



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN QUÍMICA DE ALIMENTOS

## TESIS

### ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DETERIORO DE UN PAN TRADICIONAL (MESTIZA) Y SU INFLUENCIA EN LA VIDA ÚTIL

**Para obtener el título de**  
**Licenciada en Química de Alimentos**

#### **PRESENTA**

Yesica Calva López

#### **Directora**

Dra. Elizabeth Contreras López

#### **Codirectora**

Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Mineral de la Reforma, Hidalgo, Noviembre, 2025

Mineral de la Reforma, Hgo., a 24 de marzo de 2025

Número de control: ICB1-D/441/2025  
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO  
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Química de Alimentos **Yesica Calva López**, quien presenta el trabajo de titulación "**Estudio de los parámetros de deterioro de un pan tradicional (mestiza) y su influencia en la vida útil**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Judith Jaimez Ordaz

**Secretario:** Dr. Luis Guillermo González Olivares

**Vocal:** Dra. Elizabeth Contreras López

**Suplente:** Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.



Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICB1

GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184  
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001  
dirección\_icbi@uaeh.edu.mx,  
vergarar@uaeh.edu.mx

Dedico esta tesis a Dios, a la virgen, a mis hermanas y familia que siempre estuvieron de la mano en este camino, no fue tan fácil pero juntos lo logramos.

En especial la dedico a mis padres, por darme la oportunidad de seguir mis sueños, que junto con ellos nunca nos rendimos que fueron años difíciles entre días malos y buenos. Pero hoy tengo la dicha de decir que lo logramos juntos y gracias a su apoyo hoy culmino uno de mis sueños más deseados.

---

## Agradecimientos

A Dios y a la virgen por permitirme realizar uno de mis más grandes sueños, llegando hasta donde estoy ahora, culminando mi tesis y poder disfrutar de este esfuerzo con mis seres queridos.

Agradezco a mis padres Lucina López y Carlos Calva, que, gracias a su dedicación, esfuerzo y su confianza que siempre me tuvieron pude lograr lo que deseaba desde hace muchos años. Así mismo agradeciendo enormemente los consejos que solo ellos sabían darme, por siempre confiar en mí, aunque había días difíciles, gracias por esa paciencia infinita que mostraban hacia mí y porque gracias a ellos en estos momentos puedo decir que me llevo la mejor herencia que un hijo puede recibir.

A mis hermanas Mariela y Karla por enseñarme que quien se esfuerza puede llegar a lograr lo que desea. Después de muchos años de trabajo y nunca dejarme sola pude culminar uno de mis mayores sueños que desde pequeñas compartíamos entre las pláticas de infancia, agradezco sus consejos y que nunca perdieran la fe en que lo lograría.

Agradezco de una manera muy especial a la Dra. Elizabeth Contreras López, por brindarme la oportunidad de poder trabajar con ella, gracias su apoyo y compartiéndome día a día lo más valioso que tiene que es su sabiduría, confiando en mi desde el primer momento, este trabajo de investigación esta culminado gracias a la guía que me brindo siempre.

Agradezco al Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores por nunca perder la esperanza en que lo lograría y que gracias a sus vibras positivas, nunca me rendí y seguí adelante, por enseñarme técnicas nuevas, el uso de nuevos programas para poder tener una mejor organización y poder haber terminado este trabajo con la mejor calidad que pude haber hecho.

Agradezco en general a las personas que me rodearon en este proceso tan largo, pero que gracias a sus consejos motivadores nunca dejaron que me rindiera, por último y esto no quiere decir que no significativo, agradezco a mi prima que siempre me motivo a seguir adelante y darme cuenta de que el procesó seria largo, pero iba a hacer un logró que deseaba entonces valía la pena luchar.

---

# Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Lista de acrónimos	vii
Abstract	ix
Resumen	xi
Introducción	xiii
1. Antecedentes generales	1
1.1. Introducción . . . . .	1
1.1.1. Ingredientes y proceso de elaboración . . . . .	2
1.1.2. Composición nutricional . . . . .	3
1.1.3. Producción y consumo nacional . . . . .	4
1.2. Pan mestiza . . . . .	4
1.3. Vida útil . . . . .	4
1.3.1. Factores que conducen al deterioro del pan . . . . .	6
1.4. Métodos de conservación . . . . .	6
1.4.1. Estudios de vida útil en pan . . . . .	8
1.5. Conclusiones y perspectivas . . . . .	9
1.6. Referencias . . . . .	9

<b>2. Estudio de vida útil de pan mestiza</b>	<b>13</b>
2.1. Introducción . . . . .	14
2.2. Materiales y métodos . . . . .	14
2.2.1. Muestras . . . . .	14
2.2.2. Composición proximal . . . . .	14
2.2.3. Estudio de vida útil . . . . .	14
2.2.4. Actividad de agua (AW) . . . . .	15
2.2.5. Pérdida de peso . . . . .	15
2.2.6. Consideraciones cinéticas . . . . .	15
2.2.7. Análisis termodinámico . . . . .	16
2.3. Resultados y discusión . . . . .	16
2.3.1. Actividad de agua . . . . .	16
2.3.2. Humedad . . . . .	17
2.3.3. Pérdida de peso . . . . .	17
2.4. Análisis cinético . . . . .	22
2.5. Análisis termodinámico . . . . .	26
2.6. Análisis proximal . . . . .	27
2.7. Conclusiones y perspectivas . . . . .	28
2.8. Referencias . . . . .	29
<b>A. Material suplementario</b>	<b>31</b>
A.1. Análisis proximal . . . . .	31
A.2. Resultados del análisis de varianza . . . . .	33
Referencias . . . . .	34

---

# Índice de figuras

1.1. Pan tradicional “Mestiza” . . . . .	5
1.2. Retrogradación del almidón. . . . .	7
2.1. Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ). . . . .	18
2.2. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW del pan tradicional mestiza en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento. . . . .	19
2.3. Valores de cambio en el contenido de humedad (g de $\text{H}_2\text{O}$ 100 g <sup>-1</sup> de muestra) de pan tradicional mestiza obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ). . . . .	20
2.4. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad del pan tradicional mestiza en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento. . . . .	21
2.5. Valores de cambio en el peso (g) de pan tradicional mestiza obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ). . . . .	24
2.6. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo del peso del pan tradicional mestiza en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento. . . . .	25



---

# Índice de tablas

1.1. Composición química de pan tradicional blanco (g/100g) . . . . .	3
2.1. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para pan mestiza . . . . .	22
2.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para pan mestiza . . . . .	23
2.3. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para pan mestiza . . . . .	23
2.4. Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de orden cero que describe la variación del peso. . . . .	27
2.5. Resultados del análisis proximal de galletas con chispas de chocolate. . . . .	28
A.1. ANOVA completo de la AW del pan tradicional mestiza. . . . .	33
A.2. ANOVA completo del humedad del pan tradicional mestiza. . . . .	33
A.3. ANOVA completo del peso del pan tradicional mestiza. . . . .	34



---

## Lista de acrónimos

<b>AFC</b>	atributos fisicoquímicos de calidad . . . . .	14
<b>ANOVA</b>	análisis de varianza . . . . .	16
<b>AW</b>	actividad de agua . . . . .	14
<b>CANAINPA</b>	Cámara Nacional de la Industria Panificadora . . . . .	4
<b>PAVU</b>	pruebas aceleradas de vida útil . . . . .	14
<b>VU</b>	vida útil . . . . .	4



---

# Abstract

A traditional bread manufacturing company from Atotonilco el Grande in the state of Hidalgo, Mexico, produces “Mestiza” traditional bread, for which there is limited information. Determining the best storage conditions for this product presents a significant opportunity, not only to extend the shelf life of Mestiza bread but also to contribute to the knowledge about this bread and improve preservation techniques for this tradition. The shelf life of bread is mainly affected by physicochemical phenomena such as staling or moisture migration, as well as microbiological phenomena like mold growth. While these are common issues for such foods, it is important to consider that internal factors such as the interaction of ingredients, or external factors like storage conditions, will influence its shelf life.

This thesis focused on studying the variations in the physicochemical quality attributes (moisture, weight variation, and water activity) of Mestiza bread, as these attributes are useful for determining freshness and serve as markers of deterioration.

Considering the above, the objective of this thesis was to study the deterioration parameters of Mestiza traditional bread through kinetics and the application of statistical tests to identify the deterioration factor and prolong the product’s shelf life.

Specific objectives were developed in different chapters, including: conditioning bread samples by applying different storage temperatures to accelerate deterioration reactions, monitoring selected physicochemical parameters through kinetics to identify the deterioration factor in the bread, and analyzing the obtained data through statistical tests and the Arrhenius equation to establish the shelf life of the studied product. These objectives were addressed in different chapters, summaries of which are presented below:

1. **Chapter 1: General Background.** This chapter focused on providing the general context of bread as a food, presenting background information to understand the scope of the work, and specifically mentioning Mestiza traditional bread, which was similarly described. Aspects such as ingredients and their functionality in the food matrix were covered, as well as concepts about bread shelf life, factors affecting it, various types of shelf life studies, and preservation methods employed to counteract bread deterioration. Lastly, a review of shelf life studies conducted on various bread varieties was presented.

**2. Chapter 2: Shelf Life Study of Mestiza Bread.** This chapter focused on determining the shelf life of Mestiza traditional bread by monitoring and controlling changes in its physicochemical quality attributes (moisture content, weight variation, and water activity) using the accelerated testing method to identify the critical quality attribute. The methodology included the implementation of kinetic models. For statistical analysis, two-way ANOVA and Tukey's post-hoc tests were used to evaluate the effect of time and storage temperature on changes in quality attributes, using the R programming language. The results showed significant differences in the physicochemical quality attributes of Mestiza bread depending on time and storage temperature, suggesting that these factors have a critical impact on the product's shelf life. It was determined that a zero-order model best fit the data, and at 40°C, weight loss was highlighted as the most influential quality attribute with an  $R^2$  value of  $0.9936 \pm 0.0016$  and a constant  $k$  of  $-0.2829 \pm 1.42 \times 10^{-2}$ .

In conclusion, this work developed a prediction method based on an ordinary least squares regression combined with an accelerated shelf life study, which was efficient and specialized for Mestiza bread. A low-cost yet reliable quality monitoring tool was obtained. It is expected that the results of this study will provide tools for traditional Mexican bread producers or anyone interested in extending bread shelf life, consequently improving inventory management and reducing food waste.

---

## Resumen

UNA EMPRESA productora de pan tradicional del municipio de Atotonilco el Grande, en el estado de Hidalgo, México, elabora el pan tradicional “Mestiza”, del cual se dispone de poca información. Por lo tanto, determinar las mejores condiciones de almacenamiento para este producto representa una gran oportunidad, no solo para prolongar su vida útil, sino también para ampliar el conocimiento sobre el pan “Mestiza” y mejorar las técnicas para preservar esta valiosa tradición. La vida útil de los productos de panificación se suele ver afectada principalmente por fenómenos fisicoquímicos como el envejecimiento del pan o la migración de humedad, o bien, por fenómenos microbiológicos como el crecimiento de moho. Aunque son problemáticas generales en este tipo de alimentos, es importante considerar que factores internos como la interacción de sus ingredientes, o externos como las condiciones de almacenamiento, tendrán influencia en su periodo de vida útil.

Debido a esto, la presente tesis se enfocó en el estudio de las variaciones de los atributos fisicoquímicos de calidad (humedad, variación de peso y actividad de agua) en pan tipo Mestiza, estos atributos suelen ser útiles para la determinación de frescura, por lo que también sirven como marcadores de deterioro.

Considerando lo anterior planteado, se determinó que el objetivo de esta tesis fue estudiar los parámetros de deterioro de un pan tradicional tipo “Mestiza” mediante la realización de cinéticas y la aplicación de pruebas estadísticas para identificar el factor de deterioro y prolongar la vida útil del producto. Asimismo, se desarrollaron diferentes capítulos para atender el objetivo global, incluyendo: acondicionar las muestras de pan mediante la aplicación de diferentes temperaturas de almacenamiento para acelerar las reacciones de deterioro, realizar el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos seleccionados a través de la realización de cinéticas para identificar el factor de deterioro en el pan, y analizar los datos obtenidos a través de pruebas estadísticas, y de la ecuación de Arrhenius, para establecer la vida útil del producto estudiado. Estos objetivos se abarcaron en diferentes capítulos, cuyos resúmenes se presentan a continuación:

- 1. Capítulo 1. Antecedentes generales.** Se centró en proporcionar el contexto general del pan como alimento, ofreciendo antecedentes que permiten entender el alcance del trabajo, además de incluir una descripción del pan tradicional “Mestiza”. Se abordaron aspectos como los ingredientes y su función dentro de la matriz alimentaria, así como conceptos relacionados

con la vida útil del pan, los factores que la afectan, los distintos tipos de estudios sobre vida útil y los métodos de conservación empleados para mitigar el deterioro del pan. Finalmente, se presentó una revisión de investigaciones sobre la vida útil de diversas variedades de pan.

2. **Capítulo 2. Estudio de vida útil de pan mestiza.** Se enfocó en la determinación de la vida útil del pan tradicional mestiza, mediante el monitoreo y control de los cambios en sus atributos fisicoquímicos de calidad (contenido de humedad, variación de peso y actividad de agua), utilizando el método de pruebas aceleradas para lograr identificar el atributo crítico de calidad. La metodología empleada incluyó la implementación de modelos cinéticos. Para el análisis estadístico se utilizó el ANOVA de dos vías y pruebas *post-hoc* de Tukey, para evaluar el efecto del tiempo y la temperatura de almacenamiento sobre los cambios en los atributos de calidad, utilizando el lenguaje de programación R. Los resultados mostraron diferencias significativas en los atributos fisicoquímicos de calidad del pan mestiza en función del tiempo y de la temperatura de almacenamiento, lo que sugiere que estos factores tienen un impacto crítico en la vida útil de los productos. Se determinó que en un modelo de orden 0 los datos tenían mejor ajuste, además a la temperatura de 40°C se destacó la pérdida de peso como el atributo de calidad con mayor influencia teniendo un valor de  $R^2 = 0.9936 \pm 0.0016$  y una constante  $k$  de  $-0.2829 \pm 1.42 \times 10^{-2}$ .

Finalmente, la conclusión de este trabajo de investigación estableció el desarrollo un método de predicción basado en una regresión lineal de múltiples cuadrados ordinarios en conjunto con un estudio acelerado de vida útil, el cual fue eficiente y especializado para el pan tipo mestiza. Se obtuvo una herramienta de monitoreo de calidad a bajo costo pero con buenas bases de confiabilidad. Se espera que el alcance de estos resultados provea de herramientas a productores de pan tradicional mexicano o cualquier interesado para aportar a la extensión de vida útil del pan y a consecuencia la mejora de gestión de inventarios y reducción de desperdicio de alimentos.

---

## Introducción

DE ACUERDO a la NOM-247-SSA1-2008, el pan es definido como: el producto que resulta de hornear una masa obtenida de harina fermentada, agua y sal, adicionado o no de aceites y grasas comestibles, leche, otros ingredientes y aditivos para alimentos. Además, en la misma definición se menciona la adición de azúcar y frutas, y procesos como el amasado, fermentado, moldeado y cocido al horno o por fritura en grasas o aceites comestibles, para referirse a pan dulce. Gracias a esta definición se puede inferir la gran variedad de pan existente en México, desde variedades tan conocidas como las conchas u orejas, hasta variedades más tradicionales como el pan mestiza.

El pan mestiza es un tipo de pan tradicional que se caracteriza por la mezcla de harina de trigo blanca y trigo molido, además de un toque de piloncillo. Esta combinación de ingredientes es lo que le da su característico nombre. Los ingredientes únicos y la escasa literatura disponible sobre este pan tradicional representan un área de oportunidad para describir sus atributos fisicoquímicos de calidad y cómo estos evolucionan durante su almacenamiento.

Un problema que afecta la industria panadera, particularmente la panadería artesanal o no industrializada, son los cambios fisicoquímicos que ocurren en el pan una vez que este es horneado. Estos determinan la pérdida de frescura del producto, lo que impacta negativamente en su textura y sabor, y conducen al envejecimiento del pan en el transcurso de unos pocos días. Además, en función de las propiedades fisicoquímicas del producto, refiriéndose principalmente a la actividad de agua, puede ocurrir el deterioro microbiológico que es causado principalmente en el pan por bacterias, levaduras y mohos. Las relaciones de los diversos atributos y tipos de deterioros, resaltan la importancia de conocer su comportamiento ante diferentes condiciones de almacenamiento.

En el estado de Hidalgo, existe una microempresa dedicada a la elaboración de pan artesanal, libre de aditivos y conservadores. Dicha microempresa se interesa en conocer los factores de deterioro que afectan el pan tradicional que elaboran, conocido como mestiza, esto a fin de proponer estrategias para prolongar las propiedades del producto.

La investigación sobre los atributos de deterioro del pan tradicional mestiza y su influencia en la vida útil es de gran importancia en el contexto de la inocuidad y seguridad alimentaria. Este estudio busca dar respuesta a la problemática del desperdicio de alimentos, un problema que requiere atención debid que provoca pérdidas económicas y un impacto ambiental considerable. Al analizar cómo

parámetros de almacenamiento como el tiempo y la temperatura de almacenamiento afectan los atributos fisicoquímicos del pan mestiza en el empaque destinado para su distribución, tales como el peso, el contenido de humedad y la actividad de agua, se pueden identificar las condiciones óptimas para su conservación. La implementación de pruebas de vida útil aceleradas y la monitorización precisa de estos parámetros permiten desarrollar estrategias efectivas para extender la vida útil del producto. Esto asegura que el pan mantenga su calidad y seguridad durante más tiempo y contribuye a la reducción de pérdidas económicas asociadas con el deterioro prematuro. Además, al optimizar las condiciones de almacenamiento, se minimiza el desperdicio alimentario, lo que tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria.

La investigación contribuye al campo de la ciencia y tecnología de alimentos, con un enfoque en la inocuidad y la seguridad alimentaria. Su relevancia radica en que aborda problemas críticos como el desperdicio de alimentos y las pérdidas económicas. Al analizar cómo el tiempo y la temperatura de almacenamiento afectan los atributos fisicoquímicos del pan mestiza en su empaque de distribución, como el peso, el contenido de humedad y la actividad de agua, es posible identificar las condiciones óptimas para su conservación. Esto permite desarrollar estrategias efectivas para extender su vida útil, asegurando que mantenga su calidad y seguridad durante más tiempo. Optimizar las condiciones de almacenamiento también contribuye a reducir el desperdicio alimentario, beneficiando tanto a consumidores como a la industria, y promoviendo la sostenibilidad ambiental. Además, esta investigación se deriva de una colaboración con un productor de alimentos local y resulta de interés para estudiantes, tecnólogos de alimentos, fabricantes, distribuidores y otras personas involucradas en el área.

El objetivo del presente trabajo fue comprender cómo el tiempo y la temperatura de almacenamiento afectan la calidad y la vida útil del pan tradicional conocido como mestiza, a través del análisis de la variación en sus atributos fisicoquímicos como el peso, contenido de humedad y actividad de agua, a temperaturas de 20, 30 y 40 °C, con el fin de generar información útil para optimizar sus condiciones de conservación.

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Antecedentes generales

### Resumen

ESTE CAPÍTULO se enfocó a cubrir las generalidades del pan como producto alimenticio, presentando antecedentes que facilitaran la comprensión del objeto de estudio, el pan tradicional mestiza, el cual fue descrito de igual manera. Se abarcaron aspectos como los ingredientes y su funcionalidad en la matriz alimentaria, así como conceptos sobre la vida útil del pan, aspectos que la afectan, diversos tipos de estudios de vida útil y los métodos de conservación que han sido empleados de diversas maneras para contrarrestar el deterioro del pan. Por último se presentó una revisión de estudios de vida útil que se han realizado en diversas variedades de pan. La comprensión de los antecedentes permitió conocer mejor el alimento, pan mestiza, que se utilizó en capítulos posteriores para la determinación de vida útil por medio del estudio de atributos fisicoquímicos de calidad.

---

### Lista de acrónimos

CANAINPA	Cámara Nacional de la industria Panificadora . . . . .	4
VU	Vida útil . . . . .	4

---

### 1.1. Introducción

El pan es uno de los alimentos procesados más antiguos y ampliamente consumidos en el mundo. Su origen se remonta a milenios atrás, con evidencia de su elaboración desde las primeras civilizaciones. Las paredes de la tumba de Ramsés III muestran representaciones del proceso panadero, y se atribuye

a Egipto la aparición del primer pan fermentado, producto de la observación de masas fermentadas naturalmente que mejoraban la textura y el sabor del producto final ([Mesas & Alegre, 2002; Stevens, 2018](#)).

La historia de la panadería en México se consolidó con la llegada de los colonizadores españoles. Aunque existían alimentos hechos de masa, como tortillas o tamales, las técnicas y los ingredientes del pan europeo eran distintos. El mestizaje culinario se desarrolló en las cocinas conventuales, donde mujeres indígenas aprendieron y adaptaron recetas, fusionando saberes y prácticas alimentarias ([Barros & Buenrostro, 2007](#)).

Desde el punto de vista técnico, el pan es un producto obtenido por horneado de masas fermentadas, elaboradas a partir de harina de trigo, agua potable, sal yodada, levadura, y aditivos o ingredientes opcionales permitidos para su uso alimentario ([Molini & Molini, 2018](#)). La NOM-247-SSA1-2008 lo define como el resultado de hornear una masa compuesta por harina fermentada, agua y sal, con posibilidad de incorporar grasas, leche y otros aditivos. Para el pan dulce, la normativa admite la inclusión de huevo, azúcares, frutas u otros ingredientes, y contempla tanto el horneado como la fritura como métodos válidos de cocción ([Diario Oficial de la Federación, 2008](#)).

Los ingredientes básicos del pan: harina, agua, sal y levadura, atraviesan un proceso de fermentación seguido de una cocción a temperaturas superiores a 200 °C. Este tratamiento térmico inactiva microorganismos como hongos y levaduras. Dado que es un alimento de consumo diario, suele encontrarse en venta en estado fresco, y cualquier alteración es detectable visualmente, lo que contribuye a evitar su ingesta en condiciones inadecuadas ([Fierro & Jara, 2010](#)).

### 1.1.1. Ingredientes y proceso de elaboración

Los ingredientes comúnmente usados en la elaboración de pan son la harina blanca de trigo, agua, sal y levadura. A continuación se describe la funcionalidad de estos en la matriz alimentaria del pan ([Amaral et al., 2016](#)):

#### **Harina**

Se define a la harina como el producto obtenido de la molienda del endospermo del grano de trigo limpio. Si se trata de otros granos de cereales o de leguminosas hay que indicarlo, por ejemplo: harina de maíz, harina de cebada, etc. Si en la harina aparece no sólo el endospermo, sino todos los componentes del grano se llama harina integral ([Miralbés, 2000](#)). La harina tiene una funcionalidad estructural y participa en la formación de la migra y la corteza. Esto es posible por procesos como la gelatinización de los almidones en la harina, lo cual consiste en que las moléculas de almidón absorben el agua presente durante la cocción y se hinchan, formando parte de la estructura base del pan. Mientras que las proteínas presentes como el gluten, participan en la estructura al formar redes que permiten retener el gas incorporado ([Godswill et al., 2019](#)).

#### **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. La presencia de agua en la masa también es necesaria para el desarrollo de las levaduras que han de llevar a cabo la fermentación del pan ([Calvel, 1983](#)).

## Sal

La sal en los alimentos sirve para potenciar sabores, además que puede servir como agente conservador al inhibir el crecimiento microbiano mediante la reducción de la actividad de agua. Específicamente para el pan se caracteriza por aportar sabor, controlar el rango de crecimiento de las levaduras y la tasa de fermentación, el mejoramiento de la textura y la reducción del deterioro microbiológico, en especial previniendo la formación de mohos ([Belz et al., 2012](#)).

## Levadura

Las levaduras son microorganismos que tan pronto son incorporados a la masa o mezcla del pan, empiezan a alimentarse de los almidones o azúcares presentes, formando compuestos como CO<sub>2</sub> y etanol, las burbujas formadas por el CO<sub>2</sub> causarán que la masa se expanda. La levadura más común para la elaboración de pan es *Saccharomyces cerevisiae*, esta no solo va a aportar como leudante, sino que puede influir en la producción de aromas y sabores agradables ([Ali et al., 2012](#)).

Además otros ingredientes como el azúcar y las grasas puede ayudar a el ablandamiento de la masa, lo que aporta una textura suave al producto final. Los huevos sirven como agentes leudantes y emulsionantes al interaccionar con los otros ingredientes de la mezcla. El polvo para hornear permite agrandar las burbujas de aire durante la cocción, lo que aumenta la esponjosidad del pan ([Al-Dmoor, 2013](#)).

## Procesos de fermentación

Usualmente se consideran tres métodos de fermentación para la elaboración del pan. Estos se explican a continuación ([Mesas & Alegre, 2002](#)):

- **Directo:** se utiliza levadura comercial, la cual requiere que la masa tenga un reposo de aproximadamente 45 minutos.
- **Mixto:** la utilización de este método es más frecuente, se usa una mezcla de masa madre y levadura comercial. De esta manera la masa requiere un reposo de tan solo 10 a 20 minutos.
- **Esponja:** este método es común en la elaboración de pan blanco o similares. Se elabora una masa líquida que servirá como la esponja, esta tendrá del 30 al 40 % de la harina total de la formulación. Se deja reposar por unas hora y luego se incorpora el resto de la harina y el agua, para después proceder como si se empleara el método directo.

### 1.1.2. Composición nutricional

El pan que es elaborado a base de trigo, es uno de los productos de mayor consumo en la dieta de la población mexicana siendo un alimento importante para el aporte de energía y otros nutrientes. En la tabla se muestra la composición nutricional del pan blanco como estándar.

**Tabla 1.1:** Composición química de pan tradicional blanco (g/100g).

Nutrientes	Bolillo
Energía (kCal)	283±10.2
Humedad	30.8±2.8
Proteína	11.54±1.3
Grasas	1.41±0.6

Nutrientes	Bolillo
Carbohidratos	56.0±3.8

Tabla recuperada de: ([López Mazón et al., 1999](#))

En general, el pan es una buena fuente de vitaminas del grupo B (tiamina o B1, riboflavina o B2, piridoxina o B6 y niacina, necesarias para el aprovechamiento de los hidratos de carbono, proteínas y grasas, entre otras funciones) y de elementos minerales tales como el fósforo, el magnesio y el potasio ([Upasen & Wattanachai, 2018](#)).

### 1.1.3. Producción y consumo nacional

Datos del 2023 según la Cámara Nacional de la industria Panificadora ([CANAINPA](#)), se registró un consumo per cápita anual de 33.5 kg de pan, del cual el 75 % fue blanco y el resto se atribuyó a pan dulce y otros producto de panadería ([Bahena, 2023](#)).

En 2023 el intercambio comercial total de los productos pertenecientes al sector panadero fue de 1, 596 millones de dólares (USD), reportando un mayor consumo en la entidades de Estado de México, Ciudad de México, Baja California, Nuevo León y Puebla ([Gobierno de México, 2023](#)).

## 1.2. Pan mestiza

Este tipo de pan es típico regional del estado de Sinaloa. El pan mestiza se prepara con harina de trigo blanca y de trigo molido, azúcar o piloncillo, manteca de puerco, levadura en barra, huevos, agua, bicarbonato y sal ([Valencia de la Mora, 2004](#)). Su elaboración tradicional incluye pasos como el lavado del trigo para molienda, la fermentación de la masa y posterior amasado a mano de quien la produce. Posteriormente con esta masa se hace un tipo tortilla ([Flores, 2014](#)).

## 1.3. Vida útil

La Vida útil ([VU](#)) se considera como el periodo de tiempo en el que un alimento conserva sus propiedades organolépticas, además de su calidad, seguridad e inocuidad, se considera que la VU de un producto se limita cuando se presentan los fenómenos de degradación, que pueden ser fisicoquímicos y microbiológicos, o bien una combinación de ambos. Cuando se conoce la VU de un producto es posible determinar fechas de caducidad o fechas para preferencia de consumo ([Steele, 2004](#)).

Se suelen considerar tres metodologías para la determinación de la VU (a) Determinación directa (condiciones normales), (b) Pruebas aceleradas de VU y (c) Aplicación de principios de cinética de reacciones con respecto a una dependencia de temperatura. Aunque hay una serie de consideraciones que deben tomarse en cuenta en el diseño y desarrollo de una prueba para determinar la VU de un producto alimenticio, se pueden mencionar las tres siguientes como las consideraciones básicas e importantes: identificar o conocer las formas de deterioro que afectan la calidad del producto, establecer las formas de medición de los cambios del deterioro y definir los niveles de calidad que se consideran mínimos de aceptación ([Bustamante, 2022](#)).



**Figura 1.1:** Pan tradicional “Mestiza”

### 1.3.1. Factores que conducen al deterioro del pan

Los cambios físicos y químicos que ocurren en el pan una vez que este es horneado, determinan la pérdida de frescura, lo que impacta en su textura y sabor deseable, existen diversos tipos de fenómenos de deterioro como los fisicoquímicos o microbiológicos, los cuales se explican a continuación (Steele, 2004).

#### Microbiológicos

El deterioro microbiológico por bacterias, levaduras y mohos consiste en el crecimiento visible de mohos, la producción invisible de micotoxinas y la formación de sabores desagradables, que pueden producirse incluso antes de que sea visible el crecimiento de hongos. Por lo tanto, el pan estropeado representa un motivo de preocupación, ya que provoca un enorme desperdicio de alimentos. Al respecto, se han estimado pérdidas en la producción mundial de pan entre un 5-10 % y pérdidas económicas tanto para la industria panadera como para el consumidor (Melini & Melini, 2018).

Los mohos son la principal causa del deterioro del pan, dicha contaminación ocurre durante el corte, en el proceso de horneado si la temperatura no es la adecuada, así como en el envasado. Los hongos comunes que causan el deterioro de los productos de panadería, se considera que el 60 % del deterioro de los productos de panadería es causado por *Penicillium spp* y *Aspergillus niger* (Gutiérrez et al., 2011).

Las bacterias, especialmente del género *Bacillus*, son el segundo factor que provocan el deterioro del pan. Esto se debe a que las bacterias tienen mayor necesidad de nutrientes que los mohos. La contaminación por levaduras es también probable en los productos de panadería, cuando la masa es fermentada durante un largo período de tiempo puede ocurrir este tipo de contaminación (Pateras, 2007).

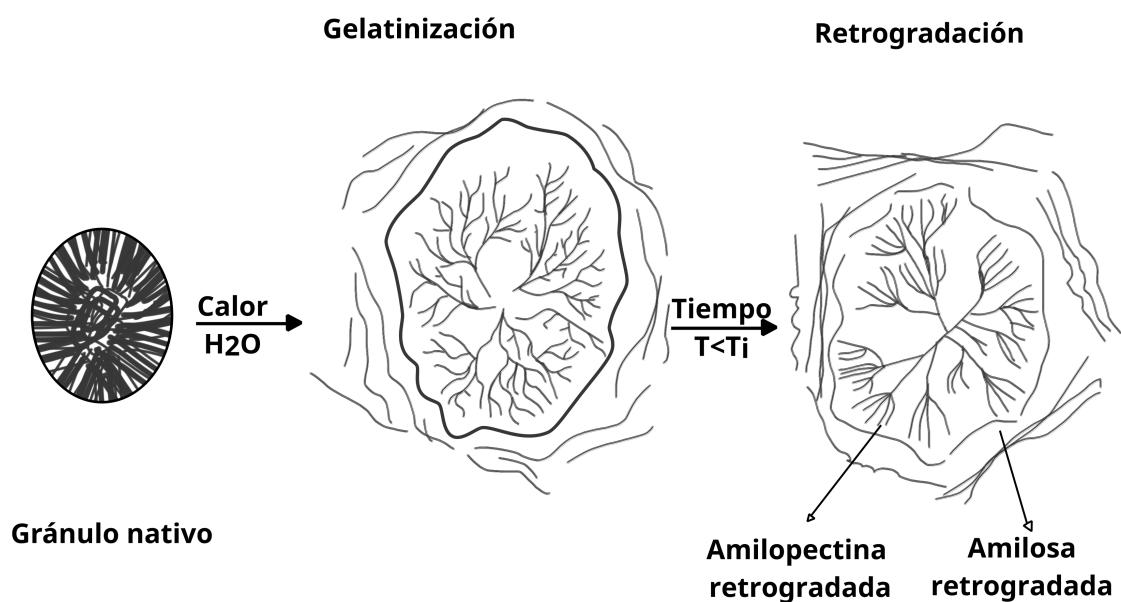
#### Fisicoquímicos

Los principales cambios que ocurren en el pan están relacionados a la redistribución de la humedad de la migra a la corteza, la retrogradación del almidón, aumento de la firmeza, además de pérdida de aroma y sabor; todos estos cambios en el pan durante su almacenamiento son atribuidos al envejecimiento del pan o bien *staling* por su término en inglés. En general, se entiende por envejecimiento del pan a la reducción de la aceptabilidad debido a los cambios físicos y químicos durante el almacenamiento (Pateras, 2007).

La retrogradación del almidón es un proceso que ocurre tras el enfriamiento del pan, las cadenas desagregadas de amilosa y amilopectina, componentes del almidón, se reorganizan en sus estructuras iniciales y se recristalizan para formar una estructura más ordenada en comparación al gel antes formado. La amilosa es la que se reorganiza primero, ocurriendo horas después del horneado, mientras que la amilopectina se reorganiza después de días o semanas, esto dependiendo de las condiciones que retrasen o favorezcan el deterioro. Este proceso es una de las causas del endurecimiento del pan (Wang et al., 2015). En la Figura 1.2 es posible observar una representación gráfica de este proceso.

## 1.4. Métodos de conservación

Diversos estudios tanto teóricos como prácticos han estimado que un pan almacenado a temperatura ambiente en su empaque original, puede durar de 2 a 3 días. Debido a que es un producto perecedero se han ideado diversos métodos para retrasar su deterioro, entre estos se han propuesto inhibidores de moho, empaves con atmósferas modificadas, pasteurización, radiación, congelamiento, entre otros. Además se ha destacado la composición y por lo tanto, la proporción de los ingredientes en función de su influencia en la matriz alimentaria, ya que algunos de estos pueden servir para retrasar



**Figura 1.2:** Retrogradación del almidón.

ciertos fenómenos de degradación o bien acelerarlos ([Lohano et al., 2010](#)).

Además, el control de factores ambientales como la temperatura y la humedad, también han probado ser efectivos para controlar el deterioro, ya que el nivel de temperatura y humedad durante el almacenamiento tiene un gran impacto en la calidad del producto final. Estos parámetros pueden ser medidos por un operador, o bien, en industrias más grandes y especializadas es posible implementar sensores en la línea de producción y en el lugar de almacenamiento ([Schirmer et al., 2011](#)).

#### 1.4.1. Estudios de vida útil en pan

Dependiendo del factor de deterioro que se desee atender, se pueden hacer diversos tipos de estudios de VU, controlando factores de almacenamiento o formulación que sirvan para la extensión de VU. Se han utilizado agentes acidulantes como conservadores (ácido acético y ácido láctico con propionato de calcio), esto con el objetivo de controlar el deterioro microbiológico en pan. En el estudio se consideró de igual manera la aceptabilidad sensorial tras 4 días de observación. De esta manera, fue posible determinar la combinación ideal de acidulantes para la extensión de la VU ante el deterioro microbiológico. Este tipo de resultados es uno de los alcances que tienen los estudios de VU, lo cual resulta ventajoso para la industria ([Tarar et al., 2010](#)).

Otro estudio en el que se estudiaron los efectos individuales y sinérgicos de enzimas de entrecruzamiento de gluten (transglutaminasa, glucosa oxidasa y lacasa), junto con enzimas degradadoras de polisacáridos y gluten, el interés del estudio se enfocó en como se afectaban las propiedades viscoelásticas de la masa en un principio. Posteriormente se analizó el efecto de estas adiciones sobre la VU, de esta manera se determinó que la adición de ciertas enzimas como la transglutaminasa incrementaba el envejecimiento del pan, esto debido a que en un principio modificaba las propiedades de la migra y la corteza, este tipo de investigaciones muestran la importancia de conocer los efectos de la formulación sobre la VU ([Caballero et al., 2007](#)).

Los estudios de VU también sirven para probar un nuevo producto, por ejemplo, en un trabajo sobre un pan tipo *bagel* se pretendió evaluar la VU y las propiedades sensoriales al este ser enriquecido con puré de calabaza y harina integral de cebada endulzada, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas durante 4 días, el promedio de VU de un pan a condiciones normales (temperatura ambiente). Con base en los resultados obtenidos, se determinó cuál formulación tenía mayor aceptación sensorial a la vez que se determinó cuál de estas tenía un mejor rendimiento en su VU ([Sadeghi, 2017](#)).

De manera similar, se ha estudiado el efecto de la adición de microorganismos como *Bacillus subtilis* sobre la VU y calidad del pan, sobretodo como sustituto de sufractantes comunes como la lecitina de soya. Los resultados demostraron que hubo efecto significativo contra el envejecimiento del pan, además de que se redujo la susceptibilidad a la contaminación microbiana; no obstante, se observaron cambios que podrían no ser ideales sensorialmente. Este tipo de trabajos resaltan la importancia de explorar alternativas de conservación mientras se toman en cuenta aspectos sensoriales del producto ([Mnif et al., 2012](#)).

Por otra parte, el uso de las tecnologías y métodos innovadores ha llamado la atención por la eficiencia que supone, tal es el caso del estudio de VU en pan empaquetado en atmósfera modificada (10 % CO<sub>2</sub> y 90 % N<sub>2</sub>), que además fue monitorado para detectar niveles de O<sub>2</sub> dentro del empaque. La utilización de diversos mecanismos de conservación y monitoreo permiten tener mejor control de inventarios así como una mejora constante de los procesos al tener indicadores constantes de la eficiencia de los métodos de conservación utilizados, la posibilidad de implementar los datos a sistemas de aprendizaje de máquinas representa una oportunidad de innovación a la industria

(Hempel et al., 2013).

## 1.5. Conclusiones y perspectivas

El pan tradicional mestiza es un producto con alto valor cultural, ya que debido a su elaboración tradicional y uso de ingredientes particulares, lo convierte en un elemento importante de la panadería tradicional mexicana. El estudio del pan permitirá a los productores del pan mestiza extender su VU y perpetuar la tradición del pan.

Los factores de deterioro microbiológicos y los fisicoquímicos como los cambios de humedad, envejecimiento y pérdidas de textura, son uno de los principales retos ante el mantenimiento y extensión de la VU del pan. Se han empleado técnicas como el uso de atmósferas modificadas, uso de conservadores o el control de las condiciones de almacenamiento, las cuales bajo el control adecuado tras el estudio del comportamiento de la matriz alimentaria, han dado buenos resultados. Usualmente ese tipo de estudios se refieren como estudios de VU, los cuales pueden hacerse mediante métodos directos o acelerados, estos últimos resultan de gran utilidad para crear modelos de predicción respaldados por métodos estadísticos y cinéticos.

La posibilidad de mejorar los métodos de estudio del pan mestiza así como implementar resultados cinéticos, ofrece una manera eficiente de mejorar las expectativas de VU de productos poco investigados como lo es el pan mestiza, además, la perspectiva multidisciplinaria implica la mejora constante del proceso.

## 1.6. Referencias

- Al-Dmoor, H. M. (2013). *Cake flour: Functionality and quality (Review)*.
- Ali, A., Shehzad, A., Khan, M. R., Shabbir, M. A., & Amjid, M. (2012). *Yeast, its types and role in fermentation during bread making process- A review*. 22, 170–178.
- Amaral, O., Guerreiro, C. S., Gomes, A., & Cravo, M. (2016). Resistant starch production in wheat bread: Effect of ingredients, baking conditions and storage. *European Food Research and Technology*, 242(10), 1747–1753. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2674-4>
- Bahena, L. (2023). Panorama de la panificación saludable en México. In *The food tech*. <https://thefoodtech.com/ingredientes-y-aditivos-alimentarios/panorama-de-la-panificacion-saludable-en-mexico/>.
- Barros, C., & Buenrostro, M. (2007). Panadería mexicana: Formas con sabor. *Ciencia*, 58(2), 39–48.
- Belz, M. C. E., Ryan, L. A. M., & Arendt, E. K. (2012). The Impact of Salt Reduction in Bread: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(6), 514–524. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.502265>
- Bustamante, B. (2022). Aplicación de dos metodologías (de punto de corte y de riesgos acumulados de Weibull) para la determinación de la vida útil del pan de molde blanco. *Revista de Investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, 2(2), 25–38. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20222.826>
- Caballero, P. A., Gómez, M., & Rosell, C. M. (2007). Improvement of dough rheology, bread quality and bread shelf-life by enzymes combination. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.007>
- Calvel, R. (1983). *La panadería moderna*. Editorial Américalee.
- Diario Oficial de la Federación. (2008). *NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos*

- a base de: Cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinias o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.* [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0).
- Fierro, H., & Jara, J. (2010). *Estudio de vida Útil del pan de molde blanco* [Tesis de {{Licenciatura}}]. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Flores, J. (2014). Las Mestizas fuente de sabor y riqueza de Pericos. In *La Voz del Norte*.
- Gobierno de México. (2023). Productos de Panadería, Pastelería o Galletería: Intercambio comercial, compras y ventas internacionales, mercado y especialización. In *Data México*. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/baked-goods-wares-not-containing-cocoa>.
- Godswill, A. C., Somtochukwu, I. V., & Kate, E. C. (2019). *The Functional Properties of Foods and Flours*. 5(11).
- Gutiérrez, L., Batlle, R., Andújar, S., Sánchez, C., & Nerín, C. (2011). Evaluation of Antimicrobial Active Packaging to Increase Shelf Life of Gluten-Free Sliced Bread. *Packaging Technology and Science*, 24(8), 485–494. <https://doi.org/10.1002/pts.956>
- Hempel, A. W., O'Sullivan, M. G., Papkovsky, D. B., & Kerry, J. P. (2013). Use of smart packaging technologies for monitoring and extending the shelf-life quality of modified atmosphere packaged (MAP) bread: Application of intelligent oxygen sensors and active ethanol emitters. *European Food Research and Technology*, 237(2), 117–124. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-1968-z>
- Lohano, D., Sheikh, S., & Muhammad, S. (2010). Effect of Chemical Preservatives on the Shelf Life of Bread at Various Temperatures. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3923/pjn.2010.279.283>
- López Mazón, L., Esparza Lozano, M., Grijalva Haro, M. I., & Sandoval, S. (1999). Composición química del pan tradicional e industrial y su aporte de energía y proteína en la población del Noroeste de México. *Arch. latinoam. nutr.*, 186–192.
- Melini, V., & Melini, F. (2018). Strategies to extend bread and GF bread shelf-life: From sourdough to antimicrobial active packaging and nanotechnology. *Fermentation*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fermentation4010009>
- Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3(5), 307–313.
- Miralbés, C. (2000). *Enzimas en panadería*. Montagud Editores.
- Mnif, I., Besbes, S., Ellouze, R., Ellouze-Chaabouni, S., & Ghribi, D. (2012). Improvement of bread quality and bread shelf-life by *Bacillus subtilis* biosurfactant addition. *Food Science and Biotechnology*, 21(4), 1105–1112. <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0144-8>
- Pateras, I. M. C. (2007). Bread Spoilage and Staling. In *Technology of Breadmaking* (pp. 275–298). Springer US. [https://doi.org/10.1007/0-387-38565-7\\_10](https://doi.org/10.1007/0-387-38565-7_10)
- Sadeghi, A. (2017). Estimation of shelf-life and sensory properties of baguette enriched in breadcrumbs with whole-wheat flour and pumpkin puree. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 9(1), 81–91. <https://doi.org/10.5555/20183069087>
- Schirmer, M., Hussein, W. B., Jekle, M., Hussein, M. A., & Becker, T. (2011). Impact of air humidity in industrial heating processes on selected quality attributes of bread rolls. *Journal of Food Engineering*, 105(4), 647–655. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.020>
- Steele, R. (2004). *Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food*. Woodhead Publishing.
- Stevens, D. (2018). *Bread: River Cottage Handbook No.3*. Bloomsbury Publishing.
- Tarar, O. M., Ur-Rahman, S., Din, G. M. U., & Murtaza, M. A. (2010). Studies on the shelf life of bread using acidulants and their salts. *Turkish Journal of Biology*. <https://doi.org/10.3906/biy->

0803-20

- Upasen, S., & Wattanachai, P. (2018). Packaging to prolong shelf life of preservative-free white bread. *Heliyon*, 4(9), e00802. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00802>
- Valencia de la Mora, L. (2004). Pan mestizo. In *Colección... Saber más sobre... Panadería económica*. Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo.
- Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 568–585. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143>



---

---

## CAPÍTULO 2

---

### Estudio de vida útil de pan mestiza

#### Resumen

ESTE CAPÍTULO se enfocó en la determinación de la vida útil del pan tradicional mestiza, mediante el monitoreo y control de los cambios en sus atributos fisicoquímicos de calidad (contenido de humedad, variación de peso y actividad de agua), utilizando el método de pruebas aceleradas para lograr identificar el atributo con mayor impacto en su vida útil. La metodología empleada incluyó la implementación de modelos cinéticos. Para el análisis estadístico se utilizó el ANOVA de dos vías y pruebas *post-hoc* de Tukey, para evaluar el efecto del tiempo y la temperatura de almacenamiento sobre los cambios en los atributos de calidad, utilizando el lenguaje de programación R. Los resultados mostraron diferencias significativas en los atributos fisicoquímicos de calidad del pan mestiza en función del tiempo y de la temperatura de almacenamiento, lo que sugiere que estos factores tienen un impacto crítico en la vida útil de los productos. Se determinó que en un modelo de orden 0 los datos tenían mejor ajuste, además a la temperatura de 40°C se destacó la pérdida de peso como el atributo de calidad con mayor influencia teniendo un valor de  $R^2 = 0.9936 \pm 0.0016$  y una constante  $k$  de  $-0.2829 \pm 1.42 \times 10^{-2}$ .

---

#### Lista de acrónimos

<b>ANOVA</b>	análisis de la varianza . . . . .	16
<b>AFC</b>	atributos fisicoquímicos de calidad . . . . .	14
<b>AOAC</b>	Asociación Científica Dedicada a la Excelencia Analítica . . . . .	14
<b>AW</b>	Actividad de agua . . . . .	14
<b>Ea</b>	energía de activación . . . . .	26
<b>PAVU</b>	pruebas aceleradas de vida útil . . . . .	14
<b><math>R^2</math></b>	Coeficiente de determinación . . . . .	22
<b>VU</b>	Vida útil . . . . .	4

---

## 2.1. Introducción

El pan es un alimento elaborado principalmente con harina de trigo, agua y levaduras, aunque en función del tipo puede contener huevo, azúcar, sal y otros aditivos. La diversidad en ingredientes y métodos de preparación genera múltiples variedades que difieren no solo en apariencia y sabor, sino también en sus propiedades fisicoquímicas, lo que influye en su deterioro y Vida útil ([VU](#))([Diario Oficial de la Federación, 2008](#)).

La VU de un alimento corresponde al periodo durante el cual mantiene sus características de calidad, propiedades sensoriales, seguridad e inocuidad. Para su extensión se aplican diversas técnicas, como el uso de conservadores, empaques con atmósferas modificadas y tratamientos térmicos, además del control de las condiciones de almacenamiento ([Steele, 2004](#)). La selección de estos métodos suele apoyarse en estudios de VU, que analizan la evolución del producto a lo largo del tiempo.

Entre estos estudios, las pruebas aceleradas de vida útil ([PAVU](#)) permiten acelerar la evaluación al someter al alimento a condiciones extremas de temperatura y humedad. Esto reduce tiempos y costos, y facilita la aplicación de modelos matemáticos para predecir la VU en función de variables de almacenamiento ([Bustamante, 2022; Calligaris et al., 2019](#)).

El pan tradicional mestiza, originario de Sinaloa, destaca por su elaboración con harina blanca y harina molida de trigo, característica que da nombre a este producto, cuya preparación se ha extendido a nivel nacional. En este estudio se evaluó el impacto de tres atributos fisicoquímicos de calidad ([AFC](#)), humedad, Actividad de agua ([AW](#)) y peso, sobre el deterioro y la VU del pan mestiza, mediante modelos cinéticos. El objetivo fue identificar el atributo crítico de calidad, es decir, aquel que se degrada con mayor rapidez durante el almacenamiento, a partir del monitoreo de cambios mediante PAVU.

## 2.2. Materiales y métodos

### 2.2.1. Muestras

La muestra de pan tradicional “mestiza” fue adquirida en una panadería del municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo. La cual fue colocada en una bolsa de papel proporcionada por el local. La muestra fue transportada a los laboratorios de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo para su análisis.

### 2.2.2. Composición proximal

Se realizó la determinación de diferentes parámetros a cada una de las muestras para conocer su composición, de esta manera se pudo conocer mejor la muestra y estimar que AFC afectarían más al pan, los métodos se basaron en procedimientos similares descritos en las publicaciones o literatura disponibles, los cuales siguen lo establecido por la Asociación Científica Dedicada a la Excelencia Analítica ([AOAC](#)) ([Mongi et al., 2011](#)). La metodología desarrollada se puede referir en la sección de anexos “[A.1: Material Suplementario](#)”, sección “Análisis proximal”.

### 2.2.3. Estudio de vida útil

Las muestras de pan tradicional tipo mestiza se almacenaron a tres temperaturas diferentes (20, 30 y 40°C), monitoreando el progreso de los atributos durante 22 días, cada segundo día. Se estudiaron

los atributos de humedad, actividad de agua y pérdida de peso las metodologías se describen a continuación.

#### 2.2.3.1. Determinación de humedad

Se mantuvieron a peso constante las charolas de aluminio (limpias y sin tocar), para lo cual se colocaron en la estufa de vacío a 65°C durante 4 horas. Una vez a peso constante se adicionó 5 g de muestra. Esta se distribuyó de manera uniforme de tal modo que la humedad pudiera evaporarse fácilmente. Las charolas se introdujeron en la estufa de vacío a 65°C y permanecieron ahí hasta que el peso final fuera constante ([Gálvez-Toledo et al., 2023](#)).

El porcentaje de humedad se calculó mediante la siguiente fórmula mostrada en la Ecuación A.1.

$$\%H = \frac{m_0 - m_f}{m} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

- $\%H$ : porcentaje de humedad.
- $m_0$ : Peso de la charola con muestra antes del secado de la muestra (g).
- $m_f$ : Peso de la charola con muestra después del secado de la muestra (g).
- $m$ : Peso de la muestra (g).

#### 2.2.4. Actividad de agua (AW)

Se determinó la AW de muestras de pan en bolsas de polietileno, de acuerdo a la metodología descrita en otros trabajos similares ([Altamirano-Fortoul & Rosell, 2011](#)). Se utilizó un determinador de AW AQUA LAB serie 3, a una temperatura de 22°C. La medición se llevó a cabo por triplicado. Las muestras previamente homogenizadas (molidas) se mantuvieron en frascos de vidrio para no perder AW, y se midieron utilizando un AQUA LAB de serie 3 a 22 °C

#### 2.2.5. Pérdida de peso

Se determinó la pérdida de peso de cada una de las muestras de mestiza con empaque de polietileno, las cuales se sometieron a diferentes temperaturas ambiente, 30°C y 40°C por triplicado cada una de las muestras ([Calderón et al., 1995](#)).

Se mantuvieron las muestras en las estufas de 30 y 40 °C, las cuales cada tercer día se medía la pérdida de peso utilizando una balanza analítica (SWISS MADE).

#### 2.2.6. Consideraciones cinéticas

Todos los atributos mencionados anteriormente se modelaron con las ecuaciones de orden 0 (Ecuación 2.2) , 1 (Ecuación 2.3) y 2 (Ecuación 2.4) ([Jaimez-Ordaz et al., 2019](#)). Utilizando estas, fue posible determinar el atributo crítico de calidad.

$$Q = Q_0 \pm kt \quad (2.2)$$

$$\ln Q = \ln Q_0 \pm kt \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} \pm kt \quad (2.4)$$

**Donde:**

$Q$  es el atributo de calidad fisicoquímico monitoreado

$k$  es la constante de velocidad de reacción ( $\text{días}^{-1}$ )

$t$  es el tiempo de almacenamiento (días).

### 2.2.7. Análisis termodinámico

Para la determinación de los parámetro termodinámicos se utilizó como base la Ecuación 2.5 que se describe a continuación (Tan et al., 2001). Este análisis se realizó tomando en cuenta el atributo crítico de calidad:

$$\ln(k/T) = \ln k_B/h + (S^\ddagger/R) - (\Delta H^\ddagger/R)(1/T) \quad (2.5)$$

En donde:  $k$  es la constante de velocidad de reacción.  $T$  es la temperatura bsoluta (K)  $k_B$  es la constante de Boltzmann ( $1.380358 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ ).  $h$  es la constante de Planck.  $\Delta H$  se refiere a la entalpía.  $\Delta S$  se refiere a la entropía.

Se determinó el factor  $Q_{10}$  que describe la energía de activación, en la Ecuación 2.6 se describe la metodología utilizada para la obtención del valor (Jaimez-Ordaz et al., 2019):

$$\ln Q_{10} = \frac{E_a}{R} \left[ \frac{10}{T(T+10)} \right] \quad (2.6)$$

En donde:

$Q_{10}$  es el coeficiente de temperatura.

$E_a$  es la energía de activación.

$R$  es la tasa de reacción de temperatura.

$T$  es la temperatura en la que se mide la reacción.

## 2.3. Resultados y discusión

El análisis de la influencia de los parámetros: Temperatura (A), el Tiempo (B) y la relación de estos dos (AB), se hizo con base en las tablas de análisis de la varianza (ANOVA) de los AFC las cuales pueden ser encontradas en la sección de anexos “A.2: Material Suplementario”, en la sección “Resultados del análisis de varianza”.

### 2.3.1. Actividad de agua

La Tabla A.1 de ANOVA presenta un análisis de los efectos de la temperatura (A), el tiempo (B) y su interacción (AB) sobre la AW.

Se determinó con base al valor de significancia  $p < 0.05$  que la interacción de la Temperatura (A) tiene un efecto significativo sobre la AW, debido a que su valor de  $p$  es  $p = < 2 \times 10^{-16}$ . Estas variaciones con respecto a la temperatura se observan gráficamente en la Figura 2.1, donde las cajas de bigotes muestran los diferentes rangos de valores que registra la AW según cambia la temperatura.

En el caso del Tiempo (B) se tiene un valor  $p = < 2 \times 10^{-16}$  lo que sugiere que las variaciones en el tiempo tienen un efecto significativo sobre los cambios de AW durante el almacenamiento del pan mestiza. Esta influencia se puede observar en las gráficas de la Figura 2.2, donde a diferentes temperaturas se muestra la evolución de atributo de AW a lo largo del tiempo, además que se muestra una tendencia a la disminución de los valores de este atributo. Por último la interacción Temperatura-Tiempo (AB) indica, según su valor  $p = < 2 \times 10^{-16}$ , un efecto significativo sobre los cambios de AW.

La alta significancia estadística de estos factores y su interacción nos indica que cualquier cambio en la temperatura o el tiempo afectará notablemente la AW.

En panes hechos mayormente con harina de centeno se ha registrado que a medida que la humedad disminuye durante el almacenamiento, también lo hace la AW que se registra en la migra, esto asociado potencialmente a la migración de agua y la perdida de humedad del pan, puesto que también se notó que la AW en la corteza aumentaba a lo largo del almacenamiento. Es relevante conocer este tipo de comportamiento de los AFC en el pan ya que se pueden propiciar otros fenómenos de degradación como los microbiológicos ([Vlášek et al., 2013](#)).

### 2.3.2. Humedad

Con respecto a la Tabla A.2 que presenta los resultados del ANOVA para humedad se discuten los valores  $p$  para conocer la significancia de los parámetros elegidos sobre este atributo.

Para la humedad, se presenta un valor  $p = 3.84 \times 10^{-8}$ , el cual es menor al valor  $p$  de significancia del modelo ( $p < 0.05$ ), esto quiere decir que la Temperatura (A) tiene un efecto significativo sobre las variaciones de humedad. En la Figura 2.3 se puede observar como a diferentes temperaturas las cajas de bigotes abarcas diferentes rangos de valores de humedad, rectificando gráficamente la interpretación del parámetro  $p$  del ANOVA, así mismo se observa una gran cantidad de valores dispersos, que se pueden atribuir a errores en las mediciones.

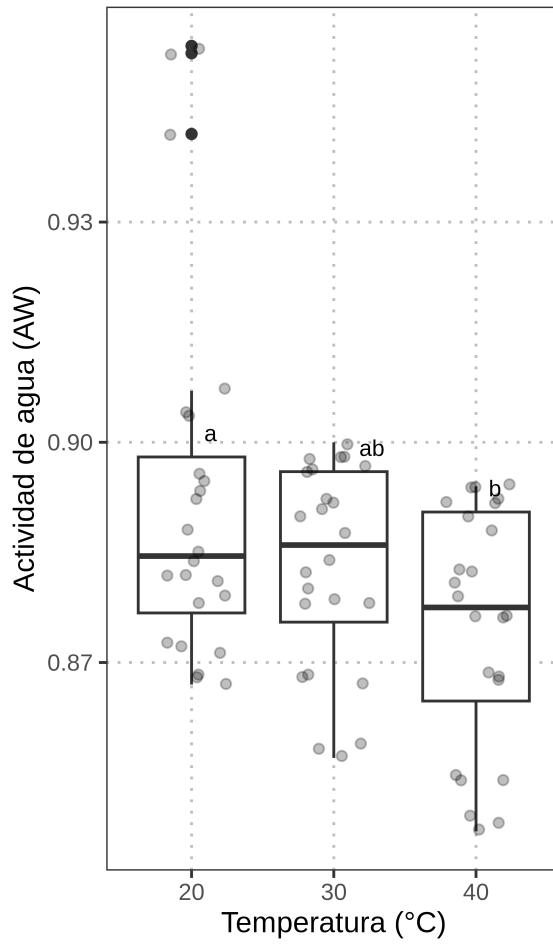
En cuanto el efecto del Tiempo (B) sobre la humedad , se considera una influencia significativa debido a su bajo valor en  $p$  siendo este  $< 2 \times 10^{-16}$ . En la Figura 2.4 es posible observar los cambios en los valores de humedad con respecto al tiempo transcurrido, además estos tienden a disminuir. Mientras que el efecto conjunto de Temperatura y Tiempo (AB) registran un valor  $p = 7.93 \times 10^{-11}$ , lo que indica un efecto significante de la interacción de estos dos factores sobre los cambios de humedad.

Durante el almacenamiento del pan existe la tendencia de migración de humedad de la migra a la corteza, lo que explica la disminución de los valores de este parámetro ([Aguirre et al., 2011](#)). Un estudio realizado sobre pan blanco registró disminución del contenido de humedad durante el almacenamiento a una temperatura de 25 °C en un periodo de 14 días, bajo estas condiciones el pan pasó de contener el 39 % de humedad inicial al 30 %, describiendo así un cambio significativo ([Baik & Chinachoti, 2000](#)).

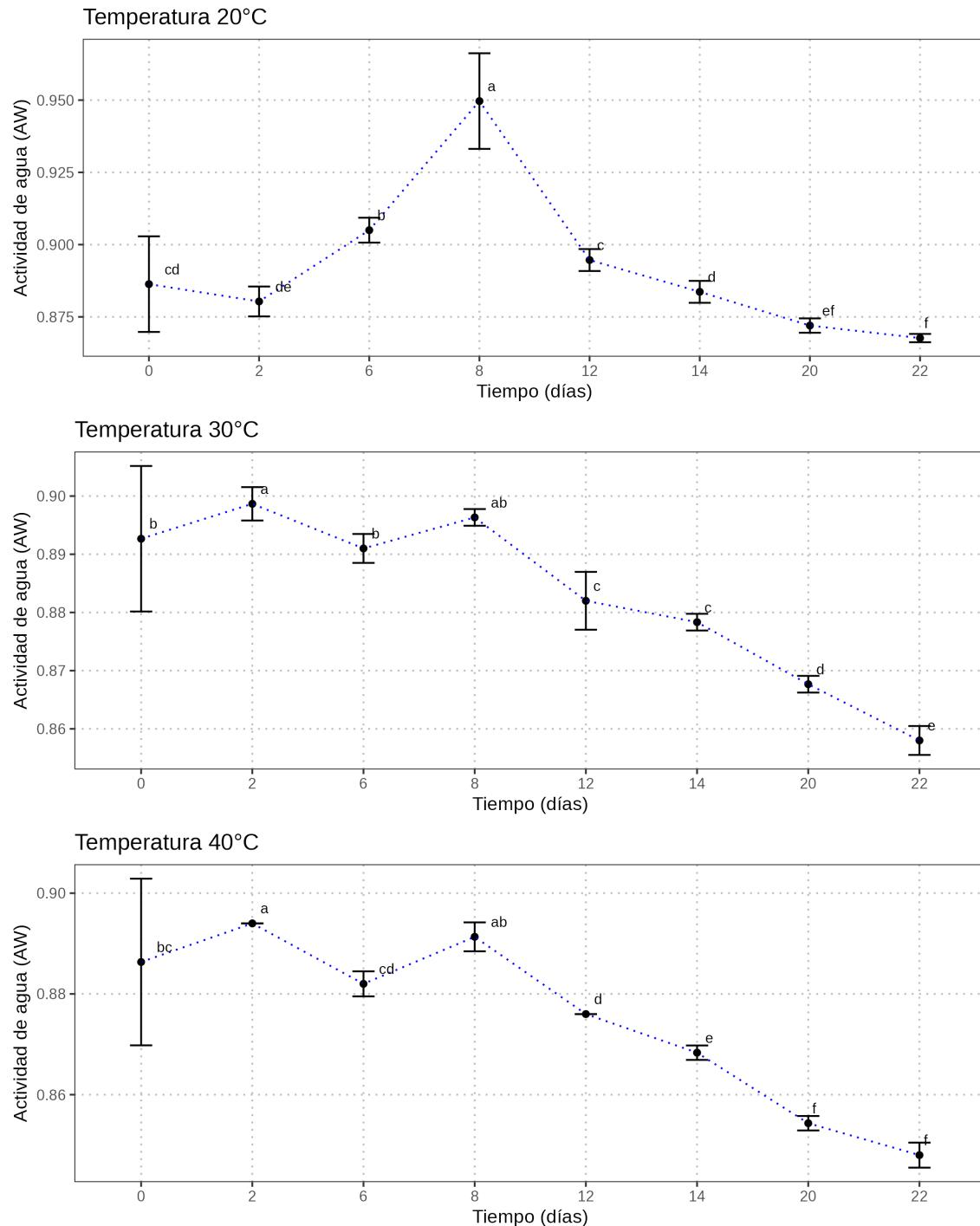
### 2.3.3. Pérdida de peso

Con respecto a los resultado de la Tabla A.3 del ANOVA del peso se discute lo siguiente.

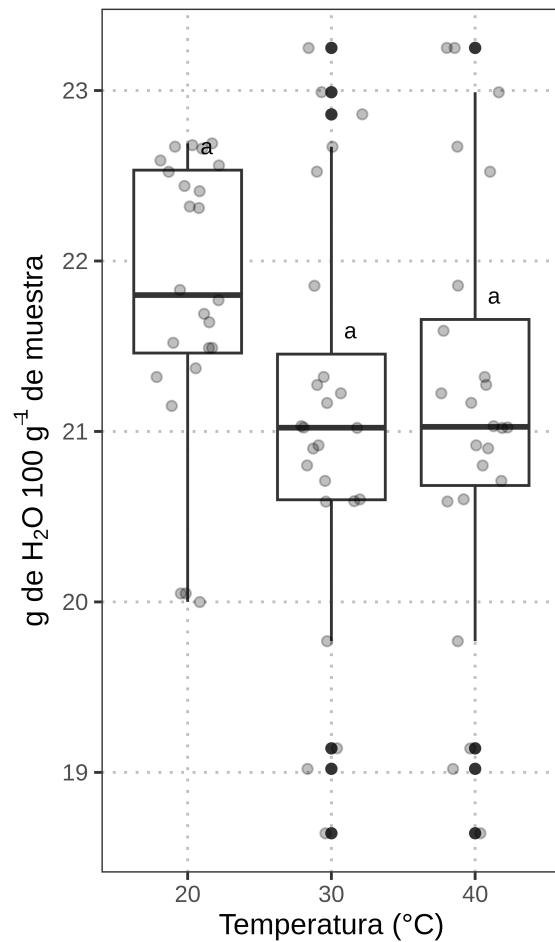
La Temperatura (A) no tiene un efecto significativo sobre las variaciones del peso, esto debido a que tiene un valor  $p = 0.096$  el cual es mayor que el valor de significancia del modelo  $p < 0.05$ , es decir no se puede concluir con base en los datos experimentales que el peso se vea afectado por los cambios de temperatura. Con respecto a la Figura 2.5 se puede observar una distribución similar en



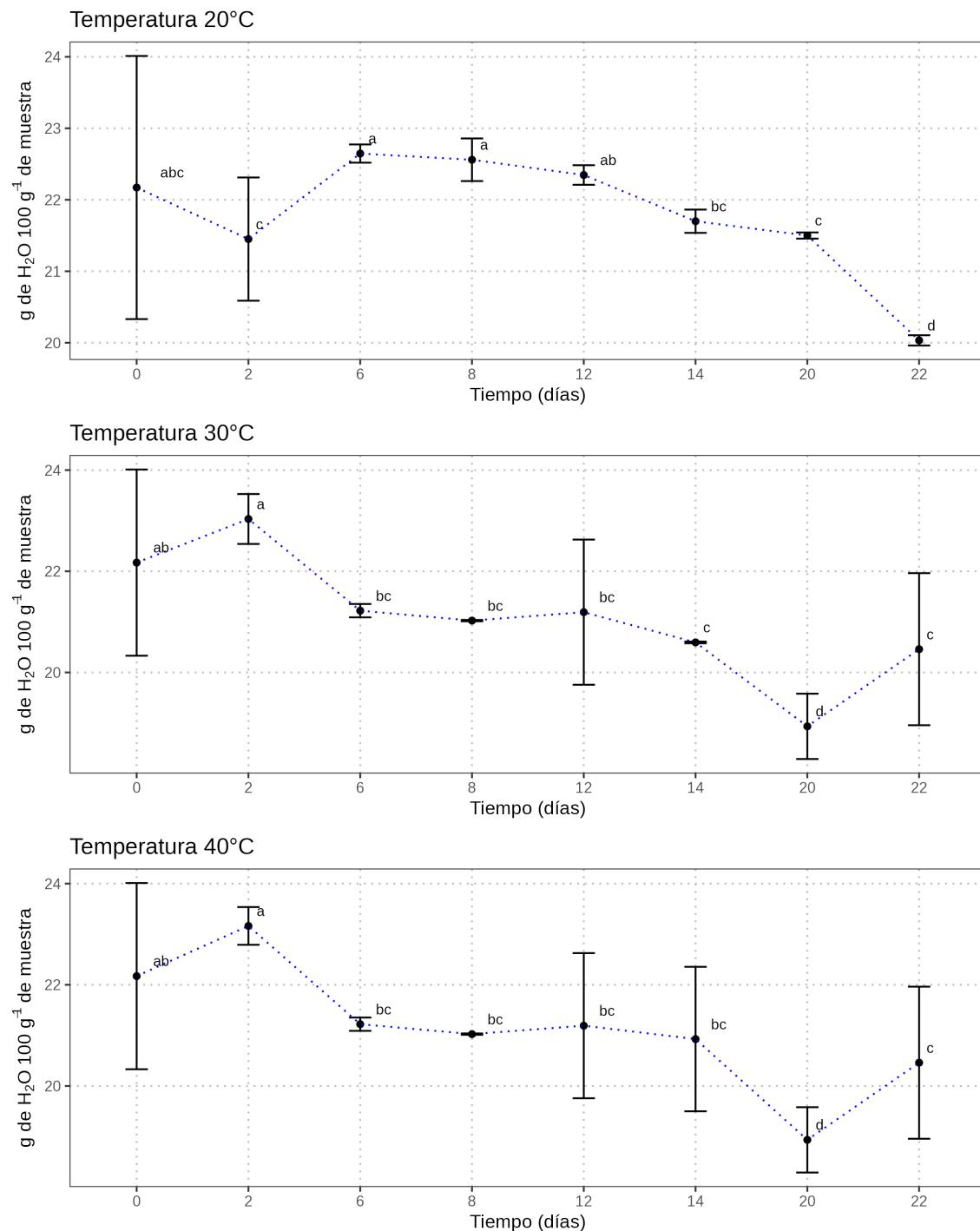
**Figura 2.1:** Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ).



**Figura 2.2:** Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW del pan tradicional mestiza en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.



**Figura 2.3:** Valores de cambio en el contenido de humedad ( $\text{g de H}_2\text{O } 100 \text{ g}^{-1}$  de muestra) de pan tradicional mestiza obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ).



**Figura 2.4:** Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad del pan tradicional mestizo en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

los datos al compararse las tres temperaturas, lo que se explica con el valor  $p$  antes mencionado. En cuanto el efecto del tiempo, este se considera no significativo debido a que tiene un valor  $p = 0.629$ . Al observar la Figura 2.6, las similitudes entre los gráficos a diferentes temperaturas y la evolución de las variaciones de peso con respecto al tiempo, sugiriendo que sigue comportamientos similares ante diferentes condiciones siendo estas poco relevantes para sus variaciones, además, aunque es posible intuir una tendencia a la disminución de los valores de este parámetro, gráficamente no se observa que sea significativa, esto respaldado por el valor  $p$ .

La interacción de Temperatura y Tiempo (AB) no demuestra un efecto significativo al registrar un valor  $p = 0.128$ , el cual indica que la interacción de estos factores no tiene influencia sobre la variación de peso según los datos experimentales.

Diversos estudios han asociado la retención de humedad con la pérdida de peso, de tal manera que a medida que hay una mejor retención, este parámetro es menos recurrente. Diversos estudios han demostrado que mediante tratamientos térmicos o sustituciones parciales de harina de trigo con otro tipo de harinas (avena o chía), es posible reducir la pérdida de peso durante el almacenamiento. De esta manera se puede explicar que los ingredientes usados en un determinado tipo de pan logren que este tenga menor pérdida de humedad que otras variedades ([Vásquez-Lara et al., 2021](#)).

En resumen, mientras que la temperatura y el tiempo, así como su interacción, son factores principales para la AW y la humedad, no lo son para el peso, lo cual sugiere que con respecto a los parámetros de estudio para los cambios en los AFC, es de gran importancia controlar la AW y humedad para extender la VU del pan mestiza.

## 2.4. Análisis cinético

Para el modelo 0, del cual los datos se muestran en la Tabla 2.1 a 20°C se considera que el atributo de peso tiene mejor ajuste, esto debido a que su valor Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ( $0.9485 \pm 0.0375$ ) es el más cercano a 1. A la temperatura de 30°C, el peso cuyo valor  $R^2 = 0.9962 \pm 0.0018$  presentó el mejor ajuste en comparación a la AW y a humedad. Por último, a 40°C con un valor  $R^2 = 0.9936 \pm 0.0016$  el peso, nuevamente, tuvo el mejor ajuste en el modelo de orden 0.

En cuanto a la constante de velocidad  $k$  para determinar la mayor tasa de cambio considerando valores absolutos, a 20°C la humedad representó mejor los resultados esperados al tener un valor  $k = -0.0658 \pm 0.0131$ , mientras que a 30°C y 40°C el peso presentó una mayor tasa de cambio con valores  $k = -0.1582 \pm 2.42 \times 10^{-2}$  y  $k = -0.2829 \pm 1.42 \times 10^{-2}$  respectivamente.

Considerando los resultados a 40°C, se puede concluir que para este estudio, el peso es el atributo que se ajusta mejor cuando se utiliza un modelo de orden 0.

**Tabla 2.1:** Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para pan mestiza

T (°C)	Atributo ( $Q$ )	$Q_0$	$k$	$R^2$
20	Humedad	$22.4915 \pm 0.2102$	$-0.0658 \pm 0.0131$	$0.3515 \pm 0.0940$
	AW	$0.9051 \pm 0.0027$	$-0.0012 \pm 1.36 \times 10^{-4}$	$0.1361 \pm 0.0145$
	Peso	$102.8875 \pm 3.8725$	$-0.0503 \pm 8.53 \times 10^{-3}$	$0.9485 \pm 0.0375$
30	Humedad	$22.4351 \pm 0.2339$	$-0.1292 \pm 0.0025$	$0.6882 \pm 0.0394$
	AW	$0.9009 \pm 0.0013$	$-0.0017 \pm 1.05 \times 10^{-4}$	$0.8611 \pm 0.0646$

T (°C)	Atributo ( $Q$ )	$Q_0$	$k$	$R^2$
40	Peso	$104.4490 \pm 3.4522$	$-0.1582 \pm 2.42 \times 10^{-2}$	$0.9962 \pm 0.0018$
	Humedad	$22.4915 \pm 0.2504$	$-0.1290 \pm 0.0087$	$0.6629 \pm 0.0594$
	AW	$0.8958 \pm 0.0027$	$-0.0020 \pm 1.76 \times 10^{-4}$	$0.8565 \pm 0.0713$
	Peso	$105.8721 \pm 5.7855$	$-0.2829 \pm 1.42 \times 10^{-2}$	$0.9936 \pm 0.0016$

Con respecto al valor de  $R^2$ , considerando un mejor ajuste a medida que el valor sea más cercano a 1 y estudiando los datos del modelo de primer orden de la Tabla 2.2, se determinó que a la temperatura de 20°C el peso que obtuvo un valor  $R^2 = 0.9483 \pm 0.0373$  tuvo mejor ajuste al modelo del primer orden. Asimismo a las temperaturas de 30 y 40°C los datos presentaron un mejor ajuste al modelo al registrar valores  $R^2 = 0.9964 \pm 0.0017$  a 30°C y  $R^2 = 0.9947 \pm 0.0012$  a 40°C. Mientras que en el análisis de la constante  $k$ , el atributo de calidad que presentó la mayor tasa de cambio tanto a 20°C como a 30°C fue la humedad, mientras que a 40°C fue el peso con un valor  $k = 0.0028 \pm 2.83 \times 10^{-4}$ .

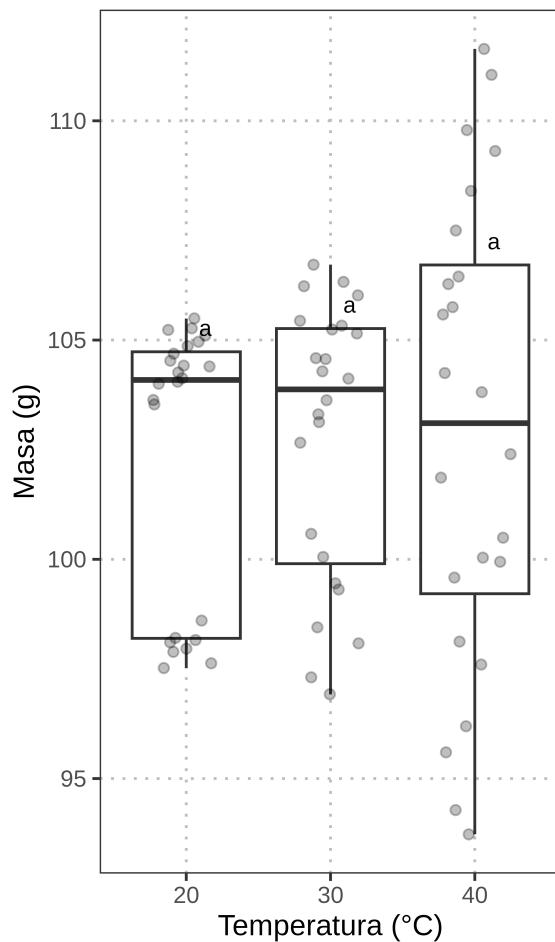
**Tabla 2.2:** Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para pan mestiza

T (°C)	Atributo ( $Q$ )	$\ln Q_0$	$k$	$R^2$
20	Humedad	$3.1136 \pm 0.0094$	$-0.0031 \pm 5.92 \times 10^{-4}$	$0.3534 \pm 0.0915$
	AW	$-0.1000 \pm 0.0030$	$-0.0014 \pm 1.51 \times 10^{-4}$	$0.1415 \pm 0.0158$
	Peso	$4.6332 \pm 0.0380$	$-0.0005 \pm 6.72 \times 10^{-5}$	$0.9483 \pm 0.0373$
30	Humedad	$2.4416 \pm 0.5837$	$-0.0062 \pm 2.18 \times 10^{-4}$	$0.6857 \pm 0.0428$
	AW	$-0.1042 \pm 0.0014$	$-0.0019 \pm 1.19 \times 10^{-4}$	$0.8608 \pm 0.0635$
	Peso	$4.6484 \pm 0.0334$	$-0.0015 \pm 2.45 \times 10^{-4}$	$0.9964 \pm 0.0017$
40	Humedad	$3.1138 \pm 0.0109$	$-0.0061 \pm 4.77 \times 10^{-4}$	$0.6608 \pm 0.0638$
	AW	$-0.1098 \pm 0.0031$	$-0.0023 \pm 1.99 \times 10^{-4}$	$0.8570 \pm 0.0703$
	Peso	$4.6615 \pm 0.0548$	$-0.0028 \pm 2.83 \times 10^{-4}$	$0.9947 \pm 0.0012$

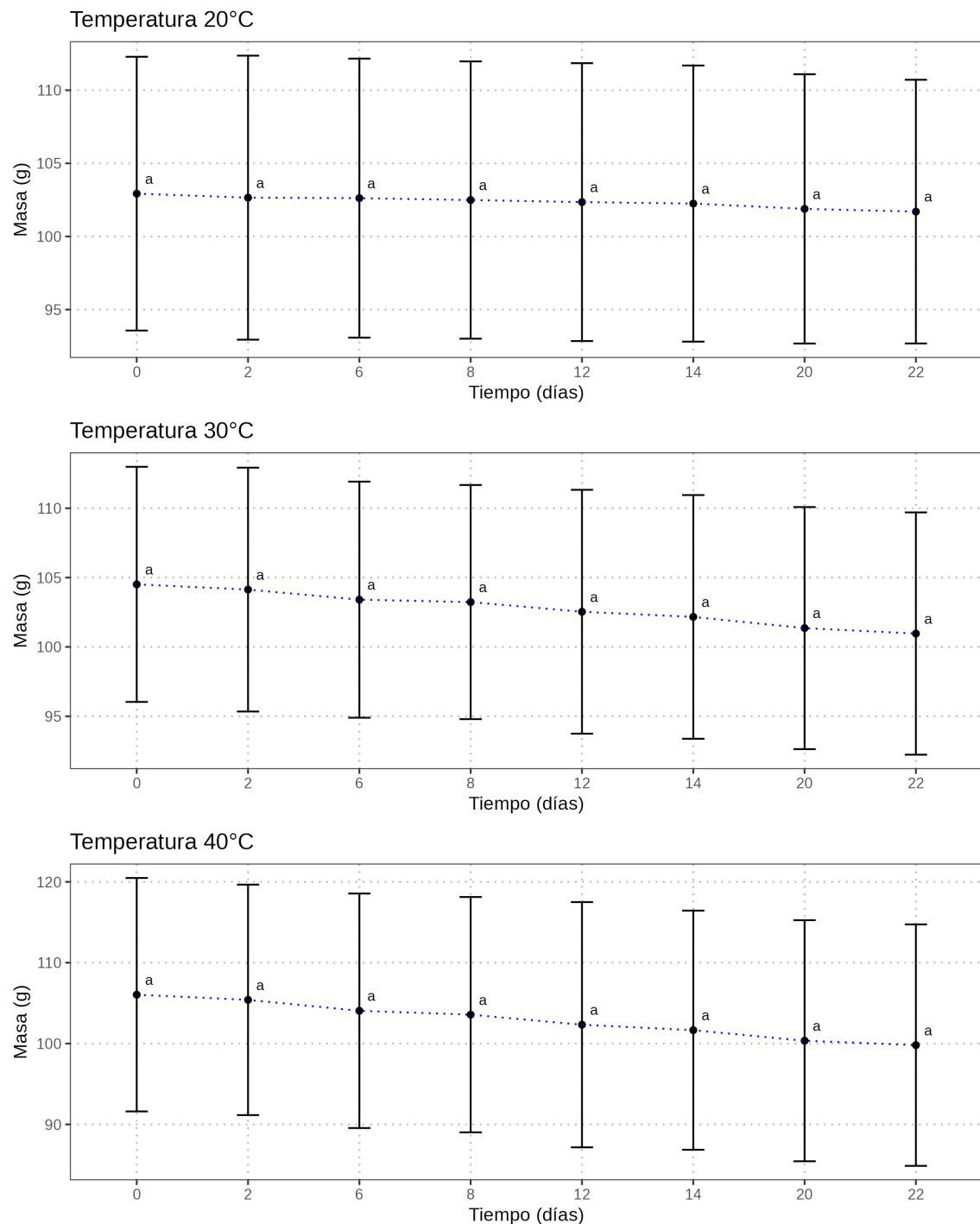
Para el modelo de orden 2 (Tabla 2.3) los resultados para  $R^2$  indicaron que a las 3 temperaturas estudiadas el peso fue el atributo que se ajustó mejor, presentando valores de  $R^2 = 0.9482 \pm 0.0372$  para 20°C,  $R^2 = 0.9966 \pm 0.0017$  para el estudio a 30°C y  $R^2 = 0.9956 \pm 0.0008$  para el estudio a 40°C.

Mientras que, considerando los valores absolutos de la constante  $k$  se pudo observar una mayor tasa de cambio para el atributo de AW en todas las temperaturas.

**Tabla 2.3:** Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para pan mestiza



**Figura 2.5:** Valores de cambio en el peso (g) de pan tradicional mestiza obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ( $p<0.05$ ).



**Figura 2.6:** Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo del peso del pan tradicional mestiza en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

T (°C)	Atributo (Q)	$\frac{1}{Q_0}$	k	$R^2$
20	Humedad	$0.0444 \pm 0.0004$	$1.45 \times 10^{-4} \pm 2.67 \times 10^{-5}$	$0.3550 \pm 0.0891$
	AW	$1.1054 \pm 0.0033$	$0.0015 \pm 0.6046$	$0.1470 \pm 0.0172$
	Peso	$0.0097 \pm 0.0004$	$4.78 \times 10^{-6} \pm 5.01 \times 10^{-7}$	$0.9482 \pm 0.0372$
30	Humedad	$0.0445 \pm 4.34 \times 10^{-4}$	$0.0003 \pm 1.53 \times 10^{-5}$	$0.6810 \pm 0.0457$
	AW	$1.1097 \pm 0.0016$	$0.0022 \pm 1.34 \times 10^{-4}$	$0.8603 \pm 0.0624$
	Peso	$0.0096 \pm 0.0003$	$1.51 \times 10^{-5} \pm 2.60 \times 10^{-6}$	$0.9966 \pm 0.0017$
40	Humedad	$0.0444 \pm 0.0005$	$0.0003 \pm 2.63 \times 10^{-5}$	$0.6564 \pm 0.0676$
	AW	$1.1158 \pm 0.0035$	$0.0026 \pm 2.25 \times 10^{-4}$	$0.8573 \pm 0.0694$
	Peso	$0.0095 \pm 0.0005$	$2.70 \times 10^{-5} \pm 4.26 \times 10^{-6}$	$0.9956 \pm 0.0008$

Con respecto a los resultados plasmados en las tablas anteriores y utilizando los valores de  $R^2$  de los tres atributos como criterio, se consideró que los datos se ajustaban mejor a un modelo de orden 0. Mientras que la determinación del atributo crítico de calidad se baso en los valores absolutos de la constante de velocidad  $k$ , siendo el peso el atributo que presentó una mayor tasa de cambio.

## 2.5. Análisis termodinámico

Los resultados del análisis termodinámico del modelo de orden cero que describen las variaciones del peso se resumieron en la Tabla 2.4. Para el valor energía de activación ( $E_a$ ) se obtuvo un valor de 66.125 kJ/mol, este parámetro termodinámico hace referencia a la energía mínima que se necesita para que una reacción en el proceso se lleve a cabo. El valor  $A$ , interpretado como la constante cinética, se estimó en  $3.31 \times 10^{10} \text{ día}^{-1}$ , usualmente hace referencia a la frecuencia de colisión, además de la orientación adecuada de las moléculas en una reacción.

La entalpía de activación ( $\Delta H^\ddagger$ ) presentó el valor 63.606 kJ/mol, utilizando este valor es posible conocer si una reacción es endotérmica o exotérmica. Debido a que el valor de ( $\Delta H^\ddagger$ ) es positivo para este trabajo, el cambio en el peso se considera, en relación a la entalpía, como un proceso endotérmico, por lo tanto, dicho proceso absorbe energía del entorno para llevarse a cabo. Además, se obtuvo el valor de entropía de activación ( $\Delta S^\ddagger = -51.985 J/Kmol$ ), este valor proporcionó información sobre el grado de desorden asociado con el proceso.

Para estimar la sensibilidad de la velocidad de la reacción ante los cambios de temperatura durante el almacenamiento, se determinó el valor  $Q_{10}$  el cual resultó en 2.318, lo cual indica, la interpretación de este valor puede ser útil para comprender como es que el peso varía bajo diferentes condiciones

térmicas. Este valor indicó que la constante  $k$  se incrementaría 2.318 veces por cada  $10^{\circ}\text{C}$  que se incrementa la temperatura.

Estudios similares sobre la VU del pan, facilitan la interpretación de resultados, por ejemplo, en un caso de estudio sobre pan sin gluten, se estimó un valor  $Q_{10}$  en 3 a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , indicando que el deterioro a partir de esa temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ) se triplica a medida que se aumentan  $10^{\circ}\text{C}$ .

Además se menciona que un valor  $Q_{10}$  es común en alimentos por lo tanto refiriendo a esto último como al resultado del estudio mencionado, se puede sugerir que el resultado del presente estudio sobre pan mestiza tuvo un valor estándar en este parámetro (Quina Suni & Pamo Cruz, 2023). El estudio de parámetros termodinámicos en el pan, nos ayuda principalmente a comprender como afectan las diferentes condiciones de temperatura a los AFC, logrando establecer valores numéricos que hacen medibles las condiciones (Ribotta & Le Bail, 2007).

**Tabla 2.4:** Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de orden cero que describe la variación del peso.

Ea/kJ mol <sup>-1</sup>	A día <sup>-1</sup>	ΔH <sup>‡</sup> /kJ mol <sup>-1</sup>	ΔS <sup>‡</sup> /J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	Q <sub>10</sub>
66.125	$3.31 \times 10^{10}$	63.606	-51.985	2.318

## 2.6. Análisis proximal

A continuación se desglosan resultados de productos similares a la muestra problema, mientras que los resultados del pan mestiza se muestran en la Tabla 2.5.

### Humedad

Para el pan blanco o de caja se han registrado niveles de humedad del 41 % en su miga, esto siendo aún un producto fresco, no obstante, estos valores han mostrado reducirse a medida que pasa el tiempo (He & Hoseney, 1990). Algo importante a considerar es el tipo de pan que se estudie, en caso del pan mestiza, suele ser más seco que el pan blanco, por lo que los valores de humedad serán menores, esto se puede ejemplificar con un tipo de pan como el *bagel*, que suele ser más seco, en este se han llegado a reportar valores de 36.4 % de humedad en la miga a temperatura ambiente.

### Ceniza

El contenido de cenizas suele depender de la calidad de la harina y demás ingredientes que se utilicen en la elaboración del pan, se han reportado valores de 0.89 de humedad en panes hechos de harina de trigo en un porcentaje total, no obstante, en el mismo estudio se muestra que la sustitución parcial de otras harinas puede aumentar el contenido de cenizas, demostrando el aporte de los ingredientes en el producto final (Ochelle et al., 2019).

### Grasa

En diferentes estudios sobre pan dulce se han llegado a reportar valores de 20.21 % de grasa total, los porcentajes suelen ser altos en comparación al pan de caja debido a que se suelen utilizar mayores cantidades de ingredientes como mantequilla, huevo o leche, dependiendo de la formulación, para agregar diferentes sabores y texturas (Sterkel Zibara, 2013).

### Proteínas

Como se ha observado en los demás parámetros, los ingredientes tienen gran influencia en la composición proximal del pan, para el caso de las proteínas es relevante mencionar que la harina en

un principio determinará en gran parte este parámetro, se ha registrado en pan hecho con harina de trigo, contenidos de proteína de  $6.9\% \pm 0.4$ , aunque en el mismo estudio se demuestra que la adición de otros ingredientes ricos en proteína puede cambiar drásticamente ese resultado, por lo que es relevante considerar los ingredientes utilizados para tener mejor entendimiento de los resultados de contenido de proteína ([Factos, 2014](#)).

### Fibra

El contenido de fibra en el pan suele variar dependiendo del tipo de harina que se utilice, por ejemplo, en pan blanco suele variar entre 4.6 y 7.2 %, en pan integral el contenido de fibra suele variar entre el 60 y 100 % y para otro tipo de harinas podría llegarse a reportar del 1 a 4 %. La combinación de estas harinas podría alterar los niveles de fibra, retomando el hecho de que el pan mestiza tiene dos tipos de harinas combinados, el porcentaje total corresponde la caracterización dada por ambos tipos ([Mongeau & Brassard, 1979](#)).

### Carbohidratos

La cantidad de carbohidratos de un alimento se determina por diferencia en relación a un 100 % y sus demás componentes, por lo que se ve influenciado en gran medida por la formulación, a pesar de esto, un revisión de la composición química de distintos tipos de pan en el norte de México reportó valores que se estimaban entre 45 % hasta 55 % en diversos tipos de pan dulce, mientras que para pan más sencillo como el bolillo o el pan de caja se estimaron contenidos de 56 % y 47 % respectivamente. Esta revisión nos permite estimar la cantidad de carbohidratos en el pan ([López Mazón et al., 1999](#)).

**Tabla 2.5:** Resultados del análisis proximal de galletas con chispas de chocolate.

Componente	Contenido (g/100g bs)
Humedad	$24.62 \pm 0.11$
Cenizas	$0.72 \pm 0.06$
Grasa	$14.67 \pm 0.13$
Proteínas	$7.14 \pm 0.02$
Fibra	$6.32 \pm 0.72$
Carbohidratos	46.53

## 2.7. Conclusiones y perspectivas

El estudio determinó que la VU del pan mestiza está significativamente influenciada por la temperatura y el tiempo de almacenamiento, afectando atributos como la humedad y la AW. Se identificó la pérdida de peso como el atributo crítico a las tres temperaturas estudiadas, considerando los parámetros cinéticos en las condiciones del estudio acelerado, a  $40^{\circ}\text{C}$  con un modelo de orden cero, se obtuvo mejor ajuste de los datos al modelo, es decir, los resultados explican con mayor precisión el comportamiento.

El conjunto de condiciones de almacenamiento pueden acelerar los factores de deterioro, en el caso del estudio, la AW y humedad mostraron cambios al ser afectados por las fuentes de deterioro consideradas (tiempo, temperatura y su interacción), no obstante, al realizar el análisis termodinámico se demostró que la mayor tasa de cambio y por lo tanto el atributo que presentaba variaciones primero, fue el peso.

El estudio multidisciplinario, incluyendo la cinética, termodinámica y análisis proximal, demostró gran eficiencia para la identificación de un parámetro crítico, el monitoreo de este parámetro puede ofrecer a los productores un marcador útil para estimar la calidad y VU de sus productos, ofreciendo una solución al manejo de inventarios y desperdicio de producto, derivados de la falta de conocimiento de la VU del pan mestiza.

## 2.8. Referencias

- Aguirre, J. F., Osella, C. A., Carrara, C. R., Sánchez, H. D., & Buera, M. D. P. (2011). Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch - Stärke*, 63(9), 587–593. <https://doi.org/10.1002/star.201100023>
- Altamirano-Fortoul, R., & Rosell, C. M. (2011). Physico-chemical changes in breads from bake off technologies during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 44(3), 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.04.018>
- Baik, M.-Y., & Chinachoti, P. (2000). Moisture Redistribution and Phase Transitions During Bread Staling. *Cereal Chemistry*, 77, 484–488. <https://doi.org/10.1094/CHEM.2000.77.4.484>
- Bustamante, B. (2022). Aplicación de dos metodologías (de punto de corte y de riesgos acumulados de Weibull) para la determinación de la vida útil del pan de molde blanco. *Revista de Investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, 2(2), 25–38. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20222.826>
- Calderón, G., Jiménez, E., Trejo, M., & Farrera, R. (1995). Efecto de la adición de diferentes niveles de Ingredientes sobre la calidad en pan dulce (bizcocho). *Informacion tecnologica*, 6(1), 57–63.
- Calligaris, S., Manzocco, L., Anese, M., & Nicoli, M. C. (2019). Accelerated shelf life testing. In *Food quality and shelf life* (pp. 359–392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00012-4>
- Diario Oficial de la Federación. (2008). *NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinás. Alimentos a base de: Cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinás o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0).
- Factos, A. M. F. (2014). *Elaboración de panes con sustitución parcial de harina de trigo con fuentes alternativas de proteínas* [{Tesis de Maestría}]. Universitat Politècnica De València.
- Gálvez-Toledo, D. K., Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., González-Olivares, L. G., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Estudio de los atributos fisicoquímicos de calidad que influyen en la vida útil de muffins de vainilla. *Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología de alimentos.*, 8(1), 889–898. <https://doi.org/10.29105/idecyta.v8i1.113>
- He, H., & Hosney, R. C. (1990). Changes in Bread Firmness and Moisture During Long-Term Storage. *American Association of Cereal Chemists*, 67(6), 603–605.
- Jaimez-Ordaz, J., Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., González-Olivares, L. G., Añorve-Morga, J., & Contreras-López, E. (2019). Kinetic parameters of lipid oxidation in third generation (3G) snacks and its influence on shelf-life. *Food Science and Technology*, 39(suppl 1), 136–140. <https://doi.org/10.1590/fst.38917>
- López Mazón, L., Esparza Lozano, M., Grijalva Haro, M. I., & Sandoval, S. (1999). Composición química del pan tradicional e industrial y su aporte de energía y proteína en la población del Noroeste de México. *Arch. latinoam. nutr.*, 186–192.
- Mongeau, R., & Brassard, R. (1979). Determination of neutral detergent fiber, hemicellulose, cellulose, and lignin in breads. *Cereal Chemistry*, 56(5), 437–441.

- Mongi, R., Ndabikunze, B., Chove, B., Mamiro, P., Ruhembe, C. C., St John's University of Tanzania, Ntwenya, J. G., & The University of Dodoma. (2011). Proximate composition, bread characteristics and sensory evaluation of cocoyam-wheat composite breads. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 11(48), 5586–5599. <https://doi.org/10.18697/ajf and.48.11315>
- Ochelle, O., Ikya, J., Ameh, C., & Gbaa, S. (2019). Quality Assessment of Bread from Wheat, Water Yam and Soybean Flours. *Asian Food Science Journal*, 1–8. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v10i330048>
- Quina Suni, J. R., & Pamo Cruz, G. A. (2023). *Elaboración de pan sin gluten con almidón de maíz y mezcla de hidrocoloides; enriquecido con proteína aislada de soja* [{Tesis de Licenciatura}]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Ribotta, P. D., & Le Bail, A. (2007). Thermo-physical assessment of bread during staling. *Food Science and Technology*, 40(5), 879–884. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.03.023>
- Steele, R. (2004). *Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food*. Woodhead Publishing.
- Sterkel Zibara, A. I. (2013). *Elaboración de un pan dulce reducido en calorías* [Tesis de {{Licenciatura}}]. Universidad del Valle de Guatemala.
- Tan, C. P., Che Man, Y. B., Selamat, J., & Yusoff, M. S. A. (2001). Application of arrhenius kinetics to evaluate oxidative stability in vegetable oils by isothermal differential scanning calorimetry. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(11), 1133. <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0401-1>
- Vásquez-Lara, F., Verdú-Amat, S., Islas-Rubio, A. R., Barat-Baviera, J. M., Grau-Meló, R., Granados-Nevárez, M. del C., Ramírez Wong, B., Vásquez-Lara, F., Verdú-Amat, S., Islas-Rubio, A. R., Barat-Baviera, J. M., Grau-Meló, R., Granados-Nevárez, M. del C., & Ramírez Wong, B. (2021). Efecto del tratamiento térmico en harina de avena utilizada en la sustitución de harina de trigo para la elaboración de pan. *Bioteecnia*, 23(2), 55–64. <https://doi.org/10.18633/bioteecnia.v23i2.1388>
- Vlášek, V., Langová, J., & Štencl, J. (2013). Effect of modified atmosphere packaging on stability of three kinds of bread. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61(6), 1881–1887. <https://doi.org/10.11118/actaun201361061881>

---

---

# APÉNDICE A

---

## Material suplementario

### A.1. Análisis proximal

#### A.1.0.1. Determinación de humedad

Se mantuvieron a peso constante las charolas de aluminio (limpias y sin tocar), posteriormente se introdujeron en la estufa de vacío a 65°C durante 4 horas. Una vez a peso constante se adicionó 5 g de muestra. Esta se distribuyó de manera uniforme con el objetivo de que la humedad pudiera evaporarse fácilmente. Las charolas se introdujeron en la estufa de vacío a 65°C y permanecieron ahí hasta que el peso final fuera constante ([Gálvez-Toledo et al., 2023](#)).

El porcentaje de humedad se calculó mediante la siguiente fórmula mostrada en la Ecuación A.1.

$$\%H = \frac{m_0 - m_f}{m} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

Donde:

- $\%H$  : porcentaje de humedad.
- $m_0$  : Peso de la charola con muestra antes del secado de la muestra (g).
- $m_f$  : Peso de la charola con muestra después del secado de la muestra (g).
- $m$  = Peso de la muestra (g).

#### A.1.0.2. Determinación de cenizas

Se recolectaron 3 g de muestra en crisoles previamente puestos a peso constante mufla a 550°C; dichas muestras se incineraron previamente, hasta observar la eliminación de todo el humo de la muestra, posteriormente, los crisoles se introdujeron en la mufla a 550°C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se procedió a pesar los crisoles hasta obtener un peso constante. Se adaptó la metodología con respecto a estudios similares ([Rodas, 2013](#)).

El porcentaje de cenizas se calculó mediante la Ecuación A.2:

$$\%Cenizas = \frac{P_t - P_c}{m} \times 100 \quad (\text{A.2})$$

Donde:  $P_t$  = Peso del crisol con cenizas (g)  $P_c$  = Peso del crisol a peso constante (g)  $m$  = Peso de la muestra (g)

#### A.1.0.3. Determinación de proteína por el método Kjeldahl

El procedimiento que se siguió fue adaptado de procesos similares descritos en publicaciones ([Ayala, 2014](#)).

Se pesó 3 g de sulfato de cobre pentahidratado  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  y se disolvió en 20 mL de agua destilada, se adicionó 50 mL de ácido ortofosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y se procedió a disolver completamente. Posteriormente, se adicionó cuidadosamente por las paredes del recipiente que contenía la mezcla, 430 mL de ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado y se agitó la mezcla durante 30 minutos.

En un tubo de digestión se colocó 70 mg de muestra, 0.5 g de sulfato de potasio  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y 3 mL de mezcla digestiva. Los tubos se introdujeron en el digestor y se llevaron a 370°C por 15 minutos, transcurrido el tiempo, cada tubo se retiró y se enfrió. Una vez fríos, se les adicionó 1.5 mL de peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30 % y se volvieron a introducir en el digestor para alcanzar nuevamente 370°C y se mantuvieron así hasta el final de la digestión. Los tubos se retiraron del digestor hasta que el contenido se observó completamente translúcido, sin partículas negras en suspensión (indican materia orgánica no digerida).

La muestra previamente digerida, se transfirió al tubo de destilación y se colocó un matraz Erlenmeyer con 50 mL de solución indicadora, como recipiente de destilación. En este caso el destilador automático se programó para adicionar al contenido del tubo 60 mL de hidróxido de sodio  $\text{NaOH}$  al 50 %, con un tiempo de destilación de 6 minutos al 60 % de potencia de vapor.

El contenido del matraz de recolección se tituló con ácido clorhídrico  $\text{HCl}$  0.01 N hasta el vire de verde esmeralda a café rojizo.

El porcentaje de proteína se calculó mediante las siguientes Ecuaciones ([A.3](#) y [A.4](#)):

$$\%Nitrógeno = \frac{(P - B) \times meq}{m} \times 100 \quad (\text{A.3})$$

$$\%Proteina = \%Nitrógeno \times F \quad (\text{A.4})$$

Donde:  $P$ = volumen de  $\text{HCl}$  gastado en la titulación de la muestra (mL)  $B$ = volumen de  $\text{HCl}$  gastado en la titulación del blanco (mL)  $N$ = normalidad del  $\text{HCl}$  empleado en la valoración  $meq$ = Miliequivalentes de nitrógeno (0.014)  $m$ = Peso de la muestra (g)  $F$ = Factor de conversión (6.38)

#### A.1.0.4. Determinación de fibra cruda

La metodología fue adaptada de publicaciones similares ([Rodas, 2013](#)).

Se pesó de 2 a 3 g de muestra, se colocó en un vaso de Berzelius, se agregaron unas perlas de vidrio y unas gotas de antiespumante. Posteriormente, se adicionó cuidadosamente 200 mL de ácido sulfúrico al 1.25 % p/v en ebullición y el vaso se colocó en el digestor. Posterior a 30 minutos de ebullición, el vaso se retiró, el contenido se filtró al vacío y se lavó con agua destilada caliente hasta eliminar el ácido por completo. El residuo, junto con las perlas de vidrio, se transfirió al vaso de Berzelius y se le adicionó 200 mL de hidróxido de sodio al 1.25 % p/v en ebullición, además de unas gotas de antiespumante; se colocó en el digestor y se dejó en ebullición por 30 minutos. Transcurrido este

tiempo, el contenido del vaso se filtró al vacío, se lavó con agua caliente y se adicionó al residuo 25 mL de alcohol etílico para eliminar una mayor cantidad de humedad. Este residuo se transfirió a una cápsula de porcelana a peso constante y se introdujo en la estufa para su secado a 105°C. Una vez a peso constante, la cápsula con el residuo se colocó en la mufla para su calcinación a 550°C hasta peso constante.

El contenido de fibra cruda en la muestra, se calculó mediante la Ecuación A.5:

$$\%FC = \frac{P_s - P_c}{m} \times 100 \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$P_s$  = peso constante del crisol con el residuo seco (g)

$P_c$  = peso constante del crisol después de la calcinación (g)

$m$  = peso de la muestra (referido a la muestra original) (g)

#### A.1.0.5. Determinación de carbohidratos

Los carbohidratos totales fueron determinados por diferencia del total y los otros compuestos del análisis proximal, tal como se describe en literatura de trabajos similares ([Sangronis et al., 2014](#)). Se utilizó la Ecuación A.6 que se presenta a continuación:

$$\%Carbohidratos = 100 - (\%Humedad + \%Cenizas + \%Proteina + \%Fibracruda + \%Grasa) \quad (\text{A.6})$$

## A.2. Resultados del análisis de varianza

En las Tablas A.1, A.2 y A.3 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que examina la influencia de tres factores principales: la Temperatura (A), el Tiempo (B) y la relación de estos dos (AB), en relación con los atributos fisicoquímicos de calidad de pan mestiza. Estos atributos incluyen la actividad de agua (AW), el contenido de humedad y la variación del peso.

**Tabla A.1:** ANOVA completo de la AW del pan tradicional mestiza.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	0.003629	0.0018147	236.7	$<2 \times 10^{-16}***$
B: Tiempo	7	0.01853	0.0026471	345.27	$<2 \times 10^{-16}***$
AB	14	0.006071	0.0004336	56.56	$<2 \times 10^{-16}***$
Residuales	48	0.000368	$<7.7 \times 10^{-6}$		

**Tabla A.2:** ANOVA completo del humedad del pan tradicional mestiza.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	7.73	3.863	24.89	$3.84 \times 10^{-8}***$
B: Tiempo	7	53.03	7.576	48.81	$<2 \times 10^{-16}***$
AB	14	24.63	1.759	11.34	$7.93 \times 10^{-11}***$
Residuales	48	7.45	0.155		

**Tabla A.3:** ANOVA completo del peso del pan tradicional mestiza.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	3.9	1.961	0.096	0.909
B: Tiempo	7	107.9	15.418	0.752	0.629
AB	14	36.8	2.627	0.128	1
Residuales	48	983.8	20.497		

## Referencias

- Ayala, M. (2014). *Determinación del contenido proteico y valor nutritivo en panes de quinua “panqui” y panes de trigo* [{Tesis de Licenciatura}]. Universidad Alas Peruanas.
- Gálvez-Toledo, D. K., Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., González-Olivares, L. G., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Estudio de los atributos fisicoquímicos de calidad que influyen en la vida útil de muffins de vainilla. *Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología de alimentos.*, 8(1), 889–898. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.113>
- Rodas, L. R. (2013). *Determinación de fibra en pan integral procedente de panaderías artesanales* [Tesis de {{Ingeniería}}]. Universidad del Azuay.
- Sangronis, E., Soto, M. J., Valero, Y., & Buscema, I. (2014). *Cascarilla de cacao venezolano como materia prima de infusiones.* 64(2), 123–130.