buscan protección contra el deterioro microbiano y optimizar el rendimiento del proceso.

Los mejoradores son mezclas de ingredientes funcionales diseñadas para optimizar las propiedades de la masa y el pan (3). En general, contienen enzimas, emulsionantes, agentes oxidantes y otros aditivos específicos. Cada componente cumple una función particular: las enzimas modulan la extensibilidad del gluten y la conservación del almidón. Los emulsionantes refuerzan la red de gluten y estabilizan la masa, y los agentes oxidantes fortalecen los enlaces proteicos del gluten. Juntos, estos aditivos permiten alcanzar el volumen deseado, obtener una miga ligera y tierna, y prolongar la frescura del producto (2).

Entre estos componentes, los emulsionantes desempeñan un papel crucial en la calidad estructural y sensorial del pan. Son aditivos tensioactivos que facilitan la incorporación de grasas y carbohidratos a la masa. En la panadería industrial, los más utilizados son el sodio SSL y DATEM. Ambos se asocian con aumentos significativos en el volumen del pan y migas más finas y uniformes (4). Estos emulsionantes aniónicos mejoran la interacción entre grasas, gluten y almidón, fortaleciendo la red proteica durante el amasado. Además, durante la horneado, forman complejos insolubles con la amilosa que ralentizan la retrogradación del almidón y retrasan el endurecimiento de las migas, manteniendo el pan suave durante más tiempo. En cambio, emulsionantes naturales como la lecitina de soja también mejoran la calidad del pan, aunque mediante mecanismos diferentes. Se ha informado que aumenta el volumen específico y produce una miga más blanda en comparación con DATEM (5).

A su vez, las enzimas actúan durante la mezcla y fermentación modificando las estructuras macromoleculares de la harina. La amilasa es la más utilizada, ya que hidroliza parcialmente el almidón, transformándolo en azúcares simples que alimentan la levadura y mejoran la fermentación, el color de la corteza y la retención de humedad en la miga (1). En dosis adecuadas, las amilasas ayudan a retrasar la pérdida de humedad, prolongando así la vida útil del pan. Tanto las enzimas como los emulsionantes pueden actuar de manera complementaria o incluso sustitutiva en los mejoradores.

En los últimos años, varios estudios han explorado el uso combinado de enzimas y emulsionantes. Chowdhury et al. (1) presentaron una revisión exhaustiva de las aplicaciones enzimáticas en la

panadería y destacaron el papel de las α -amilas, xilanasas, lipasas y otras enzimas en el desarrollo de la masa y la extensión de la vida útil. En el campo de los emulsionantes, Valsalan et al. (6) demostraron que tratar harinas de cereales antiguos con SSL, en combinación con procesos de extrusión, mejora la absorción de agua y la estabilidad de la masa, resultando en panes con mayor volumen y mejor textura. De manera similar, Cao y otros. (7) demostró que el uso de emulsionantes y enzimas en pan enriquecido con pulpa de patata aumenta la elasticidad y resistencia de la masa debido al fortalecimiento de la red de gluten.

A pesar de estos avances, persisten lagunas en la literatura sobre el pan convencional en rebanadas. La mayoría de los estudios se centran en productos especializados o en la evaluación aislada de enzimas o emulsionantes. Existen estudios limitados que comparan varios sistemas mejoradores bajo condiciones experimentales idénticas. Por ello, se justifica la investigación de formulaciones novedosas que integren ambos tipos de aditivos de forma sinérgica para optimizar la textura, frescura y calidad general del pan. El objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas del pan en lonchas elaborado con diferentes combinaciones de mejorantes y emulsionantes, incluyendo DATEM, SSL, lecitina de soja y monoglicéridos DMG90, así como dos tipos de enzimas (E y M).

Materiales y métodos

Materiales

Las materias primas utilizadas en la preparación de las formulaciones del mejorador fueron goma guar, carboximetilcelulosa (CMC) (Gelycel F1 1500, Amtex, Medellín, Colombia) y lecitina de soja, que fueron de origen comercial y suministrados por TECNAS S.A. (Itagüí, Colombia); El almidón de yuca (Gel®Starch XP) fue suministrado por Poltec SAS (La Estrella, Colombia); enzima M (Alphamalt Fresh 15, Mühlenchemie, Ahrensburg, Alemania) 3000-4000 U por kg de harina y enzima E (Alphase Extra Bake, Eurogerm S.A.S, Saint Apollinaire, Francia) 2000-3000 U por kg de harina. El emulsionante Monoestearol 95 (DMG90) fue suministrado por Nutresol (Cartagena, Colombia) y se utilizó en todos los mejoradores formulados en laboratorio. Se mezcló con otros dos emulsionantes: éster de ácido tartárico diacetilo de mono- y diglicéridos (DATEM) y estearoil-2-lactilato sódico (SSL) (Protécnica Ingeniería, Yumbo, Colombia), en una proporción 1:1. Además, se comparó un mejorador comercial de pan (Magimix, Lesaffre Colombia, Cali, Colombia) con los mejoradores producidos en este estudio.

Mejoradores

Se prepararon seis mejoradores o tratamientos diferentes variando los tipos de emulsionantes y enzimas utilizados en su producción. Luego se compararon con un tratamiento que utiliza un mejorador comercial. Las muestras fueron sometidas a diversas mediciones para evaluar sus propiedades texturales, fisicoquímicas y farinográficas.

El mejorador está formulado con una proporción específica de diferentes ingredientes: 50% de goma guar, 10% de carboximetilcelulosa sódica (CMC), 20% de emulsionantes, 10% de almidón

de yuca y 10% de enzimas. A partir de esta formulación, se desarrollaron seis tipos de mejoradores variando los tipos de emulsionantes y enzimas utilizados (Tabla 1). Se realizaron pruebas de textura, análisis físicos y pruebas de farinógrafo en estos seis tratamientos, y los resultados se compararon con los obtenidos de un mejorador comercial.

Tabla 1. Composición de los mejoradores experimentales del pan.

Tratamiento	Emulsionante(s) (20%)	Enzima (10%)*	Ingredientes constantes (%)
SOYLEC-M	Lecitina de soja	M	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)
SOYLEC-E	Lecitina de soja	E	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)
DMG90-DATEM-M	DMG90 + DATEM	M	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)
DMG90-DATEM-E	DMG90 + DATEM	E	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)
DMG90-SSL-M	DMG90 + SSL	M	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)
DMG90-SSL-E	DMG90 + SSL	E	Goma de guar (50), CMC (10), almidón de yuca (10)

(*)M es una enzima maltogénica α -amilasa, marca Alphamalt Fresh 15, de Mühlenchemie and E, es una mezcla multienzimática, marca Alphase Extra Bake, de Eurogerm

Propiedades farinográficas

La calidad de la masa se determinaba estimando sus propiedades reológicas mediante un farinógrafo (Farinógrafo-AT®, Brabender® GmbH & Co. KG, Duisburg, Alemania). Se utilizaron diferentes formulaciones de mejoradores con una proporción del 1% basada en la cantidad de harina de trigo. Los parámetros de la masa se evaluaron según el método AACC 59-21 (8), incluyendo el tiempo de desarrollo de la masa (DDT), la absorción de agua (%WA), la estabilidad (S), el índice de tolerancia a la mezcla (MTI) y la caída (D).

Pan

La formulación del pan se basó en la cantidad de harina de trigo de la siguiente manera: 1230 g de harina de trigo (Tres Castillos, Cartagena, Colombia), 56 g de azúcar, 113 g de margarina (Astra, Sigra, Bogotá, Colombia), 12 g de levadura seca (Angel Yeast, Yichang, China), 20 g de sal, 681 g de agua y 40 g de huevo. Los mejoradores desarrollados y el mejorador comercial se añadieron a la formulación del pan en una proporción del 1% según la cantidad de harina de trigo (1230 g). Los ingredientes secos y la margarina se mezclaron usando una batidora (Javar B12LR110V/60/1F10Lt, Bogotá, Colombia) durante menos de un minuto. Luego se añadieron agua, leche y huevo, y la mezcla se amasó hasta formar una masa homogénea, un proceso que duró unos 35 minutos. La masa se dividió en 14 porciones iguales (aproximadamente 150 g cada una) y se dejó reposar durante 10 minutos. Posteriormente, las porciones se amasaban, enrollaban y colocaban en moldes.

Las muestras de masa se fermentaron durante 45 minutos en una cámara de fermentación y luego se hornearon en un horno de gas (GFO-4B, Guangzhou Youjia Machinery Co., China) a 180 °C a temperatura máxima y 240 °C a temperatura baja durante 22 minutos. Tras hornear, los panes se enfriaron a temperatura ambiente durante 60 minutos antes de ser empaquetados para su posterior caracterización mediante pruebas de calidad y textura.

Propiedades texturales

La firmeza de las migas de las muestras de pan en lonchas hechas con los diferentes mejoradores se determinó según el método estándar AACC 74-09 (8). Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron utilizando un texturómetro (CT3 Brookfield, Toronto, Canadá). Los parámetros de prueba eran una velocidad previa a la prueba de 1,0 mm/s, una velocidad posterior a la prueba de 10 mm/s, una velocidad de prueba de 1,7 mm/s y una distancia de compresión de 10 mm (40% de deformación). Se utilizó una sonda cilíndrica de 20 mm de diámetro, y cada muestra tenía un grosor aproximado de 25 mm. Para el análisis de perfiles de textura (TPA), se utilizó una loncha de muestra con un grosor de 80 mm y un ancho de 50 mm. Se empleó el mismo analizador de texturas, equipado con una celda de carga de 50 kg y una sonda rectangular. Los parámetros para esta prueba eran una velocidad previa a la prueba de 2,0 mm/s, una velocidad posterior a la prueba de 5 mm/s, una velocidad de prueba de 2 mm/s y una distancia de compresión de 48 mm (60% de deformación). En ambas pruebas se midieron 14 muestras de cada modelo, obteniendo datos sobre dureza (N), elasticidad (m), cohesión, elasticidad (J) y firmeza de las migas (N).

Propiedades físico-químicas

El volumen específico de los panes se calculó utilizando el método de desplazamiento de semillas de mijo 10-05,01 (8). El rendimiento (%) se calculó como la proporción entre el peso del producto final y el peso de la masa (9). El contenido de humedad del pan se determinó analizando muestras triplicadas tanto de los panes elaborados con el mejorador comercial como de los formulados en laboratorio. El contenido de humedad se determinó utilizando el método AACC 44-19 (8). Esta medición se realizó por separado para las migas de pan y la corteza. La actividad hídrica de las muestras se determinó mediante un higrómetro de punto de rocío a 28 °C (Aqualab Series 3TE, Decagon Devices, Pullman, WA, EE. UU.). Este equipo mide el contenido de humedad en equilibrio de un producto, que se determina por la presión parcial del vapor de agua en su superficie (9).

Porosidad

La porosidad del pan se evaluó mediante análisis de imágenes. Las muestras se cortaban en rodajas de 2,5 cm de grosor y se colocaban sobre el cristal de un escáner. El escaneo se realizó a 600 dpi. Las imágenes obtenidas se analizaron utilizando el software ImageJ, que distingue entre poros y regiones sólidas en función del contraste. Inicialmente, la imagen en color escaneada se convertía a una escala de grises de 8 bits (10). Posteriormente, usando barras de longitudes conocidas (1 cm), los valores de los píxeles se convertían en unidades de distancia. El método se utilizó para examinar el número de poros y la zona de los poros.

Color

Las propiedades del color se evaluaron utilizando un espectrocolorímetro de esfera (SP64, X-Rite Inc., MI, EE. UU.) determinando valores de triestímulo XYZ, que posteriormente se convirtieron en coordenadas de color CIELab*. En este espacio de color, L* representa la luminosidad; a*, enrojecimiento (+a*) o verdor (-a*); y b*, amarillo (+b*) o azulidad (-b*). A partir de estos valores, los parámetros h (matiz) y C (saturación) se calcularon usando las ecuaciones 1 y 2 (11).

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad [1]$$

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

Análisis estadístico

Se produjeron catorce barras de pan para cada mejorador evaluado. Se asignaron siete barras a análisis de texturas, mientras que las siete restantes se utilizaron para análisis físico-químicos y estructurales. De cada pan asignado al análisis de texturas, se recogieron dos rodajas: una se utilizó para el análisis del perfil de textura (TPA) y la otra para la medición de la firmeza de las migajas, resultando en siete réplicas experimentales para cada prueba. Las mediciones instrumentales se realizaron en triplicado en cada rebanada. El pan se consideró la unidad experimental, mientras que las mediciones instrumentales realizadas en cada rebanada se trataron como submuestras. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA). Siempre que se detectaba un efecto significativo del tratamiento, se comparaban las medias utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando Statgraphics Centurion XVIII con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

Resultados y discusión

Propiedades farinográficas

La Tabla 2 muestra los efectos de diferentes mejoradores en el comportamiento de la masa durante el amasado, evaluando parámetros como el tiempo de desarrollo de la masa (DDT), la absorción de agua (%), la estabilidad, el índice de tolerancia (MTI) y la caída. El tratamiento DMG90-SSL-M tuvo el mayor tiempo de desarrollo de la masa; Por lo tanto, era más resistente al amasado y tenía una red de gluten más fuerte. En cambio, el pan con el mejorador comercial tuvo el tiempo de desarrollo más corto, lo que sugiere una masa menos estructurada. Estos resultados son coherentes con los de Kumar y Sharma (12), quienes informaron que los emulsionantes aniónicos como SSL y DATEM mejoran la tolerancia a la masa y promueven la agregación de gluten mediante interacciones electrostáticas, fortaleciendo así la matriz proteica y mejorando la resistencia durante la mezcla. Todos los tratamientos no mostraron diferencias significativas en la absorción de agua. Esto es coherente con estudios que informan que emulsionantes como SSL y DATEM generalmente ejercen una influencia mínima en la absorción de agua farinográfica, aunque mejoran la estabilidad de la masa y promueven una hidratación más uniforme del gluten durante la mezcla al fortalecer las interacciones proteína-lípidos y mejorar la distribución del agua dentro de la matriz (2, 12).

DMG90-SSL-M mostró un valor numéricamente mayor de estabilidad, aunque no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que sugiere una masa más fuerte y mayor tolerancia al amasado excesivo. Los emulsionantes pueden mejorar la estabilidad del gluten y hacer que la masa sea más resistente a la rotura inducida por estrés mecánico. SOYLEC-E tendía a presentar valores MTI más bajos; sin embargo, fue estadísticamente similar a varios otros tratamientos, lo que indica menor sensibilidad al amasado excesivo. El tratamiento sinérgico con emulsionantes mejora las propiedades funcionales de las proteínas del trigo, reforzando la red de gluten y aumentando la resistencia a la deformación durante la mezcla y la fermentación, lo cual es coherente con una mejor estabilidad de la masa indicada por valores MTI reducidos (6). El mejorador comercial también mostró un TMI numéricamente menor, aunque no se detectaron diferencias significativas respecto a varios otros tratamientos. Esto es indeseable porque dificulta el manejo de la masa y da lugar a un pan con una textura muy densa. Además, el tratamiento DMG90-DATEM-E mostró un MTI numéricamente superior, ligeramente superior a 30 BU, lo que indica que la harina es adecuada para la elaboración de pan. El MTI es deseable con valores cercanos a 30 BU pero inferiores a 50 BU, como confirman Tebben et al. (2); Indica una masa más estable y uniforme. Aunque los tratamientos con SOYLEC-E y DMG90-SSL-M presentaron los valores de caída más bajos, lo que indica menor pérdida de consistencia al final del amasado, esta diferencia no fue significativa en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia a una mayor caída en la muestra comercial. Según AbuDujayn et al. (13), una baja caída en la curva de farinógrafo representa un mejor comportamiento plástico de la masa. El tratamiento DMG90-SSL-M tuvo mejor desempeño en las pruebas reológicas. Tenía el tiempo de desarrollo más largo, la mayor estabilidad, el menor MTI y el menor valor de caída. Estos resultados indican que se obtuvo masa más fuerte, estable y resistente.

Tabla 2. Características reológicas del pan hecho con diferentes mejorantes

TRATAMIENTO	DMG90- DATEM - E	DMG90- DATEM- M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DMG90- SSL-M	DMG90- SSL - E	COMERCIAL
DDT (min)	15.28 ±	14,67 ±	15,70 ±	16.13 ±	17.17 ±	16.49 ±	6.105 ±
	0,84 ^{b *}	0,93 ^b	1.11 ^b	0,79 ^b	0.29 ^b	0,56 ^b	0,404 ^a
Absorción de agua (%)	60,03 ±	60,03 ±	60,03 ±	60.067 ±	60.07 ±	60.0 ±	60.0 ±
	0,06 ^a	0,06 ^a	0,06 ^a	0,06 ^a	0,06 ^a	0,0 ^a	0,0 ^a
Estabilidad (min)	17.19 ±	20,48 ±	20,58 ±	20,91 ±	22,49 ±	18,72 ±	18:25 ±
	2,48 ^a	1,84 ^{ab}	2,31 ^{ab}	2,56 ^{AB}	0,55 ^b	3,73 ^{AB}	0,69 ^a
MTI (BU)	33,33 ±	21,33 ±	24,67 ±	20.0 ±	22,67 ±	29,67 ±	16,67 ±
	8.02 ^c	4,93 ^{AB}	9.87 ^{ABC}	2.0 ^{AB}	0,58 ^{ABC}	4.51 ^{a.C.}	10,60 ^a

Dejar el lugar.	24,68 ±	19.33 ±	16,67	10,67 ±	9,67±	17.33 ±	31,67±
(BU)	1.15 a.C.	7.09 b	±	2,08 a	1,53 a	6.03 ab	4.16 c
			6,66				
			ab				

(*) Los valores en la misma fila seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes.
Tiempo de revelado de la masa (DDT). El índice de tolerancia a la mezcla (MTI) y la caída se expresaron en Unidades de Brabender (BU)

Pruebas fisicoquímicas

La Tabla 3 muestra las características físicas del pan rebanado hecho con siete tipos de mejoradores. Muestra que la mayoría de los parámetros evaluados no diferían significativamente entre tratamientos. Esto sugiere que los mejoradores tuvieron efectos similares en las propiedades físicas del producto final. En términos de actividad hídrica (a_w), los valores oscilaron entre 0,931 y 0,945, con medias muy similares entre tratamientos. Estos valores son consistentes con los reportados por Vásquez-Lara et al. (14), quienes evaluaron la actividad del agua en panes elaborados con una sustitución por harina de avena tratada térmicamente y obtuvieron valores de a_w de 0,952-0,962. Esto nos permite concluir que, independientemente del tipo de mejorador incorporado, la actividad del agua del pan no se altera significativamente; Por lo tanto, estos aditivos no afectan a la disponibilidad de agua libre en el producto.

No se observaron diferencias significativas en el volumen específico entre los tratamientos, lo que indica que, en general, los mejoradores utilizados tuvieron un efecto similar en esta propiedad. Los mejoradores SSL y DATEM ayudan a aumentar el volumen específico del pan mejorando la estructura interna de la miga, promoviendo la retención de gases en la masa y resultando en panes más aireados sin alterar su contenido de humedad (4). Estos hallazgos coinciden con los de Ahmed et al. (15). Cuando experimentaron incorporando harina de chía y diferentes niveles de lecitina de soja en el pan, notaron claras mejoras en la frescura y volumen del producto: a medida que aumentaba la cantidad de lecitina en la fórmula, el pan se volvía más esponjoso con una miga blanda y húmeda.

En cuanto a la humedad de las migas, se identificaron dos grupos homogéneos, mientras que la humedad de la corteza no difirió significativamente entre tratamientos. Se han reportado tendencias similares en la literatura que evalúa el efecto de los emulsionantes en los sistemas panificadores, donde SSL, DATEM y mono- y diglicéridos mejoraron las propiedades estructurales y retrasaron el reafirmamiento de las migas sin causar diferencias significativas en el contenido total de humedad. Estos hallazgos sugieren que los emulsionantes influyen principalmente en la distribución del agua y en las interacciones almidón-gluten, más que en la retención total de humedad (2, 6). El uso de emulsionantes mejoró la textura y el volumen del pan, sin alterar el contenido de humedad de las migas en los tratamientos. Los rendimientos no difirieron significativamente entre tratamientos, oscilando entre el 87,72% y el 90,09%. Estos resultados fueron ligeramente superiores a los reportados por Lopez-Tenorio et al. (16), quienes observaron

rendimientos del 79,2% al 81,7% en panes de queso sin gluten elaborados con emulsionantes como DATEM y SSL.

Tabla 3. Características físicas del pan rebanado hecho con 7 tipos de mejoradores.

TRATAMIENTO	DMG90- DATEM -E	DMG90- DATEM-M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DMG90- SSL-M	DMG90-SSL - E	COMERCIAL
jaw	0,93 ±0,01 a *	0,93 ±0,01 ^a	0,94 ± 0,01 ^a	0,94 ± 0,01 ^a	0,94 ± 0,01 ^a	0,94 ± 0,01 ^a	0,94 ± 0,00 ^a
Volumen específico (mL/g)	5,59 ±0,22 ^a	5,83 ±0,09 ^a	5,50 ± 0,19 ^a	5,41 ± 0,71 ^a	6,09 ± 0,88 ^a	5,69 ± 0,41 ^a	6,122 ± 0,842 ^a
Contenido de humedad en la miga (%)	30.19 ± 0.02 ^{ab}	28.37 ±0.01 ^a	31.83 ± 0.01 ^b	30,89 ± 0,01 ^{AB}	31.16 ± 0.02 ^{AB}	29,58 ± 0,02 ^{AB}	30,86 ± 0,02 ^{AB}
Contenido de humedad en la corteza (%)	28.23 ±0.02 ^a	28,48 ± 0,03 ^a	29.19 ± 0.01 ^a	28.38 ±0.02 ^a	27,96±0,01 ^a	27,86 ± 0,02 ^a	29,81± 0,03 ^a
Rendimientos (%)	88,22% ± 0,02 ^a	90,01 % ± 0,02 ^a	90.10 ±0.01 ^a	87,72 ± 0,02 ^a	88,73 ± 0,01 ^a	88,88 ± 0,03 ^a	89,22 ± 0,10 ^a

(*) Los valores en la misma fila seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes.

La Tabla 4 muestra cómo varía la porosidad del pan rebanado según el tipo de mejorador utilizado durante la preparación. En general, todos los tratamientos generaron cantidades similares de poros, con totales que oscilaban entre 720.52 to 836.87. Sin embargo, el pan hecho con SOYLEC-E y el mejorador comercial tenía un mayor número de poros, con una diferencia estadística respecto al DMG90-DATEM-M, lo que permitía una mejor aireación en la miga. La mayoría de los poros en todos los tratamientos eran pequeños (0-0,01 cm²), representando entre el 70 y el 75% del total. El tratamiento SOYLEC-M destacó en este aspecto, logrando el mayor número de poros en el rango de 0 a 0,01, sugiriendo una miga más fina y uniforme.

En términos de porosidad media, el valor numéricamente más alto se observó en pan elaborado con SOYLEC-E, lo que indica una estructura más abierta y ligera. Le siguieron los tratamientos DMG90-SSL-M y DMG90-DATEM-M, que también tuvieron buena aireación. En cambio, el tratamiento DMG90-DATEM-E mostró el valor más bajo, lo que sugiere una miga más densa o menor expansión de poros. Aunque se observaron algunas diferencias entre tratamientos, la mayoría no fueron estadísticamente significativas. Esto significa que, aunque existen variaciones en los números, no siempre se marcan lo suficiente como para considerar que un tratamiento fue claramente mejor que los demás. Cao et al. (7) encontraron que añadir lecitina de soja al 0,65% a la formulación de la pulpa de patata mejoraba significativamente la porosidad, tanto inmediatamente después de hornearlo como durante el almacenamiento. La miga resultante mostraba poros bien distribuidos y una textura más suave y compacta que el pan sin este ingrediente. Estos resultados

coinciden también con los de Codină y Mironeasa (17), quienes, al usar lecitina de soja en niveles moderados (0,2%-1%), encontraron que mejoraba el rendimiento del pan al aumentar ligeramente el volumen específico, retener mejor la humedad y lograr una miga más uniforme y suave.

Tabla 4. Porosidad del pan rebanado hecho con diferentes mejoradores.

TRATAMIENTO		DMG90-DATEM - E		DMG90-DATEM-M		SOYLEC - M		SOYLEC- E		DMG90-SSL-M		DMG90-SSL - E		COMERCIAL	
		N° poros	%	N° poros	%	N° poros	%	N° poros	%	N° poros	%	N° poros	%	N° poros	%
RANGOS DE DISTRIBUCIÓN DE ÁREA (cm^2)	0 – 0.01	557,03 ± 72,82 ^{AB}	74.51	534,06 ± 90,96 ^a	74.12	± 112,86 ^{AB}	73.61	± 197,58 ^c	75.48	573.0 ± 76.24 ^{AB}	72.86	567,83 ± 66,61 ^{AB}	73.74	± 98,71 ^{a.C.}	73.56
	0.011 – 0.05	153,73 ± 27,80 ^{AB}	20.56	137,32± 31.61 ^a	19.06	± 158,93 ^b	20.55	± 54,70 ^{a.C.}	19.80	157.87 ± 27.35 ^b	20.07	162.47 ± 22.48 ^b	21.10	± 179,77 ^c	22.33
	0.051 – 0.1	28:40 ± 4,77 ^a	3.80	33.10 ± 6.28 ^c	4.59	32,8 ± 6,34 ^c	4.24	± 28,57 ^{AB}	3.41	38,87 ± 10,74 ^d	4.94	31,93 ± 5,65 ^{a.C.}	4.14	± 27:07 ^a	3.36
	0.11 – 0.5	8.37 ± 4.33 ^{AB}	1.12	15.84 ± 4.33 ^d	2.20	12,2 ± 6,56 ^c	1.58	± 10.7 ^{a.C.}	1.28	16.73 ± 8.52 ^d	2.13	7,833 ± 2,61 ^a	1.02	6.0 ± 3.14 ^a	0.74
TOTAL PORES		747,57 ± 96,60 ^{AB}		720,52 ± 113,22 ^a		773.4 ± 145.93 ^{ABC}		836.87 ± 246.06 ^c		786.47 ± 99.54 ^{ABC}		770.07 ± 79.80 ^{ABC}		805.17 ± 106.79 ^{a.C.}	
POROSIDAD (%)		34,14 ± 0,00 ^a		36,56 ± 0,01 ^{AB}		35.06 ± 0.02 ^{AB}		37,28 ± 0,03 ^b		36,43 ± 0,02 ^{AB}		34,82 ± 0,00 ^{AB}		35,39 ± 0,01 ^{AB}	

(*) Los valores en la misma fila seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes.

Características de color

La Tabla 5 muestra los parámetros de color (L*, a*, b*, matiz h y saturación C) en el pan hecho con diferentes mejoradores. Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para la mayoría de los parámetros, lo que indica que los mejoradores influyen en la apariencia visual del pan. En cuanto a la ligereza (L*), los panes con SOYLEC-M y SOYLEC-E obtuvieron los valores más altos, mostrando una miga más clara, mientras que DMG90-SSL-M y DMG90-DATEM-M produjeron los panes más oscuros. El valor de a*, asociado a tonos rojos, fue menor en SOYLEC-M y mayor en DMG90-DATEM-M, lo que indica una mayor intensidad roja en este último. En b*, que representa el componente amarillo, los valores más altos correspondían a DMG90-DATEM-E y los más bajos a DMG90-SSL-M. El tono (h) era más alto en SOYLEC-M, lo que sugiere una tendencia hacia tonos más amarillos, mientras que DMG90-SSL-M tenía el matiz más bajo. Finalmente, DMG90-DATEM-E mostró la mayor saturación (C) entre las muestras, en contraste con DMG90-SSL-M. Los panes con lecitina (SOYLEC) tienden a tener una miga más clara con tonos menos saturados, mientras que mejoradores como DATEM y SSL afectan el tono e intensidad del color, y resultan en diferencias visibles a la vista. Los panes que contienen lecitina tienden a mostrar valores más altos de L* (migaja más clara), mientras que DATEM y SSL pueden alterar coordenadas de tono y cromaticidad (a*, b*), produciendo diferencias perceptibles en el color de las migijas. Efectos similares de los emulsionantes sobre los parámetros del color de las migas (L*, a*, b*) han sido reportados por Yeşil

y Levent (18), quienes observaron diferencias significativas en la luminosidad y los atributos de color dependiendo del emulsionante utilizado.

Tabla 5. Parámetros de color: L*, a*, b*, h y C para pan hecho con diferentes mejoradores

TRATAMIENTO	DMG90- DATEM - E	DMG90- DATEM- M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DMG90- SSL-M	DMG90- SSL-E	COMERCIAL
L*	61,13 ± 0,41 a.C. *	58,19 ± 0,36 a	63,27 ± 2,46 ^c	63,42 ± 0,79 ^c	58,88 ± 0,12 ^{AB}	60,05 ± 3,11 ^{AB}	60,12 ± 0,89 ^{AB}
a*	11,41 ± 0,76 a.C.	12,61 ± 0,93 c	9,20 ± 1,62 ^a	9,69 ± 1,93 ^{AB}	10,88 ± 0,77 ^{ABC}	11,33 ± 1,25 ^{ABC}	11,42 ± 0,65 a.C.
b*	31,42 ± 2,47 b	29,14 ± 1,80 AB	28,68 ± 2,0 ^{AB}	28,12 ± 3,0 ^{AB}	25,67 ± 0,46 ^a	28,94 ± 1,89 ^{AB}	29,22 ± 2,20 ^{AB}
h	70,02 ± 0,85 AB	66,54 ± 2,25 ^a	72,28 ± 2,07 ^b	71,06 ± 2,65 ^b	67,02 ± 1,59 ^a	68,52 ± 3,46 ^{AB}	68,59 ± 1,88 ^{AB}
C	33,43 ± 2,54 b	31,77 ± 1,63 ^b	30,14 ± 2,33 ^{AB}	29,77 ± 3,31 ^{AB}	27,89 ± 0,27 ^a	31,12 ± 1,31 ^{AB}	31,40 ± 2,04 ^{AB}

(*) Los valores en la misma fila seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes.

Prueba de firmeza TPA y de migajas

Los valores medios de dureza, elasticidad, cohesión, elasticidad y firmeza de las migas del pan producido con diferentes mejoradores se muestran en la Tabla 6. Se observaron diferencias significativas principalmente en dureza, cohesión, elasticidad y firmeza de las migajas; Por lo tanto, tanto el tipo de emulsionante como el sistema enzimático jugaron un papel decisivo en el desarrollo de la textura de las migas.

En cuanto a dureza, el tratamiento DMG90-SSL-M produjo pan significativamente más blando con valores de dureza más bajos, seguido por DMG90-DATEM-M, mientras que DMG90-DATEM-E produjo el pan más duro. Estos resultados sugieren una interacción sinérgica entre emulsionantes y especificidad enzimática. Según Tebben et al. (2), el SSL mejora la textura del pan principalmente al potenciar la retención de gases durante la fermentación y el horneado temprano, lo que conduce a una mejor expansión de las migas y una menor dureza. En este estudio, la combinación de SSL con monoglicéridos destilados (DMG90) contribuyó aún más al ablandamiento de las migas, probablemente debido al refuerzo de la red de gluten y la estabilización de las células de gas durante la cocción. En cuanto a la firmeza de las migas, se observó el valor más alto para el tratamiento con SOYLEC-E, sin diferencias significativas entre los otros tratamientos

Los monoglicéridos son bien conocidos por su capacidad para formar complejos con la amilosa, limitando la retrogradación del almidón y reduciendo el endurecimiento de las migas durante el almacenamiento (19). Este mecanismo explica los valores de firmeza más bajos observados en formulaciones que contienen DMG90, especialmente cuando se combinan con la enzima M. Karimi et al. (20) reportaron efectos similares, quienes demostraron que emulsionantes como SSL y DATEM combinados con enzimas amilolíticas reducían significativamente la dureza del pan y retrasaban el endurecimiento de las migas hasta 72 horas después de la cocción al estabilizar la matriz almidón-proteína.

Las diferencias observadas entre los tratamientos con la enzima M y la enzima E subrayan aún más

la importancia de la composición enzimática en el desarrollo de texturas. La enzima M consistía exclusivamente en α -amilasas maltogénicas (Alphamalt Fresh 15), que hidrolizan selectivamente las ramas externas de la amilopectina y generan dextrinas de bajo peso molecular que interfieren con la recristalización del almidón. Esta hidrólisis controlada es ampliamente reconocida como un mecanismo eficaz contra el estancamiento. Contribuye a migas más blandas y a una menor firmeza sin debilitar excesivamente la estructura de las migas (21, 22). En consecuencia, las formulaciones que contenían la enzima M presentaban consistentemente valores de dureza y firmeza de migajas más bajos.

En cambio, la enzima E (Alphase Extra Bake, Eurogerm S.A.S.) es una preparación multienzimática compuesta por α -amilasas maltogénicas, hemicelulasas, lipasas y harina de trigo. Aunque estos sistemas multienzimáticos pueden mejorar el manejo de la masa y el volumen de la barra de pan, su actividad combinada también puede producir efectos estructurales más complejos. Las hemicelulasas pueden degradar polisacáridos no almidonados en la pared celular, mejorando la extensibilidad de la masa y la retención de gases, mientras que las lipasas promueven la formación in situ de lípidos activos en la superficie que actúan de forma similar a los emulsionantes (23). Sin embargo, la acción simultánea de múltiples enzimas puede conducir a una modificación menos controlada de la matriz almidón-gluten, lo que podría explicar la mayor dureza observada en los panes DMG90-DATEM-E. Una degradación excesiva de polisacáridos o la reestructuración lipídica pueden debilitar la integridad de las migas, resultando en texturas más firmes tras la cocción.

La masticabilidad no diferió significativamente entre tratamientos, lo que indica que las variaciones en dureza y elasticidad no fueron suficientes para afectar la energía global requerida para la masticación. En cuanto a la cohesión, no se observa una diferencia significativa clara entre los tratamientos, con valores que oscilan entre 0,36 y 0,29. El tratamiento comercial mostró la menor cohesión numérica, mientras que los tratamientos DMG90-DATEM-M, DMG90-SSL-M y SOYLEC-M mostraron la mayor cohesión, sugiriendo una estructura de migajas más internamente unida y resistente. Los tratamientos restantes mostraron valores intermedios, reflejando un equilibrio entre suavidad e integridad estructural.

La elasticidad del producto varía entre 0,03 y 0,04, con valores muy similares según los tratamientos. La lecitina de soja mejora la elasticidad de la masa al fortalecer las interacciones con el gluten y aumentar la resistencia viscoelástica (7). Sin embargo, cuando la lecitina se combina con α -amilasa maltogénica (M), la reducción de la elasticidad puede deberse a una mayor modificación del almidón y a una estructura de migajas más relajada que favorece la suavidad frente a la recuperación elástica.

En general, la formulación DMG90-SSL-M mostró el equilibrio más favorable entre una dureza reducida, una cohesión adecuada y una elasticidad controlada. La acción dirigida de la α -amilasa maltogénica, combinada con los efectos estabilizadores de la SSL y los monoglicéridos, probablemente contribuyó a una red de gluten y almidón más estable y, presumiblemente, a una retrogradación retardada del almidón, lo que resultó en una mejor textura y frescura de las migas. Estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar sistemas enzimáticos con actividad controlada para maximizar la calidad de la textura en las formulaciones de mejoradores de pan.

Tabla 6. Propiedades texturales del pan rebanado con diferentes mejoradores, evaluadas mediante

la prueba de Análisis de Perfil de Textura (TPA).

TRATAMIENTO	DMG90- DATEM - E	DMG90- DATEM- M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DMG90- SSL-M	DMG90- SSL - E	COMERCIAL
Dureza(N)*	13,70 ± 2,09 ^{c*}	9.32 ± 1.66 ^{AB}	11.04 ± 1.5 ^{ABC}	12,38 ± 0,91 ^{a.C.}	8,53 ± 1,11 ^a	10.37± 1.42 ^{ABC}	12.65 ± 4.07 ^{a.C.}
Masticabilidad (J)*	0,14 ± 0,02 ^a	0,12 ± 0,02 ^a	0,12 ± 0,01 ^a	0,14 ± 0,02 ^a	0,11 ± 0,01 ^a	0,12 ± 0,01 ^a	0,14 ± 0,04 ^a
Cohesión	0,33 ± 0,03 ^{ABC}	0,36 ± 0,01 ^c	0,35 ± 0,02 ^{a.C.}	0,31 ± 0,02 ^{AB}	0,36 ± 0,02 ^{a.C.}	0,32 ± 0,05 ^{ABC}	0,29 ± 0,03 ^a
Elasticidad (m)*	0,03 ± 0,00 ^{AB}	0,04 ± 0,00 ^{ab}	0,03 ± 0,00 ^a	0,04 ± 0,00 ^b	0,03 ± 0,00 ^a	0,03 ± 0,00 ^{AB}	0,04 ± 0,00 ^{ab}
Firmeza de la miga (N)*	6.94 ± 1.31 ^{AB}	5,43 ± 1,30 ^a	5,13 ± 0,59 ^a	8,72 ± 1,14 ^c	4,59 ± 0,88 ^a	6,58 ± 1,58 ^{AB}	6,90 ± 1,28 ^{AB}

(*)Los valores en la misma fila seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes. La dureza se expresaba en newtons (N). La masticabilidad se expresaba en julios (J). La elasticidad se expresaba en metros (m).

Prueba de firmeza TPA y migajas para el tratamiento DMG90-SSL-M y el tratamiento comercial

Como demuestran los resultados previos de pruebas de TPA y firmeza de migiolas, el tratamiento DMG90-SSL-M fue el que mejor funcionó. Por ello, se realizaron pruebas de firmeza TPA y de migas en pan elaborado 6 y 10 días antes de este tratamiento, y los resultados se compararon con el tratamiento comercial en los mismos momentos (Tabla 7). Los resultados indican que el pan formulado con DG90-SSL-M mantuvo valores de dureza más bajos que el tratamiento comercial en ambos tiempos de almacenamiento, reflejando una miga más blanda y sugiriendo una mejor estabilidad textural durante el almacenamiento. Este comportamiento sugiere una inhibición más eficaz del endurecimiento de las migajas durante el almacenamiento, lo que comúnmente se asocia con la retrogradación del almidón (2). La α-amilasa maltogénica se asoció con menor firmeza de las migas y un deterioro más lento de la textura durante el almacenamiento, lo que sugiere su contribución a mantener la suavidad del pan (24). Los valores más bajos de masticabilidad observados en DMG90-SSL-M apoyan aún más la percepción de una textura más agradable y menos energética durante la masticación, reforzando su superior rendimiento anti-estancamiento.

En cambio, el pan producido con el mejorador comercial mostró un aumento más pronunciado de dureza a lo largo del tiempo de almacenamiento, lo que indica una pérdida de frescura más rápida. Aunque Magimix está formulado para mejorar la resistencia de la masa y el volumen de la barra de bolsa, su rendimiento ablandador de migas a largo plazo parece menos efectivo que el de la formulación DMG90-SSL-M bajo las condiciones evaluadas en este estudio. Además, los valores de cohesión y elasticidad no mostraron diferencias significativas entre DMG90-SSL-M y el tratamiento comercial en ninguno de los dos momentos de almacenamiento, lo que indica que ambas formulaciones fueron igualmente eficaces para preservar la integridad estructural de las migajas y la recuperación elástica. Esto sugiere que la suavidad mejorada observada en DMG90-SSL-M no se logró a costa de la cohesión o resiliencia de las migajas.

Los valores de firmeza de las migas significativamente más bajos observados en el pan DMG90-

SSL-M durante el almacenamiento demuestran su mayor capacidad para preservar la suavidad de las migas y retrasar el endurecimiento del pan en comparación con el mejorador comercial. La interacción sinérgica entre SSL, monoglicéridos y α -amilasa maltogénica probablemente contribuyó a una matriz almidón-gluten más estable, resultando en una mejor suavidad de las migas y en el mantenimiento de la frescura del pan durante el almacenamiento (22). Estos resultados ponen de manifiesto el potencial del DMG90-SSL-M como alternativa competitiva a los mejoradores comerciales de pan para aplicaciones que requieren suavidad prolongada y estabilidad textural.

Tabla 7. Propiedades texturales del pan en lonchas con mejorador DMG90-SSL-M y mejorador comercial, evaluadas mediante Análisis de Perfil de Textura (TPA) y pruebas de firmeza de migas.

TRATAMIENTO	DMG90-SSL-M		COMERCIAL	
	6 días	10 días	6 días	10 días
Dureza(N)*	8.02 ± 1.58	9,78 ± 1,58	12:25 ± 1:85	12.41 ± 2.08
Masticabilidad (J)*	0,11 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,16 ± 0,03
Cohesión	0,38 ± 0,04	0,37 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,36 ± 0,01
Elasticidad (m)	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,00
Firmeza de la miga (N)*	4,75 ± 0,52	6.15 ± 1.08	7,38 ± 0,59	13.38 ± 1.58

*La firmeza y dureza de las migas se expresaron en newtons (N). La masticabilidad se expresaba en julios (J). La elasticidad se expresaba en metros (m). Los valores se presentan como media ± desviación estándar (n = 7). Las mediciones a los 6 y 10 días se presentan con fines descriptivos para ilustrar la evolución de la textura del pan durante el almacenamiento. No se realizaron comparaciones estadísticas entre los tiempos de almacenamiento ni los tratamientos.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que incorporar emulsionantes y enzimas en la formulación del pan en rebanadas puede mejorar significativamente sus propiedades reológicas, estructurales, físicas y sensoriales. En particular, la combinación de monoglicéridos DMG90 con enzimas SSL y tipo M (tratamiento DMG90-SSL-M) mostró el mejor rendimiento global, con el mayor tiempo de desarrollo de la masa, la mayor estabilidad farinográfica, bajo índice de tolerancia a la mezcla y menor caída. Por ello, produce una masa más resistente, resistente a la sobremezcla y que muestra un excelente comportamiento tecnológico durante la repostería.

En cuanto a la textura, el análisis de perfil textural (TPA) mostró que el DMG90-SSL-M también producía una miga más blanda y con menor firmeza que los otros tratamientos, resultando en un pan más tierno y de mayor calidad. Esta mejora se debe al efecto estabilizador del monoglicérido

y su interacción sinérgica con las enzimas, que favorece la estructura interna y la retención de humedad. Además, se encontró que las formulaciones con lecitina de soja (SOYLEC-E y SOYLEC-M) presentan una porosidad más homogénea, una mayor proporción de poros pequeños y un color de miga más claro, características que los consumidores aprecian en productos de panadería.

El tratamiento DMG90-SSL-M muestra una clara ventaja sobre el tratamiento comercial, manteniendo una miga más blanda con menor dureza, masticabilidad y firmeza durante todo el almacenamiento. Esto sugiere que este tratamiento ayuda a prolongar la frescura del pan y retrasar el endurecimiento sin alterar significativamente la cohesión o elasticidad de la miga.

Aunque no todas las variables mostraron diferencias estadísticamente significativas, las tendencias observadas respaldan la efectividad de los mejoradores utilizados, especialmente cuando se aplican en combinaciones específicas. En conjunto, estos hallazgos indican que el uso de emulsionantes y enzimas no solo representa una alternativa funcional viable a los mejoradores comerciales, sino que también puede mejorar la calidad tecnológica y sensorial del pan en rebanadas, con aplicaciones prácticas en la industria de la panadería actual.

Aplicaciones prácticas

Los resultados de este estudio ofrecen orientación práctica para formular mejoradores de pan que mejoren la suavidad de las migas, la estabilidad de la masa y la vida útil en la producción industrial de pan en lonchas. Una combinación de monoglicéridos destilados (DMG90), estearoil lactilato de sodio (SSL) y α -amilasa maltogénica fue más eficaz que un mejorador comercial para mantener la suavidad de las migas y retrasar el reafirmamiento durante el almacenamiento. Estos hallazgos ofrecen a los fabricantes de panadería una estrategia alternativa de formulación para mejorar la frescura del producto sin alterar el contenido de humedad ni el volumen específico. El estudio también aclara cómo los sistemas de una sola enzima se diferencian de las mezclas multienzimáticas en su impacto en la reología y textura de la masa. Esta información apoya una selección de ingredientes más específica. En última instancia, esta investigación contribuye a la optimización de la calidad del pan industrial, la reducción de pérdidas relacionadas con el endurecimiento y la mejora de la aceptación por parte del consumidor, promoviendo una mejor conservación de la textura con el tiempo.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores no declaran conflictos de interés.

Declaraciones éticas

Los autores afirman que esta investigación se llevó a cabo de acuerdo con los principios de integridad científica, responsabilidad académica y cumplimiento de la normativa institucional vigente. Este estudio no implicó experimentos con humanos ni animales.

¿Por qué se llevó a cabo este trabajo?

Este trabajo se llevó a cabo para abordar un desafío clave en la elaboración industrial de pan: lograr

una calidad de producto consistente mientras se prolonga la vida útil, especialmente retrasando el endurecimiento de las migas durante el almacenamiento. Aunque los emulsionantes y las enzimas se usan comúnmente como mejoradores del pan, sus efectos combinados (sinérgicos) sobre la reología de la masa, la estructura de las migas y la estabilidad de la textura no se comprenden completamente.

El estudio tenía como objetivo evaluar sistemáticamente cómo los diferentes sistemas emulsionantes–enzimáticos influyen en el rendimiento de la masa y la calidad del pan, y determinar si las formulaciones adaptadas podrían superar a un mejorador comercial. Además, buscaba generar conocimiento aplicado para apoyar el desarrollo de soluciones de repostería más eficaces y competitivas para la industria alimentaria.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes mostraron que la formulación que combina DMG90, SSL y α -amilasa maltogénica (Enzima M) mostró el mejor rendimiento global. Este sistema mejoró significativamente la estabilidad de la masa, aumentó el tiempo de revelado y aumentó la resistencia al esfuerzo mecánico durante la mezcla. En cuanto a la calidad del pan, producía menor dureza y firmeza de las migas, manteniendo una textura más suave tanto inmediatamente después de hornearlo como durante el almacenamiento.

Es importante destacar que no se observaron diferencias significativas en el contenido de humedad ni en el volumen específico entre los tratamientos, lo que indica que las mejoras en la textura se debieron principalmente a modificaciones estructurales y no a cambios en el contenido de agua. Además, las formulaciones basadas en lecitina resultaban en un color de migaja más claro, mientras que DATEM y SSL influían en la intensidad del color.

Durante el almacenamiento, la formulación DMG90–SSL–M superó al mejorador comercial al conservar mejor la suavidad de las migas y retrasar el firmezo, demostrando su eficacia para prolongar la frescura del pan.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados contribuyen tanto científica como tecnológicamente al campo de la elaboración del pan. Desde una perspectiva científica, aportan nuevas perspectivas sobre las interacciones sinérgicas entre emulsionantes y sistemas enzimáticos, especialmente cómo la α -amilasa maltogénica combinada con DMG90 y SSL mejora la estabilidad de la masa y retrasa la retrogradación del almidón. Esto ayuda a aclarar los mecanismos responsables del ablandamiento de migas y la preservación de la textura durante el almacenamiento.

Desde una perspectiva tecnológica e industrial, el estudio demuestra que las formulaciones mejoradoras dirigidas pueden diseñarse para superar a los productos comerciales en mantener la suavidad del pan a lo largo del tiempo, sin afectar propiedades clave como el contenido de humedad o el volumen específico. Esto ofrece una estrategia práctica para optimizar la calidad del pan, prolongar la vida útil y mejorar la consistencia del producto en procesos industriales de

panadería.

Declaración de créditos de contribución de autoría

Conceptualización – Ideas: Eduardo Rodríguez Sandoval, Alejandro Mejía-Villota; **Curación de datos:** Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama, Juan Felipe Murillo-Ramírez; **Análisis formal:** Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama, Guillermo Antonio Correa Londoño; **Adquisición de financiamiento:** Eduardo Rodríguez Sandoval, Alejandro Mejía-Villota; **Investigación:** Jheisy Jhireth Ayala Valderrama, Juan Felipe Murillo Ramírez; **Metodología:** Silvia Molina, Sandra Buitrón, Francisco Pino; **Administración del proyecto:** Eduardo Rodríguez Sandoval; **Supervisión:** Alejandro Mejía-Villota, Eduardo Rodríguez Sandoval; **Validación:** Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama; **Visualización – Preparación:** Eduardo Rodríguez Sandoval, Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama; **Redacción – borrador original – Elaboración:** Silvia Molina, Sandra Buitrón; **Redacción – revisión y edición – Elaboración:** Eduardo Rodríguez Sandoval, Jheisy Jhireth Ayala-Valderrama, Guillermo Antonio Correa Londoño, Alejandro Mejía-Villota.

Implicaciones éticas: ninguna declarada; Conflictos de intereses: ninguno declarado.

Referencias

- (1) Chowdhury MAH, Sarkar F, Reem CSA, Rahman, SM, Mahamud, AGMSU, Rahman MA, Ashrafudoulla M. Aplicaciones enzimáticas en panadería: desde el desarrollo de la masa hasta la extensión de la vida útil. Int. J. Biol. Macromol. 2024; 282: 137020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137020>
- (2) Tebben L, Chen G, Tilley M, Li Y. Mejora de la masa integral y las propiedades del pan mediante emulsionantes. Grain Oil Sci Technol. 2022; 5(2): 59-69.
<https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.05.001>
- (3) Baiano A, Fiore A. Consecuencias de la adición de mejoradores para la elaboración del pan a formulaciones fuertes a base de harina. Pol. J. Food Nutr. Sci. 2026; 76(1): 5-17.
<https://doi.org/10.31883/pjfn/215473>
- (4) Gomez AV, Buchner D, Tadini CC, Añón MC, Puppo MC. Emulsionantes: Efectos en la calidad del pan de trigo enriquecido con fibra. Tecnología de Bioprocesos Alimentarios 2013; 6:1228–1239.
<https://doi.org/10.1007/s11947-011-0772-7>
- (5) Eduardo M, Svanberg U, Ahrné L. Efecto de los hidrocoloides y emulsionantes en la calidad de repostería de panes compuestos de yuca, maíz y trigo. Int. J. Food Sci. 2014; 2014(1): 479630.
<https://doi.org/10.1155/2014/479630>
- (6) Valsalan A, Swaminathan I, Kadam A, Koksel F, Malalgoda M. Mejora de la calidad panificadora de cereales antiguos mediante tratamiento sinérgico con emulsionantes y procesamiento por extrusión. J. Food Sci. 2025; 90(4): e70206.
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.70206>
- (7) Cao Y, Jiang L, Suo W, Deng Y, Zhang M, Dong S, Li H. Influencia de emulsionantes y enzimas en las propiedades reológicas de la masa y las características de calidad del pan al vapor enriquecido con pulpa de patata. Química alimentaria. 2021; 360: 130015.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130015>

(8) AACC. Métodos aprobados de análisis, 11ª ed. Asociación Americana de Químicos de Cereales. San Pablo. MN. EE. UU.: Asociación de Cereales y Cereales; 2000. <https://www.cerealsgrains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx>

(9) Rodríguez-Sandoval E, Prasca-Sierra I, Hernández V. Efecto del almidón de yuca modificado como sustituto de la grasa en la textura y las características de calidad de los muffins. *J. Comida, Meas. Charact.* 2017; 11(4): 1630-1639.

<https://doi.org/10.1007/s11694-017-9543-0>

(10) Zapata F, Zapata E, Rodríguez-Sandoval E. Influencia del goma guar en la calidad de horneado del pan de queso sin gluten elaborado con masa congelada y refrigerada. *Int. J. Ciencia de la Comida.* 2019; 54(2): 313-324.

<https://doi.org/10.1111/ijfs.13936>

(11) Goswami D, Gupta RK, Mridula D, Sharma M, Tyagi SK. Magdalenas de mijo de corral: Propiedades físicas, texturales y sensoriales, *LWT - Food Sci Technol.* 2015; 64 (1): 374-380.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.060>

(12) Kumar AK, Sharma GK. La funcionalidad de los diferentes tensioactivos en las características reológicas y microestructurales de la mezcla multigrano incorporaba harina de trigo. *J Texture Stud.* 2017; 48(1): 57-65.

<https://doi.org/10.1111/jtxs.12209>

(13) AbuDujayn AA, Mohamed AA, Alamri MS, Hussain S, Ibraheem MA, Qasem AAA, Shamlan G, Alqahtani NK. Relación entre las propiedades de la masa y el rendimiento al hornear del pan en sartén: la función de las maltodextrinas y las gomas naturales. *Moléculas.* 2023; 28(1): 1.

<https://doi.org/10.3390/molecules28010001>

(14) Vásquez-Lara F, Verdú-Amat S, Islas-Rubio AR, Barat-Baviera JM, Grau-Meló R, Granados-Nevárez MDC, Ramírez-Wong B. Efecto del tratamiento térmico sobre la harina de avena utilizada como sustituto de la harina de trigo en la elaboración de pan. *Biotecnia.* 2021; 23(2): 55-64.

<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1388>

(15) Ahmed IBH, Hannachi A, Haros CM. Efecto combinado de la incorporación de harina de chía y lecitina de soja en la calidad nutricional y tecnológica del pan fresco y durante el raldijo. *Comida.* 2020; 9(4): 446.

<https://doi.org/10.3390/foods9040446>

(16) López-Tenorio JA, Rodríguez-Sandoval E, Sepúlveda-Valencia JU. (2015). La influencia de diferentes emulsionantes en las características físicas y texturales del pan de queso sin gluten. *J Texture Stud.* 2015; 46(4): 227-239.

<https://doi.org/10.1111/jtxs.12121>

(17) Codină GG, Mironeasa S. El efecto de la lecitina en las características alveográficas, en la panadería y en las cualidades sensoriales de la harina de trigo. *Comida Entorno Seguro.* 2016; 12.

<https://fens.usv.ro/index.php/FENS/article/view/140>

(18) Yeşil S, Levent H. Los efectos de los emulsionantes en la calidad y las características de desgaste del pan sin gluten que contiene trigo sarraceno fermentado, quinoa y amaranto. *J Conserva de Proceso Alimenticio.* 2022; 46(7): e16668.

<https://doi.org/10.1111/jfpp.16668>

(19) Xu Q, Sang S, Wang Y, Tan CP, Peplowski L, Tang X, Meng M, Lei H. Efecto del monoestearato de glicerol en la estructura y retrogradación del almidón de trigo gelatinizado a altas temperaturas. *Grain Oil Sci Technol*. 2025; 8 (2025): 175-181.

<https://doi.org/10.1016/j.gaost.2025.05.003>

(20) Karimi M, Sheikholeslami Z, Ghiafehdavoodi M, Ghods-Rohani M. Investigación del efecto de emulsionantes y enzimas sobre las características fisicoquímicas y organolépticas del pan plano fermentado mediante método directo y esponjoso. *J Ing. Bioproceso Alimentario* 2023; 6(1), 18-25.

<https://doi.org/10.22059/jfabe.2023.352000.1134>

(21) Chen Y, Severin E, Schubert S, Gorgerat S, Boschet E, Baltensperger L, Stadel C, Kuster S, Fischer P, Windhab E. Influencia de la adición de amilasa en la calidad del pan y en el entallado del pan. *Tecnología en Ciencia Alimentaria* 2021; 6: 1143-1150.

<https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00158>

(22) Liu P, Ma L, Duan W, Gao W, Fang Y, Guo L, Yuan C, Wu Z, Cui B. Amilasa maltogénica: Su estructura, modificación molecular y efectos sobre el almidón y los productos a base de almidón. *Polím de carbohidratos*. 2023; 319: 121183.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121183>

(23) CD de Stemler, Scherf KA. Mejora de las propiedades para hornear pasteles por las lipasas en comparación con un emulsionante tradicional. *Química alimentaria: X*. 2022; 15: 100442.

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100442>

(24) Haghighat-Kharazi S, Kasaai MR, Milani JM, Khajeh K. (2020). Optimización de la encapsulación de amilasa maltogénica en una mezcla de maltodextrina y cera de abeja, y su aplicación en pan sin gluten. *J Texture Stud*. 2020; 51(4): 631-641.

<https://doi.org/10.1111/jtxs.12516>