



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

TESIS

**IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DETERIORO EN UNA
GALLETA DE MANTEQUILLA: IMPACTO SOBRE SU VIDA ÚTIL**

Para obtener el título de
Licenciada en Química de Alimentos

PRESENTA

Magali Hernández Solís

Director

Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Codirectora

Dra. Elizabeth Contreras López

Mineral de la Reforma, Hidalgo, Abril, 2026



Mineral de la Reforma, Hgo., a 31 de marzo de 2025

Número de control: ICBI-D/538/2025

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 **Magali Hernández Solís**, quien presenta el trabajo de titulación "**Identificación de los parámetros de deterioro en una galleta de mantequilla: Impacto sobre su 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. Luis Guillermo González Olivares

Secretario: Dra. Laura García Curiel

Vocal: Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Suplente: Dra. Elizabeth Contreras López

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

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

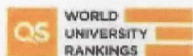
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

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
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a mi familia, por ser el principal pilar en mi vida y el fundamento de cada uno de mis logros. Gracias por ser mi base, mi guía y el motor que impulsa cada uno de mis pasos.

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, por ser el ejemplo del esfuerzo, dedicación y perseverancia; gracias a ellos por siempre confiar en mí y en mis expectativas, en cada decisión y proyecto que tome a lo largo de este periodo. A ustedes que han sabido formarme con buenos valores, hábitos y sentimientos, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino. Todo lo que hoy alcanzo es reflejo de sus valores y sacrificios, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible. Con todo mi amor y gratitud.

A mi pareja, que es la persona que camino conmigo durante esta etapa, sosteniéndome en los días difíciles y celebrando conmigo cada avance. Gracias por tu compañía constante, por tu comprensión en los momentos de estrés y por nunca soltar mi mano; tu apoyo fue más que importante: fue la fuerza que muchas veces necesitaba para continuar. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por motivarme a seguir adelante y por recordarme siempre de lo que soy capaz; este trabajo también lleva tu esfuerzo, tu paciencia y amor, porque estuviste presente en cada paso de este camino.

Agradecimientos

En las próximas líneas quiero expresar mis más profundos agradecimientos a todas las personas que con su asistencia técnica y humano han colaborado en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el valioso respaldo proporcionado durante la ejecución experimental de este proyecto.

A mi director y codirectora de este proyecto, el Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores y la Dra. Elizabeth Contreras López, por su guía experta, orientación y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento en el trabajo realizado y culmino de la misma.

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
1.2. Proceso de elaboración	2
1.3. Ingredientes de la galleta y su función	2
1.4. Parámetros de deterioro	4
1.4.1. Deterioro físico	5
1.4.2. Deterioro químico	6
1.4.3. Deterioro microbiológico	7
1.5. Vida útil	8
1.5.1. Factores que afectan a la vida útil	8
1.5.2. Métodos para calcular la vida útil	8
1.5.3. Cinéticas de deterioro	9
1.6. Estudios de la vida útil en galletas	9
1.7. Conclusión	9

1.8. Referencias	10
2. Estudio de vida útil de galletas	15
2.1. Introducción	16
2.2. Materiales y métodos	17
2.2.1. Muestra	17
2.2.2. Preparación de la muestra	17
2.2.3. Almacenamiento	17
2.2.4. Estudio de vida útil	19
2.2.5. Peso	19
2.2.6. pH	19
2.2.7. Índice de acidez	19
2.2.8. Color	19
2.2.9. Aw	20
2.2.10. Análisis cinético	20
2.3. Análisis de resultados	20
2.4. Resultados y discusión	21
2.4.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento	21
2.4.2. Parámetros de color	26
2.4.3. Análisis cinético	35
2.4.4. Análisis termodinámico	38
2.4.5. Cálculo de vida útil	39
2.4.6. Discusión general	39
2.5. Estrategias de optimización de vida útil	40
2.6. Conclusión	40
2.7. Referencias	41
A. Material suplementario	45
A.1. Condiciones de experimentación	45
A.2. Resultados del análisis de varianza	46

Índice de figuras

1.1. Diagrama de elaboración de galletas de mantequilla	3
1.2. Mecanismo de reacción de oxidación lipídica.	7
2.1. Muestras de galletas proporcionadas para el estudio de VU.	18
2.2. Valores de AW obtenidos en diversas condiciones de estudio de la VU de las galletas. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).	22
2.3. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	23
2.4. Valores de cambio en el peso (g) de galletas 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
2.5. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo del peso de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	25
2.6. Valores de cambio en la acidez titulable de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, eviden- cian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).	27
2.7. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la acidez titulable de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	28

2.8. Valores de cambio en el L^* de galletas 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 ($p < 0.05$).	29
2.9. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de L^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	30
2.10. Valores de cambio en el a^* de galletas 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 ($p < 0.05$).	31
2.11. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de a^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	32
2.12. Valores de cambio en el b^* de galletas 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 ($p < 0.05$).	33
2.13. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de b^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	34

Índice de tablas

1.1. Comparación de los tipos de deterioro en productos de panificación.	5
2.1. Ecuaciones para cinéticas empleadas para la descripción del deterioro. Donde las constantes de velocidad de reacción se representan con (k) , los parámetros críticos de calidad con (Q) y el tiempo (t)	20
2.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para galletas.	35
2.3. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para galletas.	36
2.4. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para galletas.	36
2.5. Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de orden cero que describe la variación del peso.	38
2.6. Tiempo de VU a diferentes temperaturas.	39
A.2. ANOVA completo de la AW de las galletas.	46
A.3. ANOVA completo del peso de las galletas.	46
A.4. ANOVA completo de la acidez titulable de las galletas.	46
A.5. ANOVA completo del valor de L^* de las galletas.	47
A.6. ANOVA completo del valor de a^* de las galletas.	47
A.7. ANOVA completo del valor de b^* de las galletas.	47

Lista de acrónimos

ANOVA	análisis de varianza	20
AW	actividad de agua	4
PAVU	pruebas aceleradas de vida útil	16
VU	vida útil	4

Abstract

THE COMPANY **Chocolatería y Galletería Artesanal Chocolate D’10** from Hidalgo, Mexico, produces butter cookies with icing and seeks to determine the optimal storage conditions to extend the shelf life of their product. To achieve this, a shelf life estimation study was required. The shelf life of cookies is generally determined by the ingredients and storage conditions. Considering this, an accelerated shelf life study was implemented, subjecting the sample to atypical storage conditions to quickly and reliably obtain results regarding its deterioration. It is important to note that at room temperature, the shelf life is typically estimated to be one to two weeks, and during this time, various types of deterioration occur, including physical, chemical, microbiological, and sensory degradation.

This study focused on the variations in physicochemical quality attributes of butter cookies, as these are indicators of freshness and quality. Understanding the evolution of these attributes during storage will help describe the deterioration of the cookies, contributing to knowledge that can prolong their shelf life.

In this context, the objective of this thesis was to develop a prediction method using ordinary least squares (OLS) regression. The goal was to create a monitoring and control method for the evolution of physicochemical parameters such as water activity, weight loss, titratable acidity, pH, and color ($L^*a^*b^*$). The results aim to contribute to inventory management, food waste reduction, and better resource management, benefiting both the producer and the consumer.

Specific objectives were developed in different chapters, which facilitated the achievement of the overall objective. Summaries of these are explained below:

1. **Chapter 1: General Background.** This chapter reviewed the background and general panorama of butter cookies, covering their history, ingredients, and the factors affecting their shelf life. Additionally, the concept of shelf life was defined, providing a general context for the work’s objective. The chapter concluded with a review of similar studies.
2. **Chapter 2: Shelf Life Study of Butter Cookies.** This chapter focused on the shelf life study of butter cookies using experimental data to implement an ordinary least squares regression model for predicting shelf life. Kinetic models were used to analyze that the critical quality attribute would be the variation in weight, which was adjusted to a second-order model, focusing the results at a temperature of 40°C, corresponding to the necessary conditions for an

accelerated study. A thermodynamic analysis was also conducted to understand the behavior of this attribute's reaction, determining parameters such as the Q_{10} factor, which was found to be 0.547. This factor described how the reaction rate constant k would increase for every 10° rise in storage temperature.

In conclusion, this work achieved a prediction model based on ordinary least squares regression combined with an accelerated shelf life study. The development of this prediction model allowed for individualized analysis for the allied producer's cookies, considering the product's characteristics, resulting in a low-cost, highly reliable tool for better inventory management and storage methods. It is expected that the scope of these results will provide benefits to the food industry, especially for cookie producers or similar products.

Resumen

LA EMPRESA **Chocolatería y galletería artesanal Chocolate D'10** procedente del estado de Hidalgo, México, produce galletas de mantequilla con glaseado y requiere determinar las condiciones de almacenamiento óptimas de su producto, las cuales permitirán la extensión de la vida útil de la galleta. El deterioro de las galletas de mantequilla es un fenómeno influenciado por diversos factores que afectan su estabilidad y aceptabilidad, lo que representa un desafío para la industria alimentaria, así como para la gestión de inventarios y la reducción de desperdicios.

La predicción de su vida útil requiere un enfoque que permita identificar los parámetros fisicoquímicos críticos y modelar su evolución bajo diferentes condiciones de almacenamiento. Es por ello que la presente tesis busca generar conocimiento aplicado mediante la evaluación de los principales atributos de calidad de las galletas de mantequilla, utilizando modelos cinéticos y análisis termodinámicos para describir su comportamiento a lo largo del tiempo. Los resultados contribuirán a mejorar la estimación de la vida útil del producto y servirán como base para el diseño de estrategias de conservación más eficientes, beneficiando a productores, distribuidores, consumidores y a todas las partes interesadas.

Con base en lo anterior, se determinó el objetivo de esta tesis como analizar los atributos fisicoquímicos y microbiológicos de calidad que afectan la vida útil de las galletas de mantequilla, identificando los parámetros críticos de deterioro y modelando su evolución a través de modelos cinéticos y análisis termodinámicos. Para ello, se realizó una revisión de la literatura sobre los mecanismos de deterioro y métodos de conservación, y se llevó a cabo un estudio experimental en el que se determinaron los cambios en actividad de agua, pérdida de peso, acidez titulable, pH y color bajo diferentes temperaturas controladas de almacenamiento, con el fin de predecir la vida útil del producto y proponer estrategias para su optimización.

Se desarrollaron objetivos específicos en diferentes capítulos, lo que facilitó llevar a cabo el objetivo general, resúmenes de estos se explican a continuación:

1. **Capítulo 1. Antecedentes generales.** Se hizo una revisión de los antecedentes y panoramas generales sobre las galletas de mantequilla, se abarcó su historia, ingredientes, así como los factores que afectan su vida útil. Además se definió el concepto de vida útil lo que permitió tener un contexto general del objetivo del trabajo. Se concluyó con una revisión de estudios similares.

2. **Capítulo 2. Estudio de vida útil de galletas con chispas de chocolate.** Este capítulo se enfocó en la realización del estudio de vida útil de las galletas de mantequilla utilizando datos experimentales para la implementación de un modelo de regresión lineal de múltiples cuadrados ordinarios para la predicción del tiempo de vida útil. Además se analizó mediante modelos cinéticos, que el atributo crítico de calidad sería la variación del peso, esto ajustado al modelo de segundo orden y enfocando los resultados a la temperatura de 40°C, correspondiente a las condiciones necesarias para un estudio acelerado. Además se realizó un análisis termodinámico para conocer el comportamiento de la reacción de este atributo, determinando parámetros como el factor Q_{10} , que resultó de 0.547, que con respecto a la constante de velocidad de reacción k , describió cuánto aumentaría esta por cada 10°C que incrementara la temperatura de almacenamiento.

A modo de conclusión, este trabajo logró un modelo de predicción basado en una regresión lineal de múltiples cuadrados ordinarios en conjunto con un estudio acelerado de vida útil. El desarrollo de este modelo de predicción permitió individualizar el análisis para las galletas del productor aliado, tomando en cuenta las características de su producto, logrando una herramienta de bajo costo y alta confiabilidad que atendiera una mejor gestión de inventarios y métodos de almacenamiento. Se espera que el alcance de estos resultados provea de beneficios a la industria alimentaria, en especial a los productores de galletas o productos similares.

Introducción

SEGÚN LA NMX-F-006-1983, las galletas son el producto elaborado con harina de trigo, avena, centeno o integrales, azúcares, grasas vegetales y/o aceites vegetales, agentes leudantes, sal yodada; adicionadas o no de otros ingredientes y aditivos alimenticios a los que se someten a un proceso de amasado, moldeado y horneado. Desde aquellas de sabores naturales de las masas de origen hasta aquellas de sabores adquiridos por los ingredientes que se les adicionan. Ejemplo de esto último son las galletas de vainilla, con chispas de chocolate, galletas de té, entre otras. Todas estas variedades de galletas se disfrutan alrededor del mundo por personas de todas las edades debido a su agradable sabor y a su facilidad de consumo, lo que las hace un producto sumamente popular. De manera similar, el Codex Alimentarius establece en el GSFA que el término “galleta dulce” sweet biscuit se refiere a un producto similar a una galleta que puede consumirse como postre.

Debido a que cada producto es diferente, ya sea por su procesamiento, ingredientes o condiciones normales de almacenamiento, conocer sus parámetros de deterioro es de suma importancia. Determinar estos parámetros es una herramienta que ayuda a estimar su vida útil, la cual está definida como el tiempo en que un alimento mantendrá su seguridad, calidad y por lo tanto sus características físicas, químicas y microbiológicas establecidas en límites mínimos para su aceptabilidad.

Hoy en día, un problema significativo que afecta a la industria alimentaria es el desperdicio de alimentos, el cual trae consigo pérdidas económicas, impacto en la huella hídrica, además de otros problemas sociales y ambientales. Lograr la optimización de un proceso o condiciones de almacenamiento, son soluciones ante estos problemas que enfrenta la industria alimentaria, en este caso la investigación sobre la influencia del tiempo y la temperatura en los atributos fisicoquímicos de calidad de las galletas de mantequilla adquiere relevancia al ofrecer una perspectiva crítica sobre cómo optimizar las condiciones de almacenamiento de este producto que es ampliamente consumido.

Este estudio se centra en la implementación de pruebas de vida útil aceleradas que permitan identificar los factores que tengan mayor influencia en la calidad de las galletas de mantequilla. A partir de estos hallazgos, se pueden proponer soluciones para la extensión de la vida útil del producto y desarrollar un programa de predicción de deterioro basado en los atributos fisicoquímicos. Al comprender cómo las variables de tiempo y temperatura afectan la calidad y vida útil de las galletas de mantequilla durante el almacenamiento, esta investigación proporcionará información valiosa para la optimización de las condiciones de conservación, contribuyendo así a la reducción del

desperdicio alimentario y sus consecuencias económicas y ambientales.

Considerando esto, se determina que el presente trabajo contribuye al área de la ciencia y tecnología de alimentos, con un enfoque en la calidad y inocuidad alimentaria. Al implementar pruebas de vida útil aceleradas y desarrollar un programa de predicción de deterioro basado en atributos fisicoquímicos, se identifican factores clave para extender la vida útil del producto. Esto permite mejorar las prácticas de almacenamiento, asegurando la calidad del producto por más tiempo. Además, la investigación aporta datos valiosos sobre la cinética de deterioro de las galletas de mantequilla, contribuyendo al conocimiento científico y académico, beneficiando a fabricantes, distribuidores, docentes, estudiantes y personas interesadas en el tema. Adicionalmente, el presente estudio se desprende de una colaboración con un productor de alimentos local, lo que permite aportar una contribución directa a la comunidad.

Retomando lo anterior, el objetivo del trabajo fue investigar la influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento en los atributos fisicoquímicos, químicos y microbiológicos de calidad de las galletas de mantequilla, identificando los parámetros críticos de deterioro y modelando su evolución a través de modelos cinéticos y análisis termodinámicos. Para ello, se realizó una revisión de la literatura sobre los mecanismos de deterioro y métodos de conservación, y se llevó a cabo un estudio experimental en el que se monitoreó la variación en el peso, el pH, la acidez titulable, el color y la actividad de agua a temperaturas de 20, 30 y 40°C. Esto permitió analizar los cambios bajo diferentes temperaturas controladas de almacenamiento para predecir la vida útil del producto y proporcionar información valiosa para la optimización de las condiciones de conservación de las galletas de mantequilla.

CAPÍTULO 1

Antecedentes generales

Resumen

La investigación se centró en los factores físicos, químicos y microbiológicos que influyen en el deterioro de galletas, con el fin de analizar las variables que limitan su vida útil. Se investigaron parámetros como humedad, actividad del agua, temperatura y exposición al oxígeno, así como su relación con la degradación del producto. El análisis incluyó una revisión bibliográfica sobre las galletas, considerando sus etapas de fabricación, desde el amasado hasta el enfriamiento. La información recopilada indica que factores como una baja actividad del agua (< 0.6) inhiben el crecimiento microbiano; mientras que, la absorción de humedad ambiental y la oxidación de lípidos contribuyen al deterioro sensorial, afectando textura y sabor. Se identificaron estrategias de mitigación, entre ellas la mejora en formulaciones, ajustes en el proceso de producción, selección de envases adecuados y control de las condiciones de almacenamiento. Estos hallazgos permiten optimizar la estabilidad del producto y extender su vida útil.

Lista de acrónimos

AW Actividad de agua	4
pH Potencial de Hidrógeno	5
VU Vida útil	4

1.1. Introducción

Desde la antigüedad, diversas culturas elaboraban productos similares a las galletas, como panes planos y duros utilizados como provisiones, especialmente por los ejércitos griegos y romanos. Con

el tiempo, las formulaciones evolucionaron y comenzaron a incorporar ingredientes como huevo, mantequilla o azúcar, lo que diversificó sus presentaciones. Dado que el azúcar era difícil de obtener, las versiones dulces fueron menos comunes hasta épocas más recientes ([Collingham, 2020](#)).

La galleta se define como un producto obtenido a partir de harinas de trigo, avena o integrales, combinadas con azúcares, grasas o aceites vegetales comestibles, agentes leudantes y sal yodada. Puede incluir otros ingredientes y aditivos alimentarios permitidos, y su elaboración comprende procesos de amasado, moldeado y horneado, conforme a la NMX-F-006-1983 ([Dirección General de Normas & Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1994](#)).

La clasificación de las galletas puede hacerse con base en distintos criterios. Según las características de la masa, se distinguen masas blandas, duras y fermentadas. Por su método de producción, se reconocen las obtenidas mediante molde rotatorio, corte con alambre o cortadora mecánica. De acuerdo con el perfil sensorial, se clasifican en dulces, semidulces y saladas ([Misra & Tiwari, 2014](#)).

El tipo de maquinaria empleada, como rodillos giratorios, extrusores o cortadores, se selecciona en función de la formulación y la consistencia de la masa. Por ejemplo, en las galletas extruidas, esta debe ser suficientemente cohesiva para mantener su forma, pero lo bastante corta para desprenderse limpiamente al ser cortada ([Sievert et al., 2007](#)).

Con base en lo anterior, el objetivo de este capítulo fue revisar los antecedentes generales relacionados con las galletas de mantequilla, incluyendo su elaboración, los ingredientes y su función, los principales mecanismos de deterioro y los enfoques empleados para el estudio de la vida útil, con la finalidad de establecer el marco teórico que sustentó la selección de variables y el desarrollo experimental de esta investigación.

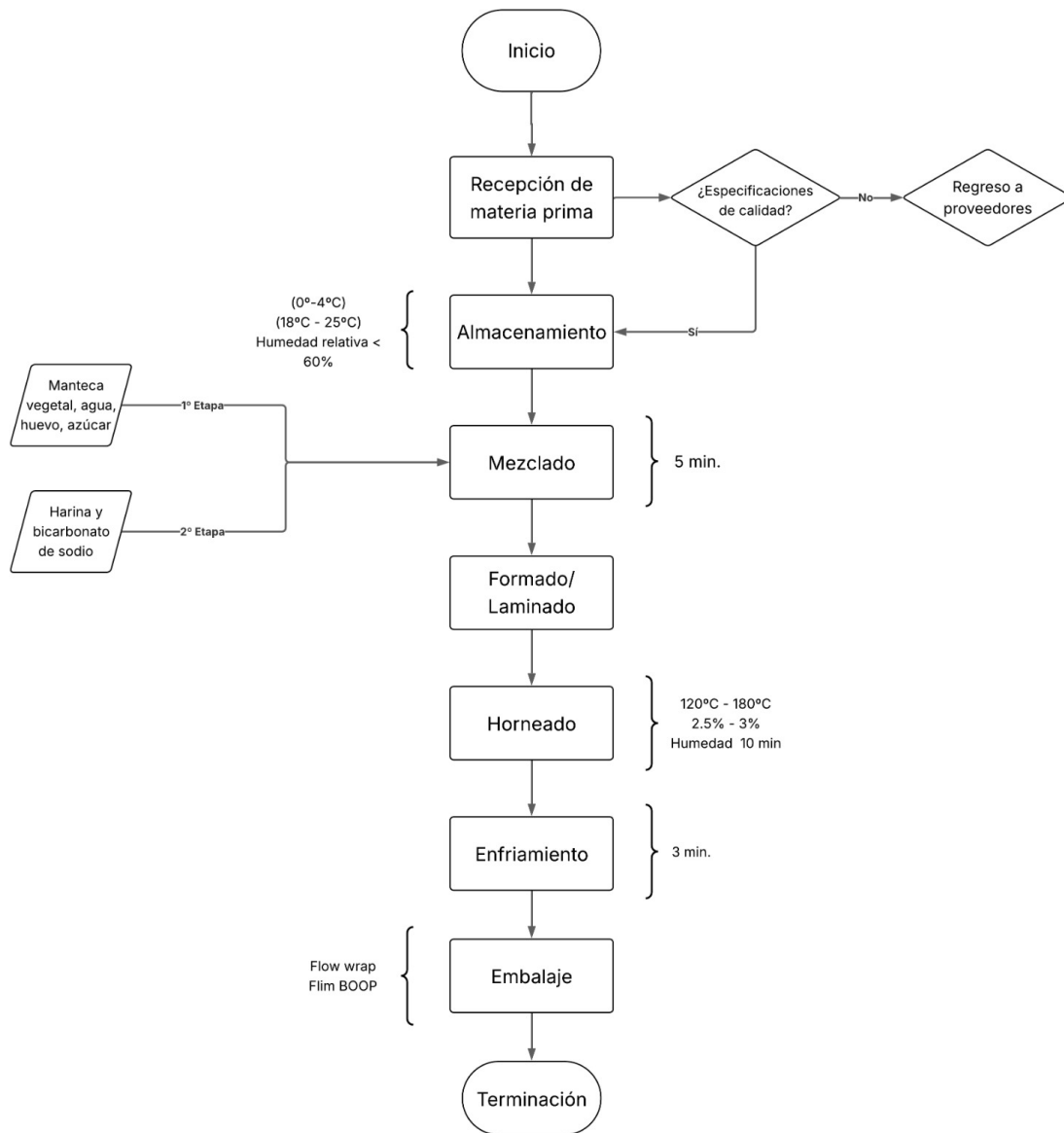
1.2. Proceso de elaboración

La elaboración de galletas a gran escala suele seguir el proceso general de mezcla y fermentación de la masa, el cual suele ser un proceso por lotes. Procesos posteriores como el formado, horneado y enfriamiento son operaciones continuas. Por último, el embalaje, generalmente se realiza fuera de línea, a menos que la empresa se dedique a un solo producto ([Davidson, 2023](#)).

A continuación, la Figura 1.1 presenta un diagrama de flujo sobre el proceso general de la elaboración de las galletas de mantequilla. Las galletas de mantequilla principalmente están hechas de harina de trigo, azúcar, mantequilla y agentes leudantes con otros ingredientes en cantidades menores; los cuales se mezclan para formar una masa, la cual se deja reposar, para luego trabajarla usando rodillos hasta obtener láminas con un espesor específico. La forma de la galleta se obtiene de la línea transportadora en el corte de moldes, donde después ingresan al horno de cocción. Las galletas horneadas se dejan enfriar por un determinado tiempo y luego se envasan. Las galletas pueden tener pasos adicionales según el tipo de galleta a fabricar ([Misra & Tiwari, 2014](#)).

1.3. Ingredientes de la galleta y su función

Las galletas se elaboran principalmente con harina de trigo, grasa y azúcar. La proporción y naturaleza de estos ingredientes determinan el equilibrio de la masa y la estructura final del producto ([Misra & Tiwari, 2014](#)).

**Figura 1.1:** Diagrama de elaboración de galletas de mantequilla

Harina La harina aporta proteínas, en particular gluten, cuya hidratación y amasado dan lugar a una red elástica, extensible e impermeable al dióxido de carbono generado durante la fermentación (Dhal et al., 2023). En galletas comerciales, la harina contiene entre 70 y 75 % de almidón, 10 a 12 % de proteínas y 1 a 2 % de grasa. El contenido de proteínas influye en la elasticidad, cohesividad y viscosidad de la masa, por lo que su ajuste depende del tipo de galleta a elaborar (Klunklin et al., 2018).

Agua El agua permite la disolución de ingredientes, activa enzimas y levaduras, y favorece la hidratación del almidón y la formación del gluten durante el amasado (Sogabe et al., 2021). En formulaciones de galletas, su cantidad es limitada, lo cual, junto con la disponibilidad reducida de proteínas y almidón, contribuye a la textura crujiente del producto (Misra & Tiwari, 2014). Durante el horneado, la masa pierde alrededor del 10 % de su humedad. Variaciones mínimas en el contenido de agua afectan las propiedades reológicas de la masa y las características superficiales de la galleta (Misra & Tiwari, 2014; Sogabe et al., 2021).

Azúcar El azúcar aporta carbohidratos fermentables y sabor. Además, interviene en el desarrollo del color mediante la reacción de Maillard (Sievert et al., 2007). La sacarosa también contribuye al volumen, suavidad, textura y conservación del producto, al reducir la Actividad de agua (AW) y limitar la formación de redes de gluten, lo que disminuye la dureza de la masa (Hill & Mamat, 2018).

Grasas Las grasas proporcionan sabor, textura y consistencia, y su efecto depende de la cantidad y tipo utilizados. Ingredientes como mantequilla, manteca y margarina son comunes en la formulación de galletas, que suelen ser productos con alto contenido graso (Alagbaoso et al., 2019). También actúan como lubricantes, mejoran la manejabilidad de la masa y reducen la pegajosidad. Forman películas entre las redes de gluten, interfiriendo con la retrogradación del almidón y mejorando la palatabilidad del producto (Devi & Khatkar, 2016; Misra & Tiwari, 2014).

Agentes leudantes En la elaboración de galletas, se utilizan agentes leudantes como el carbonato de amonio, que airea la masa sin necesidad de un ácido, aportando porosidad y volumen (Misra & Tiwari, 2014). También se emplea polvo para hornear, mezcla de bicarbonato de sodio con un ácido, que genera gases durante la cocción. Otros agentes comunes incluyen pirofosfato de sodio, bicarbonato de sodio y bicarbonato de amonio (Arepally et al., 2020).

Sal La sal actúa como potenciador del sabor, equilibra la dulzura y fortalece la red de gluten. Además, contribuye a reducir ligeramente la AW del sistema, lo que favorece la conservación del producto (Ayed et al., 2021).

Otros ingredientes Adicionalmente, se incorporan diversos compuestos para mejorar las propiedades sensoriales y la Vida útil (VU) del producto. Entre ellos se encuentran la malta diastásica, conservadores como propionato de calcio, agentes oxidantes como bromatos o ascorbatos, emulsificantes, leche en polvo y otros aditivos con funciones específicas en la fermentación, estructura o calidad final (Sykes & Davidson, 2020).

1.4. Parámetros de deterioro

La palabra deterioro se refiere a cualquier cambio que altere o afecte la condición de un alimento haciéndolo menos apetecible en el momento de su consumo. En el caso de los productos de panadería, los problemas que se presentan comúnmente para el deterioro son el deterioro físico que incluye

el envejecimiento y la pérdida de humedad, el deterioro químico que usualmente se refiere a la rancidez de las galletas y el deterioro microbiológico relacionado al crecimiento y desarrollo de moho, bacterias y levaduras. Estos problemas se deben a factores interrelacionados, específicamente la temperatura de almacenamiento, humedad relativa, Potencial de Hidrógeno (pH), conservantes, tipo de empaque entre otros, siendo la AW y humedad los más importantes (Smith et al., 2004).

En el caso de las galletas, por el contenido de humedad bajo ($< 5\%$) y la baja AW les proporciona una VU larga; en cambio, el problema presente en estas es la absorción de humedad de la atmósfera donde se encuentran, lo que conduce al ablandamiento del producto y la pérdida de características sensoriales, es decir, el envejecimiento. Un segundo problema potencial que se suele presentar es el enranciamiento de las grasas que surge de la combinación de una baja AW y un largo tiempo de almacenamiento (Cauvain & Young, 2008). A continuación se presentan en la Tabla 1.1 los principales factores de deterioro resumidos, en las secciones posteriores estos se explican en mayor amplitud.

Tabla 1.1: Comparación de los tipos de deterioro en productos de panificación.

Tipo de deterioro	Fenómenos principales	Efectos en el producto
Físico	Retrogradación del almidón, migración de agua, pérdida de compuestos volátiles	Endurecimiento del producto, cambios en la textura (más seco y firme en el interior, blando en la corteza), pérdida de aroma agradable
Químico	Oxidación de lípidos, rancidez oxidativa e hidrolítica	Sabores y olores desagradables (notas amargas y rancias), pérdida de nutrientes esenciales como vitaminas y ácidos grasos
Microbiológico	Deterioro de la calidad microbiológica	Crecimiento de levaduras en condiciones de alta AW

1.4.1. Deterioro físico

El envejecimiento, o *staling*, es uno de los principales desafíos en productos de panificación. Durante el almacenamiento, las galletas experimentan transformaciones que alteran sus propiedades organolépticas y reducen su aceptabilidad. Estos cambios se deben principalmente a la migración de agua dentro de la matriz alimentaria y a la retrogradación del almidón (Cauvain & Young, 2008).

La retrogradación del almidón implica la reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina tras la gelatinización. La amilosa, de estructura lineal, se recrystaliza pocas horas después del horneado, lo que incrementa la firmeza inicial del producto. Posteriormente, la amilopectina, de estructura ramificada, se reorganiza de manera más lenta, contribuyendo al endurecimiento progresivo durante el almacenamiento (S. Wang et al., 2015).

Otra consecuencia del envejecimiento es la pérdida de compuestos volátiles responsables del aroma, esto se vuelve más evidente en el proceso de evaporación post-horneado y procesos como la oxidación lipídica. Aromas generalmente considerados agradables, como el de la levadura y el trigo, se disipan rápidamente, mientras que surgen notas indeseables asociadas a almidón o grasa oxidada. A nivel textural, el interior del producto se torna más seco y firme, y la corteza pierde su crujencia, volviéndose blanda y coriácea (Ghasemi-Varnamkhasti & Lozano, 2016).

El ablandamiento también está influenciado por la humedad relativa, el tipo de empaque y la composición del producto. Humedades relativas superiores al 60 % inducen absorción de agua desde el ambiente, lo que reduce la rigidez y disminuye la sensación crujiente, ya que el agua actúa como plastificante ([Barbosa-Cánovas et al., 2020](#); [Wani et al., 2015](#)).

El empaque determina el grado de exposición del producto al intercambio de humedad. Materiales permeables favorecen la ganancia o pérdida de agua, modificando la textura de la galleta ([Giannou et al., 2014](#); [Siracusa, 2012](#)).

La formulación también impacta en la retención de humedad. Ingredientes como azúcar morena o miel, por su carácter higroscópico, promueven el ablandamiento. El equilibrio entre estos edulcorantes y la humedad deseada debe evaluarse cuidadosamente para evitar afectaciones en la textura final ([R. Wang & Hartel, 2021](#); [Zoulias et al., 2002](#)).

Finalmente, las condiciones de almacenamiento influyen en la estabilidad textural. Cambios bruscos de temperatura pueden provocar condensación sobre la superficie, incrementando el contenido de humedad y acelerando el deterioro del producto ([Alpers et al., 2021](#)).

1.4.2. Deterioro químico

La rancidez oxidativa en los alimentos se produce por la oxidación de ácidos grasos insaturados en presencia de oxígeno, generando compuestos volátiles y no volátiles responsables de sabores y olores indeseables. Este proceso también conlleva la pérdida de nutrientes como vitaminas y ácidos grasos esenciales. Puede desarrollarse en distintas etapas de la producción, desde las materias primas hasta el almacenamiento. El mecanismo general de estas reacciones se ilustra en la Figura 1.2 ([Velasco et al., 2010](#)).

En productos de panificación, el término “rancio” alude a la presencia de defectos sensoriales originados por la degradación de lípidos, tanto por oxidación como por hidrólisis, además del deterioro de proteínas y la interacción con compuestos fenólicos. La oxidación puede ser enzimática o no enzimática, mientras que la hidrólisis resulta de la acción de lipasas, que liberan ácidos grasos libres. La luz, el calor y la presencia de oxígeno aceleran ambos procesos ([Heiniö, 2014](#)).

En galletas, la susceptibilidad a la rancidez se relaciona con su alto contenido graso, la exposición al oxígeno, temperaturas elevadas, la presencia de metales traza y baja AW. Las grasas insaturadas, abundantes en productos como las galletas de mantequilla, se degradan fácilmente por oxidación, generando compuestos responsables de defectos sensoriales. Este deterioro es favorecido por especies reactivas de oxígeno ([Pirzad et al., 2019](#)).

Los aceites, como lípidos insaturados presentes en galletas, son altamente susceptibles a la oxidación, sobre todo bajo condiciones de calor o exposición prolongada al oxígeno ([Martínez et al., 2011](#); [Shahidi & John, 2013](#)). El proceso se inicia con la formación de radicales libres que reaccionan con oxígeno para generar hidroperóxidos, los cuales se descomponen en aldehídos y cetonas responsables del deterioro sensorial. Técnicas como el envasado al vacío pueden reducir la exposición al oxígeno y mitigar la formación de estos compuestos ([Shao et al., 2022](#); [Vivienne & Amrinola, 2024](#)).

Las temperaturas elevadas incrementan la energía cinética molecular, favoreciendo reacciones oxidativas tanto enzimáticas como no enzimáticas ([Pande et al., 2024](#)). La AW también influye, ya que niveles altos pueden potenciar la actividad de lipasas, promoviendo la liberación de ácidos grasos libres y acelerando la rancidez ([Christopoulos & Tsantili, 2015](#); [Li et al., 2016](#)).

Mientras que metales como hierro y cobre catalizan la peroxidación lipídica, acelerando el deterioro de productos con alto contenido graso. Su presencia suele deberse al contacto con equipos de procesamiento, por lo que el uso de acero inoxidable es una medida recomendada para reducir su

migración al alimento (Aher et al., 2022; Duru et al., 2016).

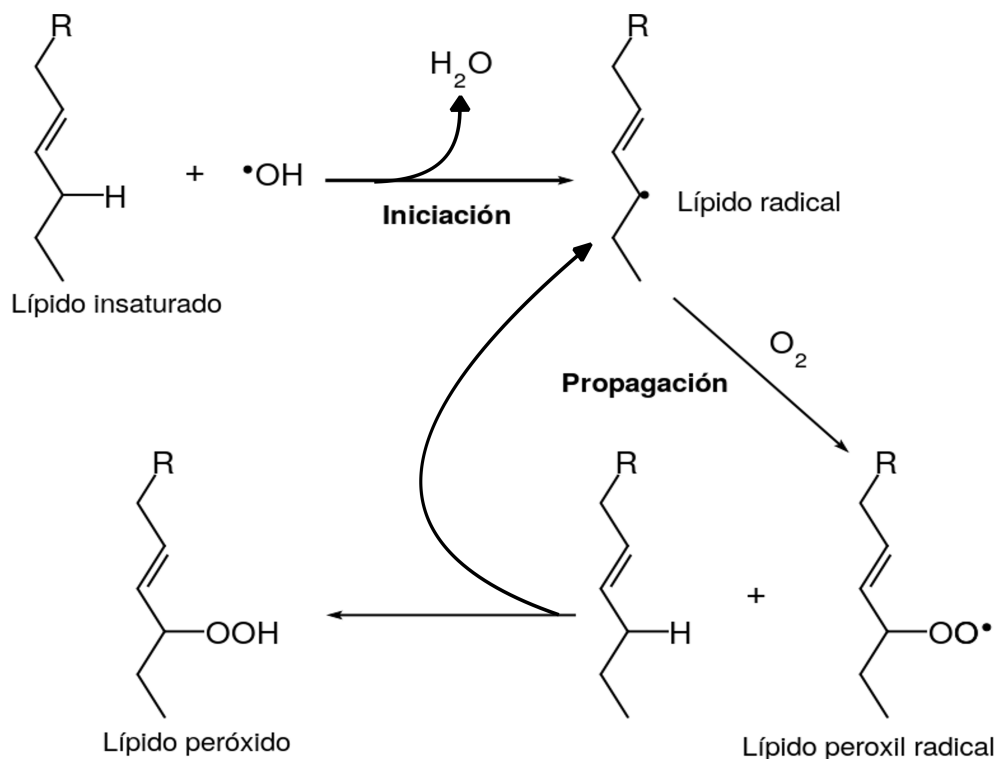


Figura 1.2: Mecanismo de reacción de oxidación lipídica.

1.4.3. Deterioro microbiológico

En productos de panadería, la AW influye tanto en la migración de humedad como en la estabilidad microbiológica. Cuando la AW es baja, se incrementa la presión osmótica del medio, lo que inhibe el crecimiento microbiano al dificultar el paso de nutrientes a través de las membranas celulares y reducir la eficacia de las enzimas extracelulares involucradas en la descomposición de nutrientes. Las bacterias requieren niveles más altos de humedad disponible para desarrollarse, seguidas por las levaduras y los mohos (Cauvain & Young, 2008).

Diversos estudios han establecido valores mínimos de AW por debajo de los cuales los microorganismos no pueden reproducirse ni sobrevivir. La mayoría de las bacterias asociadas con el deterioro proliferan en ambientes con una AW cercana a 0.95, por lo que predominan en alimentos con alto contenido de humedad. Algunas cepas pueden desarrollarse a valores de 0.90 o incluso 0.85, mientras que ciertos mohos y levaduras pueden sobrevivir en condiciones con AW entre 0.65 y 0.61 (Tapia et al., 2007). En el caso de las galletas, su baja AW (< 0.6) impide el desarrollo microbiano típico de productos de panadería. Sin embargo, bajo condiciones de almacenamiento con temperaturas elevadas, puede

aumentar la AW, favoreciendo el deterioro por levaduras (Smith et al., 2004).

1.5. Vida útil

La VU se define como el periodo de tiempo de almacenamiento en el cual un alimento mantendrá en condiciones óptimas o aceptables con respecto a un límite dado, sus características y calidad, ya sean estas físicas, químicas y/o microbiológicas. Para determinar las mejores condiciones de almacenamiento es importante adquirir un conocimiento profundo del mecanismo del proceso de deterioro, que puede ser complejo en diferentes productos, especialmente en aquellos que la cantidad de agua que contienen es alta o donde hay un ingrediente altamente perecedero que influencia a toda la matriz, como lo son las grasas (Kilcast & Subramaniam, 2000).

1.5.1. Factores que afectan a la vida útil

La VU de un alimento está determinada por factores intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos se relacionan con las propiedades propias del alimento, como pH, acidez, contenido de humedad y microbiota. Los extrínsecos corresponden a condiciones externas durante el almacenamiento y distribución, como temperatura, humedad y manipulación (Kilcast & Subramaniam, 2000).

En productos como galletas, la humedad influye directamente en la textura: un intercambio desfavorable con el ambiente puede generar productos excesivamente secos o, más comúnmente, blandos y húmedos. Además, la presencia de oxígeno y la exposición a la luz favorecen la oxidación lipídica, especialmente en alimentos con alto contenido de grasa (Chowdhury et al., 2012).

1.5.2. Métodos para calcular la vida útil

La estimación de la VU requiere un enfoque sistemático, que involucra pruebas de estabilidad bajo condiciones que aceleran el deterioro. Factores como formulación, procesamiento, empaque y condiciones de almacenamiento deben considerarse para su prolongación (Hough & Garitta, 2012). La elección del modelo depende del tipo de producto, los recursos disponibles y la confiabilidad de los resultados. Posteriormente, deben definirse los límites de aceptabilidad, es decir, los parámetros de calidad por debajo de los cuales el producto deja de ser apto para el consumo. Entre los métodos utilizados están los estudios en tiempo real, que simulan condiciones de almacenamiento habituales, y las pruebas aceleradas, que emplean condiciones intensificadas (temperatura, luz, oxígeno) para predecir el comportamiento del producto a largo plazo. En estas últimas, es común el uso de modelos cinéticos y matemáticos (Manzocco et al., 2010).

El diseño experimental para estudios basados en pérdida de calidad sigue estos pasos (De Corato, 2020; Hough & Garitta, 2012):

- Evaluar sanidad microbiológica y parámetros de calidad de la formulación y procesos.
- Identificar reacciones químicas relevantes según ingredientes y proceso.
- Seleccionar el envase para el estudio.
- Determinar temperaturas de almacenamiento.
- Establecer tiempos de ensayo; si no se cuenta con un valor estimado de Q_{10} , deben aplicarse más de dos temperaturas.
- Definir ensayos y su frecuencia.
- Representar los datos gráficamente conforme se obtienen.

1.5.3. Cinéticas de deterioro

La cinética química permite describir la velocidad de las reacciones que afectan la calidad del alimento. Estas reacciones suelen ajustarse a modelos de orden 0, 1 o 2, cuya idoneidad se determina mediante el coeficiente de determinación R^2 (Villota & Hawkes, 2019).

El modelado cinético facilita el diseño de estrategias de conservación basadas en atributos cuantificables, y permite predecir y controlar los cambios durante el almacenamiento. Parámetros como la energía de activación (E_a), entalpía (ΔH), entropía (ΔS), constante de velocidad (k) y el coeficiente Q_{10} describen la influencia de la temperatura sobre la velocidad de deterioro (Ling et al., 2015).

1.6. Estudios de la vida útil en galletas

Las galletas presentan una alta demanda comercial, particularmente entre población infantil y juvenil. Este interés ha impulsado el desarrollo de estrategias orientadas a prolongar su VU, considerando tanto los factores de deterioro como el mantenimiento de sus propiedades organolépticas.

Diversas investigaciones han evaluado modificaciones en la formulación para mejorar su conservación. El uso de aceite de arroz como sustituto parcial de la manteca convencional ha mostrado efecto antioxidante, lo que permitió reducir los valores de ácido tiobarbitúrico y mitigar la rancidez del producto (Sharif et al., 2003).

En un estudio con galletas tipo amaretti, se analizó el cambio de textura durante 35 días de almacenamiento utilizando dos tipos de empaque: película de cloruro de polivinilo y papel aluminio, representando diferentes niveles de permeabilidad. A los 10 días, las galletas envasadas con cloruro de polivinilo presentaron aumento en la AW y una textura endurecida (Piga et al., 2005).

También se ha explorado la incorporación de ingredientes funcionales, como el polvo de betabel, evaluado durante 3 y 6 meses en condiciones ambientales controladas. Las galletas formuladas con este ingrediente mantuvieron niveles aceptables de humedad y AW, y mostraron mayor capacidad antioxidante atribuida a los polifenoles y flavonoides presentes. La adición de betabel permitió reducir la rancidez y prolongar la VU, además de mejorar el perfil nutricional del producto (Mitrevski et al., 2023).

En pruebas aceleradas aplicadas a galletas saladas, se evaluaron los efectos de temperatura (35, 45 y 55 °C) y humedad relativa (80 %) sobre parámetros como humedad, AW y dureza. La humedad se identificó como el atributo de calidad determinante, útil para definir estrategias de conservación. Estos estudios permiten caracterizar variables fisicoquímicas y sensoriales con impacto directo en la calidad durante el almacenamiento (Puma Isuiza et al., 2018).

1.7. Conclusión

Este capítulo revisó los antecedentes relacionados con el deterioro y la VU de las galletas de mantequilla, considerando mecanismos físicos, químicos y microbiológicos que afectan su estabilidad. Se abordaron atributos fisicoquímicos como humedad, AW y oxidación lipídica, así como las condiciones de almacenamiento, por su influencia directa en la calidad del producto.

También se analizaron el efecto de los ingredientes y los procesos de elaboración sobre la degradación del producto, destacando su relación con las propiedades finales. La literatura consultada indica que la VU puede extenderse mediante ajustes en la formulación, selección de materiales de empaque y adición de compuestos con actividad antioxidante.

Asimismo, se identificó la utilidad de métodos como las pruebas aceleradas y el modelado cinético en la predicción del deterioro y en la evaluación de la estabilidad durante el almacenamiento. Esta revisión permite establecer un marco teórico útil para el diseño experimental, facilitando la selección de variables críticas, la aplicación de metodologías adecuadas y la interpretación de resultados en estudios posteriores sobre la conservación de galletas de mantequilla.

1.8. Referencias

- Aher, R. R., Reddy, P. S., Bhunia, R. K., Flyckt, K. S., Shankhapal, A. R., Ojha, R., Everard, J. D., Wayne, L. L., Ruddy, B. M., Deonovic, B., Gupta, S. K., Sharma, K. K., & Bhatnagar-Mathur, P. (2022). Loss-of-function of triacylglycerol lipases are associated with low flour rancidity in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Frontiers in Plant Science*, 13, 962667. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.962667>
- Alagbaoso, S., Olawuni, I., Ibeabuchi, J., Afifah, A., & Onyeneke, E. (2019). Functional and sensory properties of biscuit produced from Peanut butter substituted with shortening. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 13(10), 2319–2402. <https://doi.org/10.9790/2402-1310023443>
- Alpers, T., Kerpes, R., Frioli, M., Nobis, A., Hoi, K. I., Bach, A., Jekle, M., & Becker, T. (2021). Impact of Storing Condition on Staling and Microbial Spoilage Behavior of Bread and Their Contribution to Prevent Food Waste. *Foods*, 10(1), 76. <https://doi.org/10.3390/foods10010076>
- Arepally, D., Reddy, R. S., Goswami, T. K., & Datta, A. K. (2020). Biscuit baking: A review. *LWT*, 131, 109726. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109726>
- Ayed, C., Lim, M., Nawaz, K., Macnaughtan, W., Sturrock, C. J., Hill, S. E., Linforth, R., & Fisk, I. D. (2021). The role of sodium chloride in the sensory and physico-chemical properties of sweet biscuits. *Food Chemistry: X*, 9, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100115>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Jr, A. J. F., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2020). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons.
- Cauvain, S., & Young, L. (2008). Bakery Food Manufacture and Quality: Water Control and Effects: Second Edition. In *Bakery Food Manufacture and Quality: Water Control and Effects: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781444301083>
- Chowdhury, K., Khan, S., Karim, R., Obaid, M., & Hasan, G. (2012). Quality and Shelf-Life Evaluation of Packaged Biscuits Marketed in Bangladesh. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 47(1), 29–42. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i1.10717>
- Christopoulos, M. V., & Tsantili, E. (2015). Oil composition in stored walnut cultivars—quality and nutritional value. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(3), 338–348. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400082>
- Collingham, L. (2020). *The Biscuit: The History of a Very British Indulgence*. Random House.
- Davidson, I. (2023). *Biscuit Baking Technology: Processing and Engineering Manual*. Elsevier.
- De Corato, U. (2020). Improving the shelf-life and quality of fresh and minimally-processed fruits and vegetables for a modern food industry: A comprehensive critical review from the traditional technologies into the most promising advancements. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(6), 940–975. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1553025>
- Devi, A., & Khatkar, B. S. (2016). Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3633–3641. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2355-0>

- Dhal, S., Anis, A., Shaikh, H. M., Alhamidi, A., & Pal, K. (2023). Effect of Mixing Time on Properties of Whole Wheat Flour-Based Cookie Doughs and Cookies. *Foods*, 12(5), 941. <https://doi.org/10.3390/foods12050941>
- Dirección General de Normas, & Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (1994). *NMX-F-006-1983 "Alimentos - Galletas"*.
- Duru, C. E., Duru, I. A., Nweze, C. A., & Ukiwe, L. (2016). Dependence of Storage Material Surfaces on the Oxidative Rancidity Kinetics of Peanut Oil. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 65, 27–31. <https://doi.org/10.56431/p-etpely>
- Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Lozano, J. (2016). Electronic nose as an innovative measurement system for the quality assurance and control of bakery products: A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(4), 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.06.001>
- Giannou, V., Lebesi, D., & Tzia, C. (2014). Packaging and Shelf-Life Prediction of Bakery Products. In W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, & N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products Science and Technology* (1st ed., pp. 355–371). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch20>
- Heiniö, R.-L. (2014). Sensory Attributes of Bakery Products. In W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, & N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products Science and Technology* (1st ed., pp. 391–407). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch22>
- Hill, S. E., & Mamat, H. (2018). Structural and functional properties of major ingredients of biscuit. *International Food Research Journal (Malaysia)*.
- Hough, G., & Garitta, L. (2012). Methodology for sensory shelf-life estimation: A review. *Journal of Sensory Studies*, 27(3), 137–147. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2012.00383.x>
- Kilcast, D., & Subramaniam, P. (2000). *The Stability and Shelf-Life of Food*. Elsevier Science.
- Klunklin, W., Savage, G., & Department of Wine, Food and Molecular Biosciences, Lincoln University, Lincoln 7647, Christchurch, New Zealand. (2018). Biscuits: A Substitution of Wheat Flour with Purple Rice Flour. *Advances in Food Science and Engineering*, 2(3). <https://doi.org/10.22606/afse.2018.23001>
- Li, B., Chen, H., Sun, D., Deng, B., Xu, B., Dong, Y., Li, J., Wang, F., & Liu, Y. (2016). Effect of flameless catalytic infrared treatment on rancidity and bioactive compounds in wheat germ oil. *RSC Advances*, 6(43), 37265–37273. <https://doi.org/10.1039/C5RA23335F>
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., & Wang, S. (2015). Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343–358. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1398-3>
- Manzocco, L., Calligaris, S., & Nicoli, M. C. (2010). Methods for food shelf life determination and prediction. In *Oxidation in Foods and Beverages and Antioxidant Applications* (pp. 196–222). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090447.1.196>
- Martínez, M., Barrionuevo, G., Nepote, V., Grosso, N., & Maestri, D. (2011). Sensory characterisation and oxidative stability of walnut oil. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(6), 1276–1281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02618.x>
- Misra, N. N., & Tiwari, B. K. (2014). Biscuits. In W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, & N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products Science and Technology* (1st ed., pp. 585–601). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch33>
- Mitreviski, J., Pantelić, N., Dodevska, M. S., Kojić, J. S., Vulić, J. J., Zlatanović, S., Gorjanović, S., Laličić-Petronijević, J., Marjanović, S., & Antić, V. V. (2023). Effect of Beetroot Powder Incorporation on Functional Properties and Shelf Life of Biscuits. *Foods*, 12(2), 322. <https://doi.org/10.3390/foods12020322>

- Pande, H., Kapse, S., Krishnan, V., Kausley, S., Satyavathi, C. T., & Rai, B. (2024). Prediction of Shelf Life of Pearl Millet Flour Based on Rancidity and Nutritional Indicators Using a Long Short-Term Memory Network Model. *ACS Food Science & Technology*, 4(3), 786–795. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00005>
- Piga, A., Catzeddu, P., Farris, S., Roggio, T., Sanguinetti, A., & Scano, E. (2005). Texture evolution of “Amaretti” cookies during storage. *European Food Research and Technology*, 221(3-4), 387–391. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1185-5>
- Pirzad, F., Tahanian, H., Aghdam, M. S., & Ebrahimzadeh, A. (2019). Influence of Gum Arabic Enriched with GABA Coating on Oxidative Damage of Walnut Kernels. *Food Technology and Biotechnology*, 57(4), 554–560. <https://doi.org/10.17113/ftb.57.04.19.6380>
- Puma Isuiza, G. G., Liñan Perez, J. F., Coavoy Sánchez, I., Coronado Olano, J., Salas Valerio, W. F., & Vargas Delgado, L. F. (2018). Vida en anaquel de galletas saladas utilizando pruebas aceleradas. *Anales Científicos*, 79(1), 218. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1166>
- Shahidi, F., & John, J. A. (2013). Oxidative rancidity in nuts. In *Improving the Safety and Quality of Nuts* (pp. 198–229). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097484.2.198>
- Shao, Y., Chen, H., Lin, H., Feng, H., Gong, J., Cao, G., Hong, W., Yao, Y., Zou, H., & Yan, Y. (2022). Exploration on Varying Patterns of Morphological Features and Quality of Armeniacae Semen Amarum in Rancid Process Based on Colorimeter, Electronic Nose, and GC/MS Coupled With Human Panel. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 599979. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.599979>
- Sharif, M., BUTT, M., Anjum, F., Nasir, M., MINHAS, R., & QAYYUM, M. (2003). *Extension of Cookies Shelf Life by Using Rice Bran Oil*.
- Sievert, D., Hoseney, R. C., & Delcour, J. A. (2007). Bread and Other Baked Products. In Wiley-VCH (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (1st ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/14356007.a04_331.pub2
- Siracusa, V. (2012). Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. *International Journal of Polymer Science*, 2012, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2012/302029>
- Smith, J. P., Daifas, D. P., El-Khoury, W., Koukoutsis, J., & El-Khoury, A. (2004). Shelf Life and Safety Concerns of Bakery Products—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(1), 19–55. <https://doi.org/10.1080/10408690490263774>
- Sogabe, T., Kobayashi, R., Thanatuksorn, P., Suzuki, T., & Kawai, K. (2021). Physical and structural characteristics of starch-based and conventional cookies: Water sorption, mechanical glass transition, and texture properties of their crust and crumb. *Journal of Texture Studies*, 52(3), 347–357. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12585>
- Sykes, G. B., & Davidson, I. (2020). *Biscuit, Cookie and Cracker Process and Recipes*. Academic Press.
- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2007). Effects of Water Activity (a_w) on Microbial Stability: As a Hurdle in Food Preservation. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods* (1st ed., pp. 239–271). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470376454.ch10>
- Velasco, J., Dobarganes, C., & Márquez-Ruiz, G. (2010). Oxidative rancidity in foods and food quality. In *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages* (pp. 3–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845699260.1.3>
- Villota, R., & Hawkes, J. G. (2019). Reaction kinetics in food systems. In *Handbook of food engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Vivienne, C., & Amrinola, W. (2024). Application of hesperidin crude extract from Siamese orange peel as an alternative natural antioxidant in the butter making process. *IOP Conference Series*:

-
- Earth and Environmental Science*, 1324(1), 012121. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1324/1/012121>
- Wang, R., & Hartel, R. W. (2021). Understanding stickiness in sugar-rich food systems: A review of mechanisms, analyses, and solutions of adhesion. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5901–5937. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12833>
- 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>
- Wani, S. H., Gull, A., Allaie, F., & Safapuri, T. A. (2015). Effects of incorporation of whey protein concentrate on physicochemical, texture, and microbial evaluation of developed cookies. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1092406. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1092406>
- Zoulias, E. I., Oreopoulou, V., & Kounalaki, E. (2002). Effect of fat and sugar replacement on cookie properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(14), 1637–1644. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1230>

CAPÍTULO 2

Estudio de vida útil de galletas

Resumen

Las galletas de mantequilla son productos con gran popularidad, lo que justifica la necesidad de extender su vida útil. Factores como la humedad, la oxidación lipídica, entre otros pueden ser precursores del deterioro de este alimento. Debido a lo anterior el presente capítulo se enfocó en analizar la evolución de los atributos de calidad de las galletas de mantequilla (actividad de agua, peso, acidez, pH y color en sistema CIE-L*a*b*) durante el almacenamiento en diferentes condiciones de 20, 30 y 40°C), mediante el uso de modelos cinéticos y estudios termodinámicos que facilitaron la predicción del deterioro. Los hallazgos principales mostraron que el peso fue el atributo con mejor ajuste en los tres modelos cinéticos utilizados con respecto a su valor R^2 , además entre estos el modelo de segundo orden a 40°C presentó los mejores ajustes. Posteriormente utilizando el peso como referencia al modelo de primer orden a 20°C se determinó en el análisis termodinámico que la E_a fue equivalente a -47.511 kJ/mol, indicando un proceso exotérmico. Mientras que el valor Q_{10} fue de 0.547. Por último, la vida útil estimada fue de 109 días a 25°C, reduciéndose a 70 días a 40°C. El estudio demostró que el control de las condiciones de almacenamiento de las galletas de mantequilla así como el monitoreo de sus parámetros de calidad como el peso es de gran importancia para la extensión de la vida útil. El uso y estudio de modelos cinéticos en la predicción de vida útil comprenden hallazgos relevantes para la industria alimentaria, permitiendo mejorar las formulaciones y condiciones de almacenamiento.

Lista de acrónimos

ANOVA	análisis de la varianza	20
AW	Actividad de agua	4
CIE-L*a*b*	Commission Internationale de l'Éclairage – Luminancia, Verde-Rojo, Azul-Amarillo	17
Ea	energía de activación	38
pH	Potencial de Hidrógeno	5
PAVU	pruebas aceleradas de vida útil	16
R^2	Coefficiente de determinación	35

VU	Vida útil	4
----	-----------	---

2.1. Introducción

Las galletas, de acuerdo con la NMX-F-006-1983, son productos elaborados a partir de harinas de cereales, azúcares, grasas, agentes leudantes y sal yodatada, a los que pueden añadirse otros ingredientes y aditivos alimentarios, y que se someten a procesos de amasado, moldeado y horneado (Dirección General de Normas & Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, 1994). Su composición no solo determina características sensoriales como textura, sabor y color, sino que también afecta parámetros fisicoquímicos vinculados con su Vida útil (VU), como la humedad, el Potencial de Hidrógeno (pH), la acidez y la Actividad de agua (AW) (Zoulias et al., 2002).

La VU de las galletas de mantequilla está condicionada por factores como el contenido de humedad, la oxidación lipídica y el tipo de envasado. Una AW inferior a 0.65 inhibe eficazmente el crecimiento microbiano y asegura la estabilidad microbiológica del producto (Patrignani et al., 2014). El uso de grasas insaturadas, como la mantequilla, incrementa la susceptibilidad a la oxidación, lo que compromete el perfil sensorial y nutricional de las galletas (Klunklin et al., 2018). Este proceso puede atenuarse mediante antioxidantes naturales y estrategias de envasado que limiten la exposición al oxígeno y la luz (Hu et al., 2022; Kanatt, 2020).

Para estudiar la VU, se han empleado tanto metodologías de tiempo real como pruebas aceleradas de vida útil (PAVU), las cuales permiten predecir la evolución de atributos bajo condiciones que aceleran el deterioro. Estas estrategias incluyen la evaluación de propiedades fisicoquímicas (color, acidez, textura, etc.), la determinación de índices de oxidación, y la realización de análisis sensoriales (Calligaris et al., 2007; Lee & Ju, 2024; Wei et al., 2024). La elección entre estudios acelerados o de tiempo real depende de la naturaleza del alimento, los recursos disponibles y los objetivos del análisis (Nicoli, 2012).

El modelado cinético constituye una herramienta útil para describir matemáticamente la degradación de calidad durante el almacenamiento. Modelos de orden cero, primer orden y segundo orden se utilizan para representar distintos mecanismos de deterioro, desde procesos independientes de la concentración del reactivo hasta interacciones más complejas entre componentes (Han et al., 2022; Yilmaz & Karadeniz, 2014; Zheng & Lu, 2011). Aunque los modelos más complejos proporcionan información detallada, requieren datos experimentales extensos y pueden dificultar la interpretación (Bolea et al., 2019; Zambrano et al., 2023).

Estos modelos permiten generar predicciones confiables sobre la evolución de parámetros de calidad al combinarse con herramientas estadísticas como la regresión de mínimos cuadrados ordinarios (Zhang et al., 2021). En paralelo, los estudios termodinámicos permiten estimar parámetros como la energía de activación, entalpía, entropía y energía libre de Gibbs, fundamentales para caracterizar la estabilidad del alimento (Tapia-Ignacio & Jaguey-Hernández, 2023).

La AW desempeña un papel determinante en la calidad e inocuidad de las galletas, ya que influye tanto en la microbiología como en las propiedades sensoriales. Valores elevados pueden favorecer la pérdida de textura y la disminución de la palatabilidad (Arimi et al., 2010; Roudaut, 2020). La temperatura de almacenamiento también afecta la AW, al influir en la velocidad de transferencia de humedad y en la difusividad del agua dentro de la matriz del producto (Chu et al., 2013; Guillard et al., 2004; Hao et al., 2017). En temperaturas elevadas, estos efectos se intensifican, favoreciendo la pérdida de humedad y procesos como la retrogradación del almidón, que contribuye al endurecimiento

progresivo del producto (Anuradha et al., 2010; Morais et al., 2018).

Además, temperaturas altas durante el horneado modifican la textura al aumentar la dureza, favorecen reacciones de Maillard y caramelización que afectan la microestructura, y pueden promover la formación de compuestos no deseables como la acrilamida (Hussein et al., 2020; Keramat et al., 2011; Nandeesh et al., 2011). También influyen en fenómenos como la gelatinización del almidón y la descomposición de agentes leudantes, que impactan en la estructura final de la galleta (Conforti et al., 2012; Lo Faro et al., 2022).

En productos como las galletas, cuyo contenido de grasa las hace particularmente vulnerables a la oxidación, los estudios de VU acelerados permiten obtener información relevante bajo condiciones controladas de temperatura, como se ha demostrado en investigaciones con almacenamiento a 20, 38 y 50 °C (Galić et al., 2009; Gebreselassie & Clifford, 2016).

En este contexto, el objetivo de este capítulo fue analizar la evolución de los atributos fisicoquímicos de calidad de las galletas de mantequilla —incluyendo AW, pérdida de peso, acidez titulable, pH y espacio de color Commission Internationale de l'Éclairage – Luminancia, Verde-Rojo, Azul-Amarillo (CIE-L*a*b*)— durante su almacenamiento a diferentes temperaturas controladas, con el fin de identificar los atributos críticos que determinan su VU. Se aplicaron análisis estadísticos para evaluar la influencia del tiempo y la temperatura sobre dichos parámetros, se ajustaron modelos cinéticos de orden 0, 1 y 2 para describir su comportamiento, y se realizó un análisis termodinámico para comprender la estabilidad del producto bajo distintas condiciones de almacenamiento.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Muestra

A las muestras de galletas de mantequilla con glaseado fueron proporcionadas por la empresa *Chocolatería y galletería artesanal Chocolate D'10* ubicada en el estado de Hidalgo. Las muestras se encontraban empaquetadas de manera individual en polipropileno, en la Figura 2.1 se ilustran las muestras utilizadas.

2.2.2. Preparación de la muestra

Las muestras de galletas de mantequilla se les retiró el glaseado con ayuda de un bisturí, después el glaseado y la base de la galleta se molieron y se colocaron en frascos de vidrio con tapa rotulados de acuerdo con la temperatura.

2.2.3. Almacenamiento

Las galletas de mantequilla con glaseado se almacenaron a tres temperaturas (20°C, 30°C y 40°C); para las dos últimas temperaturas fue necesario utilizar estufas *Thermo Scientific*. Las muestras permanecieron bajo esas temperaturas por un período de 28 días. Dos veces por semana se realizaban las determinaciones de los parámetros de deterioro seleccionados: acidez total, pH, AW, color y pérdida de peso, en la sección A.1 “Condiciones de experimentación” se presenta una tabla especificando los periodos de medición. Las metodologías utilizadas se describen a continuación.

Las temperaturas seleccionadas en el estudio se consideraron con respecto a otros estudios similares en donde se observó que a mayores temperaturas, el deterioro de los parámetros de calidad se aceleraba, lo cual es útil en el propósito de las pruebas aceleradas de VU (Salas Pastor et al., 2024).



Figura 2.1: Muestras de galletas proporcionadas para el estudio de VU.

2.2.4. Estudio de vida útil

2.2.5. Peso

Para la determinación de la pérdida de peso se utilizó una balanza digital (Ohaus). Las muestras de galletas de mantequilla, almacenadas a las diferentes temperaturas, fueron pesadas cada 3 días por un período de 1 mes para promediar los resultados al final del estudio. El estudio de este atributo se basó en trabajos similares ([Phimolsiripol et al., 2011](#)).

2.2.6. pH

La determinación de pH adaptó el procedimiento general de estudios similares de tal manera que se adaptara a las muestras y necesidades de la investigación ([Maldonado & Pacheco de Delahaye, 2000](#)). Para la calibración del potenciómetro Thermo SCIENTIFIC Orion A111, se limpió el electrodo con abundante agua destilada, enseguida se introdujo en la solución tampón de pH 4, se esperó hasta la estabilización de la lectura, se retiró el electrodo de la disolución y se lavó con abundante agua destilada. A continuación, se repitió el procedimiento con las soluciones tampón restantes (pH 7 y pH 10).

Para medir el pH de la muestra, se pesaron 2.5 g de galleta previamente molida y se colocaron en un vaso precipitado de 5 mL, se le adicionó 2 mL de agua y se homogeneizó. Se prosiguió a realizar la determinación de pH con ayuda del potenciómetro previamente calibrado. La determinación se realizó por triplicado para cada una de las temperaturas de estudio.

2.2.7. Índice de acidez

Para la determinación de acidez total en la muestra se adaptaron métodos de estudios similares ([Oyola Coral & Padilla Fabian, 2021](#)). Para la determinación se pesó 1.2 g de la muestra de galleta (previamente molida) y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 150 mL, se adicionó 5 mL de agua, se mezcló y enseguida se agregó de 2-3 gotas de fenolftaleína. Finalmente se tituló con NaOH al 0.1 N y se registró el volumen gastado, utilizando la Ecuación 2.1. La determinación se realizó por triplicado para cada temperatura de estudio.

$$ATT = \frac{A * B * C}{D} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

- A: NaOH gastado (mL).
- B: Normalidad de la solución de NaOH.
- C: miliequivalentes del ácido predominante en la muestra (ácido láctico = 0.090).
- D: muestra a analizar(g).

2.2.8. Color

Para la determinación de color con base en parámetros CIE-L*a*b *, se adaptaron metodologías descritas en otros estudios ([Ghnimi et al., 2023](#)). Se utilizó un colorímetro para el análisis de color en las muestras, fue necesario separar la cobertura de la base de la galleta. Ambas fueron molidas por separado. Posteriormente, se colocaron 10 g de la muestra en bolsas de celofán transparentes y se realizó la determinación con ayuda del colorímetro. La determinación se llevó a cabo para cada una de las temperaturas de estudio por triplicado.

2.2.9. Aw

Antes de la determinación, se realizó una calibración al equipo Aqualab con agua. Cuando el equipo marque valores entre 0.998- 1.003 indica que el equipo está correctamente calibrado; después de la calibración del equipo se colocó en una de las celdas la muestra molida y se esperó hasta la obtención del resultado obtenido por el equipo. Se repitió el procedimiento para cada una de las temperaturas de estudio la determinación se realizó por triplicado. El procedimiento fue adaptado de trabajos similares (Romani et al., 2015).

2.2.10. Análisis cinético

El análisis de los atributos fisicoquímicos se llevó a cabo con diversos modelos cinéticos, los cuales describieron el deterioro de las muestras con respecto a las condiciones experimentales establecidas en el experimento. Las ecuaciones empleadas en los modelos se presentan a continuación en la Tabla 2.1 (Contreras-López et al., 2022; Gálvez-Toledo et al., 2023; García-Curiel et al., 2023).

Los parámetros cinéticos y termodinámicos como la energía de activación, entalpía, energía libre de Gibbs y entropía son de gran importancia para el diseño y optimización de procesos (Singh et al., 2020).

Tabla 2.1: Ecuaciones para cinéticas empleadas para la descripción del deterioro. Donde las constantes de velocidad de reacción se representan con (k), los parámetros críticos de calidad con (Q) y el tiempo(t).

Orden de reacción	Ecuación diferencial	Ecuación integrada	Representación gráfica
0	$v = k$	$Q = Q_0 \pm kt$	$Q(t)$ vs t
1	$v = kQ$	$\ln(Q) = \ln Q_0 \pm kt$	$\ln(Q(t))$ vs t
2	$v = kQ^2$	$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} \pm kt$	$\frac{1}{Q} (t)$ vs t

2.3. Análisis de resultados

Fue realizado un análisis de la varianza (ANOVA) de dos vías y una prueba HSD de Tukey post-hoc ($p < 0.05$) para evaluar el efecto del tiempo y la temperatura de almacenamiento sobre los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de las muestras de galletas de mantequilla analizadas. Posteriormente fue realizado un ANOVA de una vía y una prueba HSD de Tukey post-hoc ($p < 0.05$) para identificar diferencias significativas en el tiempo de almacenamiento de este producto, durante la prueba. Los resultados se encuentran disponibles en la sección “A: Material Suplementario”. Todas las pruebas estadísticas fueron realizadas con el lenguaje de programación R (4.1.2 (2021-11-01)) y utilizando el entorno de desarrollo integrado RStudio (2023.12.1+403).

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento

2.4.1.1. Actividad de agua

La Tabla A.2 de ANOVA presenta un análisis de los efectos de la temperatura (A), el tiempo (B) y su interacción (AB) sobre la AW. Se determinó utilizando el valor $p < 0.05$ de significancia que los tres parámetros, la Temperatura (A), el Tiempo (B) y la interacción de estos (AB), tenían una influencia significativa en las variaciones de AW al tener los tres un valor $p = < 2 \times 10^{-16}$. La influencia de la temperatura se puede observar gráficamente en la figura 2.2, donde las cajas de bigotes nos muestran los diferentes rangos de valores que se llegan a abarcar dependiendo de la temperatura, además permitiendo analizar que los valores disminuyen a mayor temperatura. Mientras que en la figura 2.3 podemos observar que a medida que el tiempo avanza, los valores de AW también lo hacen, esto a las tres temperaturas consideradas.

La AW de las galletas normalmente se estima en 0.5 cuando están frescas. Estudios en galletas tipo *Amaretti*, han mostrado que suele haber una disminución en los valores de AW a lo largo del almacenamiento, se ha planteado que esto se pueda deber a la redistribución del agua, lo que además de promover la cristalización del azúcar presente, logrando que en el centro de la galleta haya una disminución de AW mientras que, en la corteza de esta, aumentan los valores. Los estudios en este caso se hicieron a temperatura ambiente en un periodo de 35 días, utilizando diferentes empaques, lo cual según el estudio también influyó tanto en la AW como en la humedad del producto, sugiriendo que además del tiempo y la temperatura, se pueden considerar factores como el empaque para mejorar la comprensión de la VU en galletas (Piga et al., 2005).

2.4.1.2. Peso

En la Tabla A.3 correspondiente al ANOVA de la variación de peso, se muestran los resultados de las interacciones de los parámetros de temperatura (A), el tiempo (B) y su interacción (AB) sobre el atributo antes mencionado. Se consideró que el efecto de la temperatura fue influyente al tener un valor $p = 1.5 \times 10^{-6}$ que es considerablemente menor al valor de significancia $p < 0.05$, esto no ocurre para el parámetro de Tiempo y la combinación de los dos parámetros anteriores al tener valores de $p = 0.586$ y $p = 0.868$, mayores al valor de significancia del modelo.

En la Figura 2.4 es posible observar los diferentes rangos de variación de peso a medida que cambia la temperatura, por otra parte, al observar los gráficos presentados en la Figura 2.5 que presentan la comparación del paso del tiempo y la variación de peso, se nota una variabilidad casi nula a las tres temperaturas, aunque hay una leve inclinación a que los valores disminuyan, no es lo suficientemente evidente para considerarse, esto respaldado por los valores p .

En productos como pan, galletas o similares, un problema común es la pérdida de peso, usualmente explicada por la evaporación del agua contenida en estos productos, varios factores pueden influir en este fenómeno, como la humedad relativa del ambiente, la temperatura a la que se almacena un producto y aunque no es un efecto directo, el paso del tiempo refleja como los efectos de la pérdida de peso se incrementan. En estudios de este tipo de productos, bajo condiciones de congelación controladas, se logró identificar que las fluctuaciones de temperatura afectaban más a la pérdida de peso, sobre todo si estas ocurrían en un periodo largo de tiempo (Phimolsiripol et al., 2011).

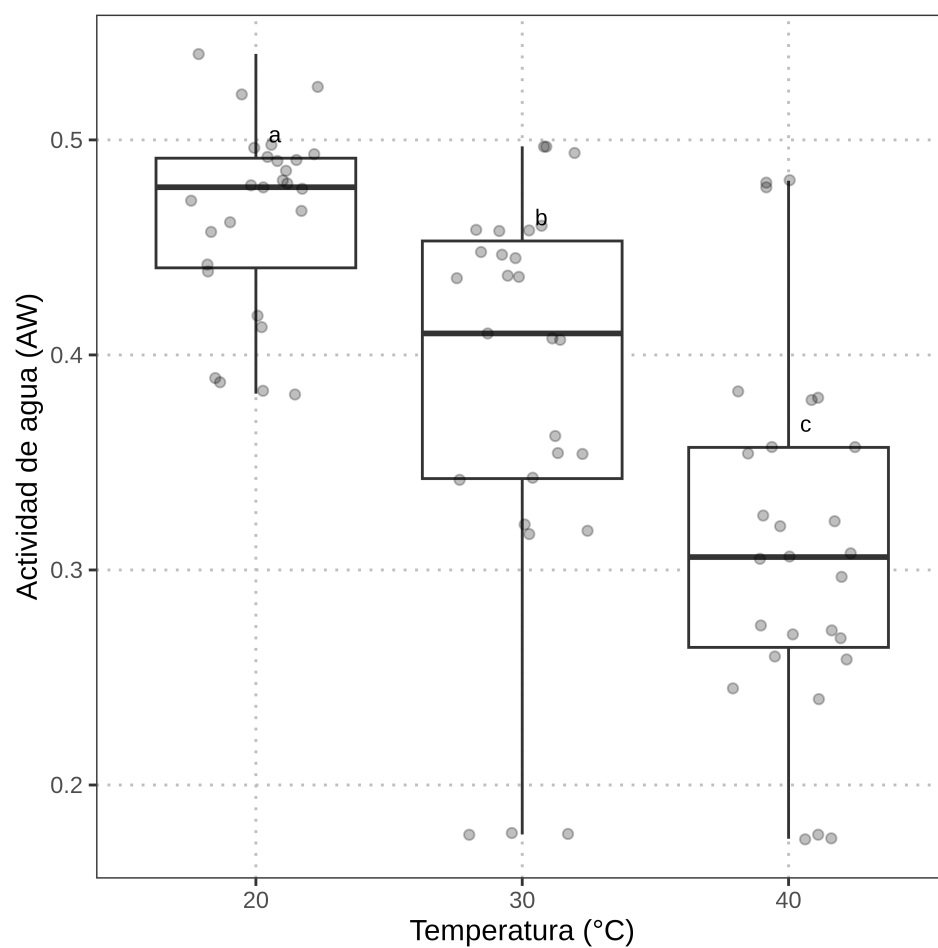


Figura 2.2: Valores de AW obtenidos en diversas condiciones de estudio de la VU de las galletas. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

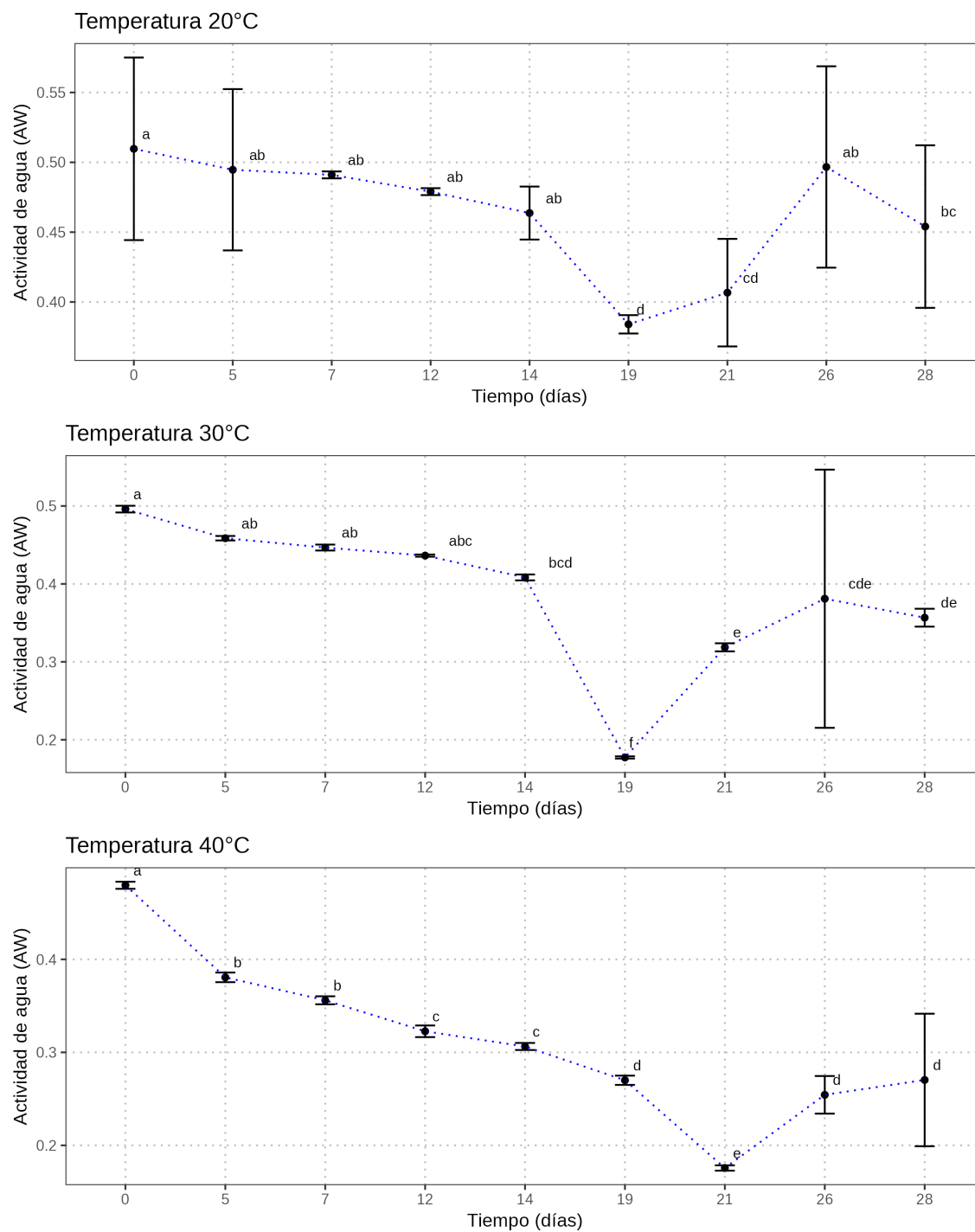


Figura 2.3: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

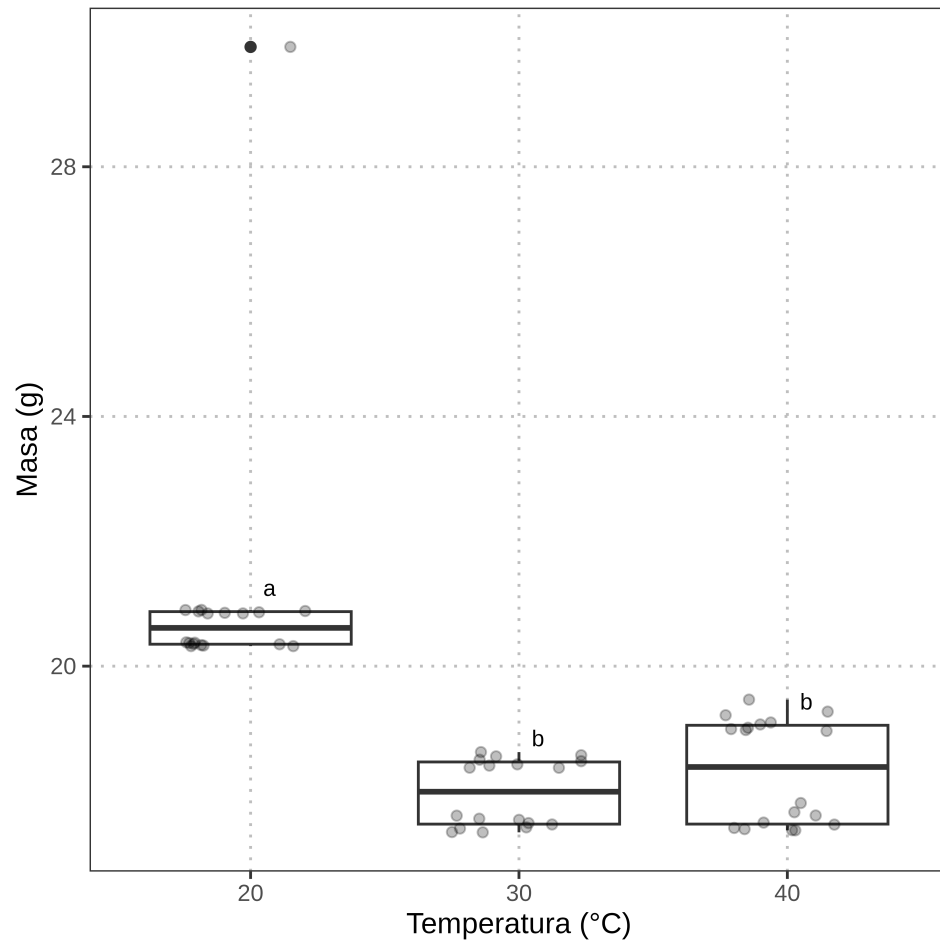


Figura 2.4: Valores de cambio en el peso (g) de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

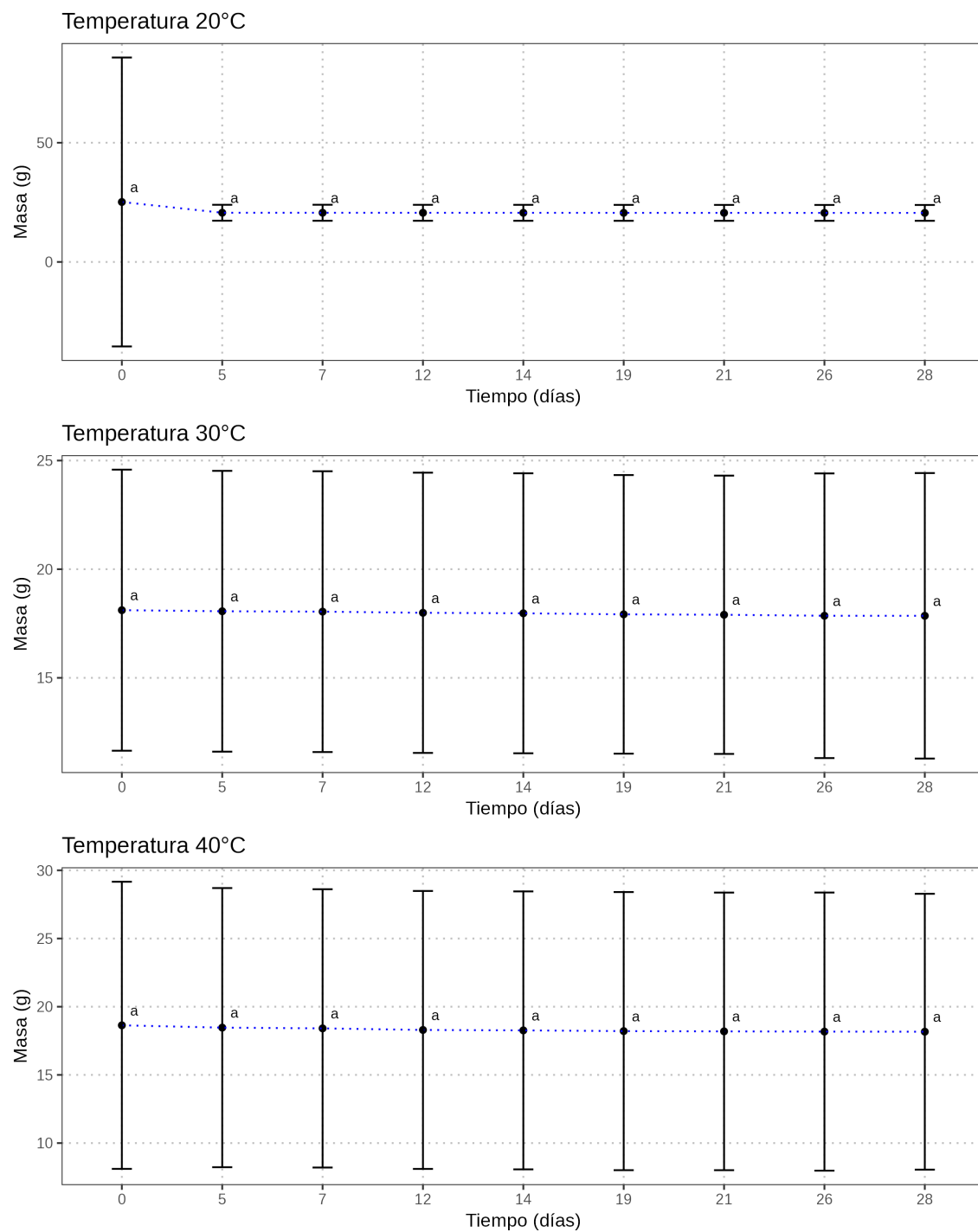


Figura 2.5: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo del peso de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

2.4.1.3. Acidez titulable total

Para el ANOVA de acidez, cuyos resultados se presentan en la Tabla A.4. Se determinó que los tres parámetros tenían una influencia significativa sobre las variaciones de acidez durante el almacenamiento, esto debido a sus valores p . Para la Temperatura (A), el Tiempo (B) y su interacción (AB) se estimó un valor de $p = < 2 \times 10^{-16}$, que fue menor al valor $p < 0.05$ de significancia del modelo.

En la Figura 2.6 se puede observar la variación en rangos de valores a diferentes temperaturas, esto es más evidente a 40°C, donde también se puede resaltar que los valores son menores que a temperaturas más bajas. Mientras que en la Figura 2.7 se observa la evolución de la acidez en el tiempo, es posible observar estas variaciones claramente en las tres temperaturas, lo que facilita la interpretación de las variaciones de la acidez.

La acidez de las galletas y productos similares suele verse influenciada en gran manera por las características de sus ingredientes, la harina siendo su ingrediente principal, la presencia de fosfatos y ácidos del trigo o semilla serán clave (Oyola Coral & Padilla Fabian, 2021). En un estudio realizado sobre barquillos tipo obleas, se determinó que en un periodo de 16 días, de temperaturas de 15 hasta 55°C, la acidez tendía a aumentar con el paso del tiempo, es especial a temperaturas más elevadas en modelos de orden cero y uno, no obstante, se determinó en ese caso que a segundo orden había un mejor ajuste, en este caso, los datos graficados tendían a disminuir, dicha relación de una disminución gráfica con respecto a la acidez también se observó en los cálculos de la constante k y cálculos de VU, logrando dar contexto del comportamiento de la acidez en este tipo de productos (Coronel, 2016).

2.4.2. Parámetros de color

Los parámetros $L^*a^*b^*$ pueden ser de gran ayuda para identificar el estado de calidad de un producto, adiciones a la formulación o cubiertas externas pueden afectar los parámetros, por lo que es de gran importancia saber con que se va a trabajar y las características del producto. Tal es el caso de unas galletas en las que se sustituyó la manteca por aceite de girasol, dicha adición modificó los parámetros iniciales de los valores de color, en estas muestras se observó que había decrecimiento en las tonalidades rojas a medida que avanzaba el tiempo de almacenamiento, por otra parte, se determinó que los valores de tonalidad amarillas y luminosidad incrementaron, las principales diferencias después de 5 meses se observaron en los valores a^* . A pesar de que se consideró la temperatura para el estudio, se determinó que la exposición al oxígeno paralelo a la luz, pudo contribuir a la variación de color de la galleta, estudios que presentan la variedad de formulaciones y parámetros de estudio, nos permiten afirmar que estos valores tendrán variaciones durante el almacenamiento de las galletas (Pajin et al., 2011).

2.4.2.1. L^*

En cuanto al análisis de color, para el parámetro L^* (Tabla A.5) se consideró que los valores de Temperatura (A) con valor $p = < 2 \times 10^{-16}$ y Tiempo (B) con valor $p = 1.62 \times 10^{-11}$ indicaban significancia, de igual manera aunque con menor influencia, la interacción de ambos parámetros (AB) fue significativa al tener un valor $p = 0.00193$.

En el gráfico de caja de bigotes, presentado en la Figura 2.8 se puede observar la variación de rangos y valores, en especial a la temperatura de 40°C, que muestra mayor diferencia entre el conjunto total de datos. Se observa un comportamiento similar en la Figura 2.9 donde a 40°C existe mayor

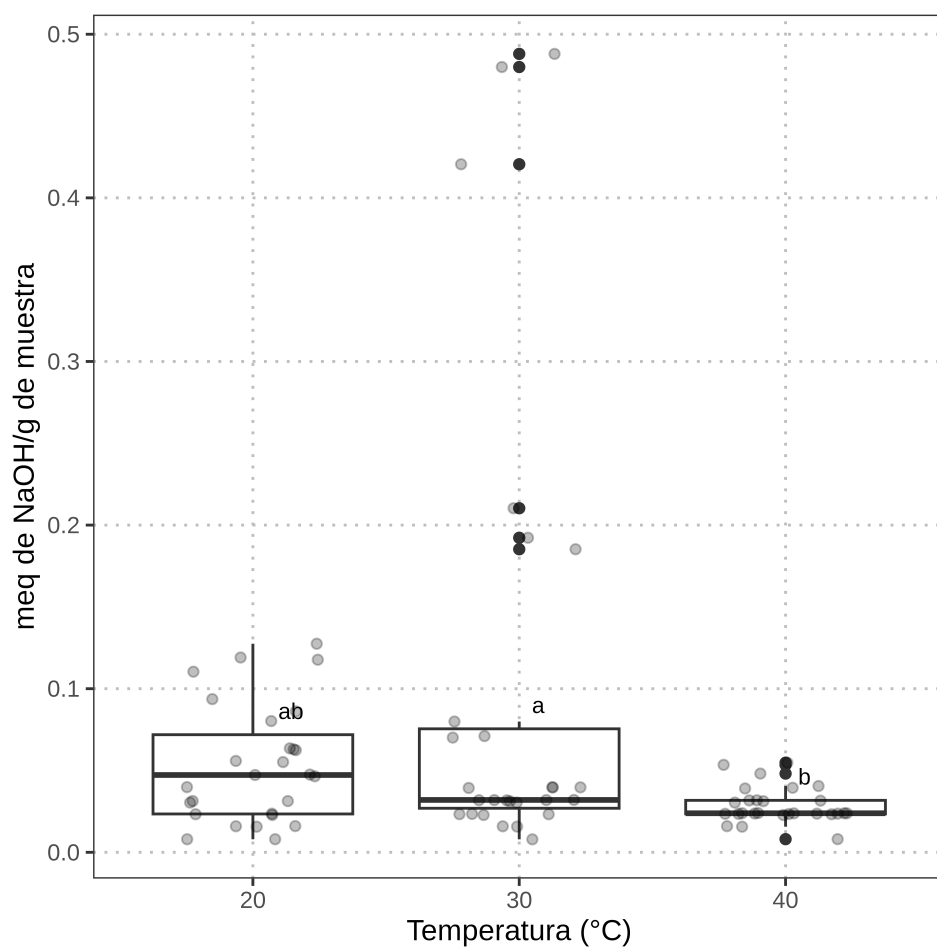


Figura 2.6: Valores de cambio en la acidez titulable de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

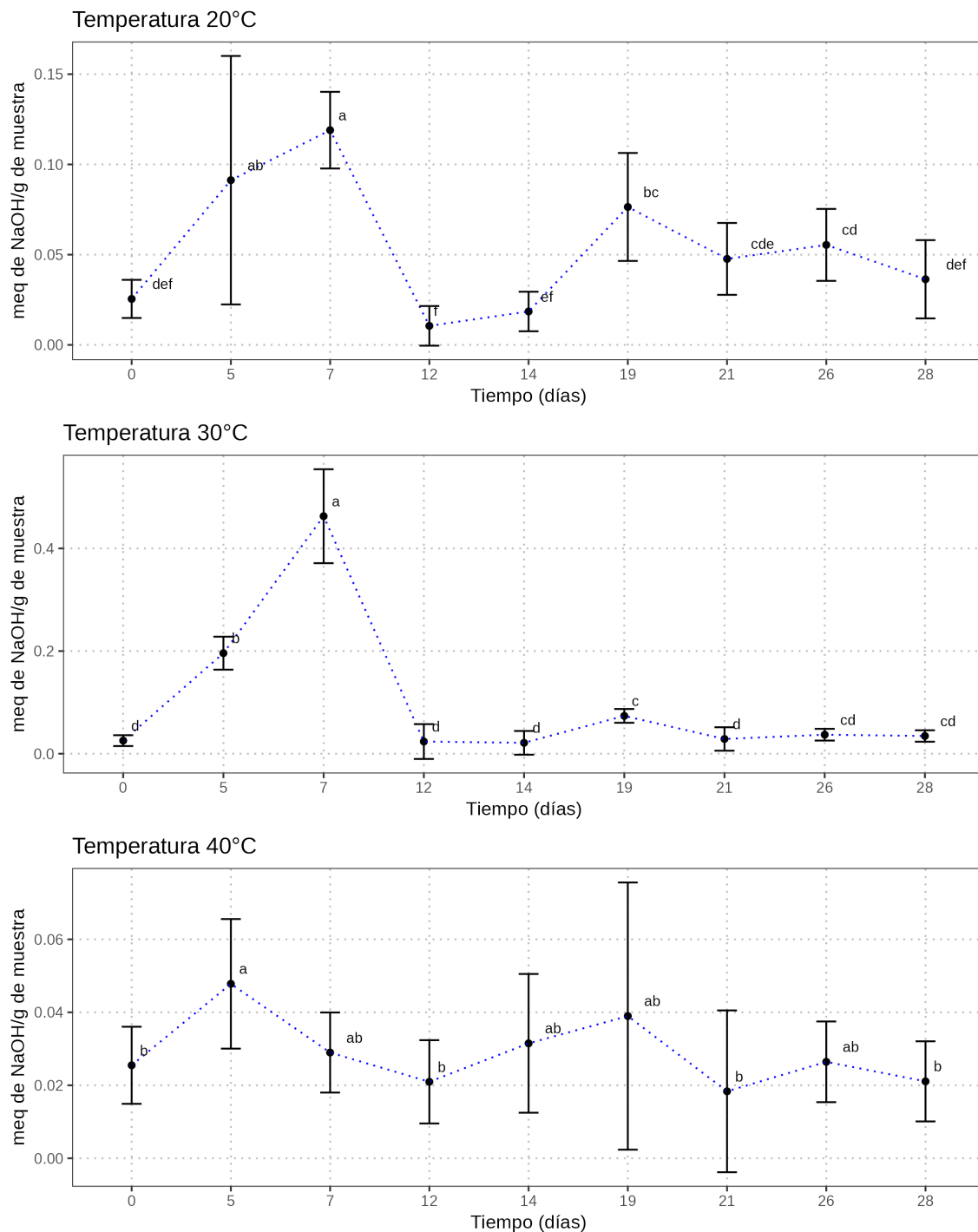


Figura 2.7: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la acidez titulable de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

variación en los valores de L^* .

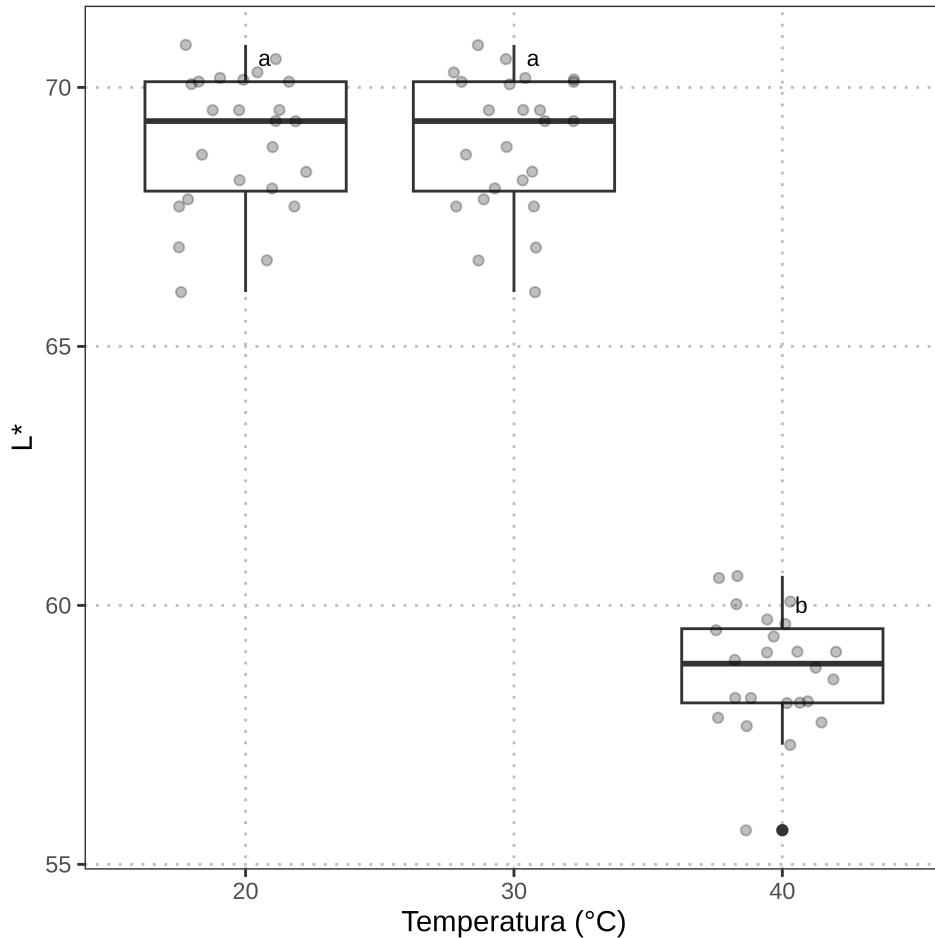


Figura 2.8: Valores de cambio en el L^* de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

2.4.2.2. a^*

Utilizando los valores de p presentados en la Tabla A.6 se determinó que los factores que influían significativamente en las variaciones del valor de color a^* fueron la Temperatura (A) con un valor $p = 1.03 \times 10^{-10}$ y el Tiempo (B) con un valor $p = 6.67 \times 10^{-12}$, ambos considerados bajos ante el parámetro del modelo $p < 0.05$; sin embargo, la interacción entre ambos factores no pareció tener influencia sobre el atributo, debido a que su valor fue $p = 0.225$.

En la Figura 2.10 se muestra la distribución de datos mediante cajas de bigotes, en este caso se puede observar más variación entre los datos a 20°C y las demás temperaturas, se destaca que a

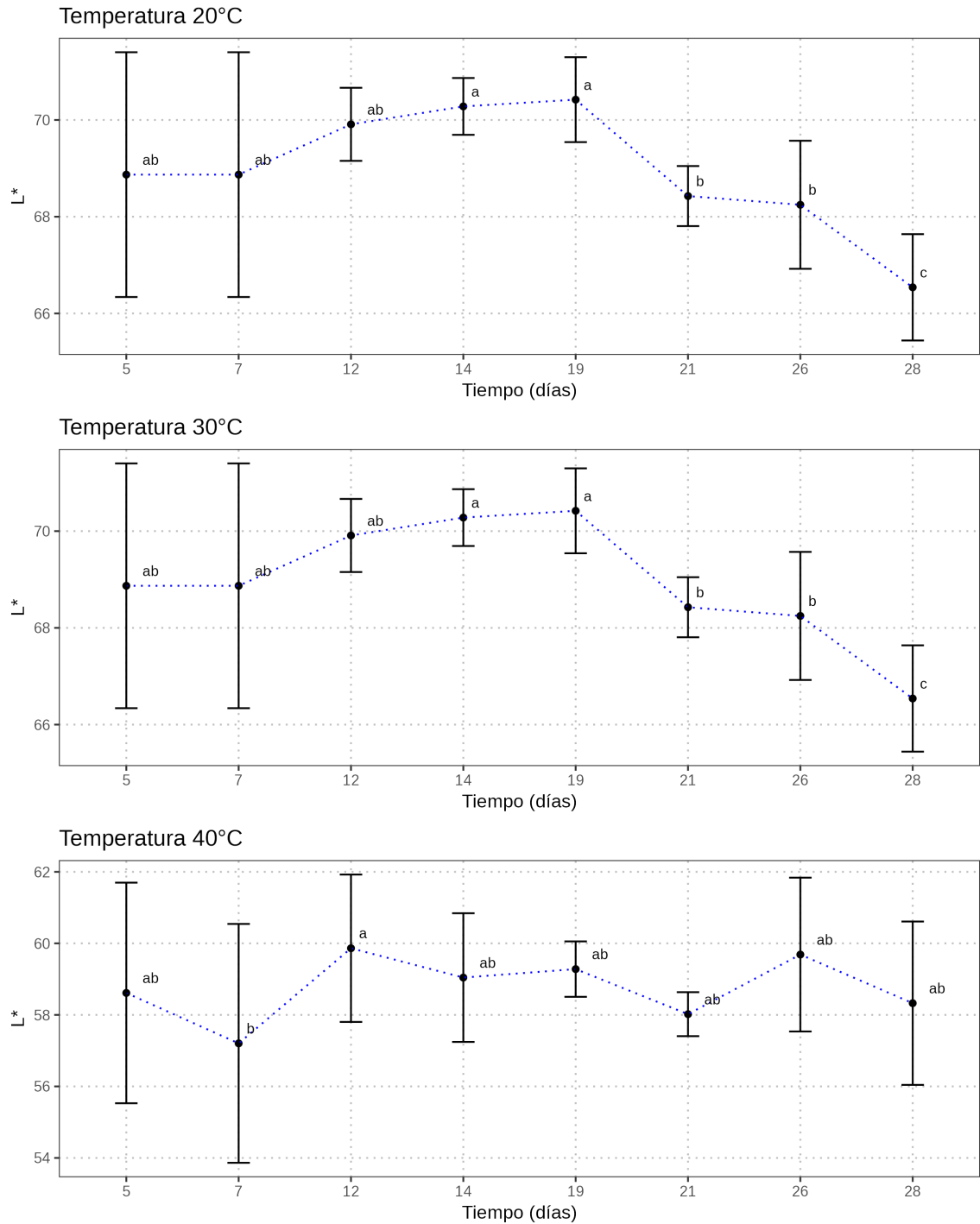


Figura 2.9: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de L^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

pesar de que los rangos son similares, la distribución de datos no lo es. Mientras que en la Figura 2.11 es posible observar la variación del atributo a través del tiempo; sin embargo al comparar los gráficos tomando en cuenta sus temperaturas, se encuentran similitudes, respaldando que la combinación de ambos factores no implica significancia en la variación del atributo.

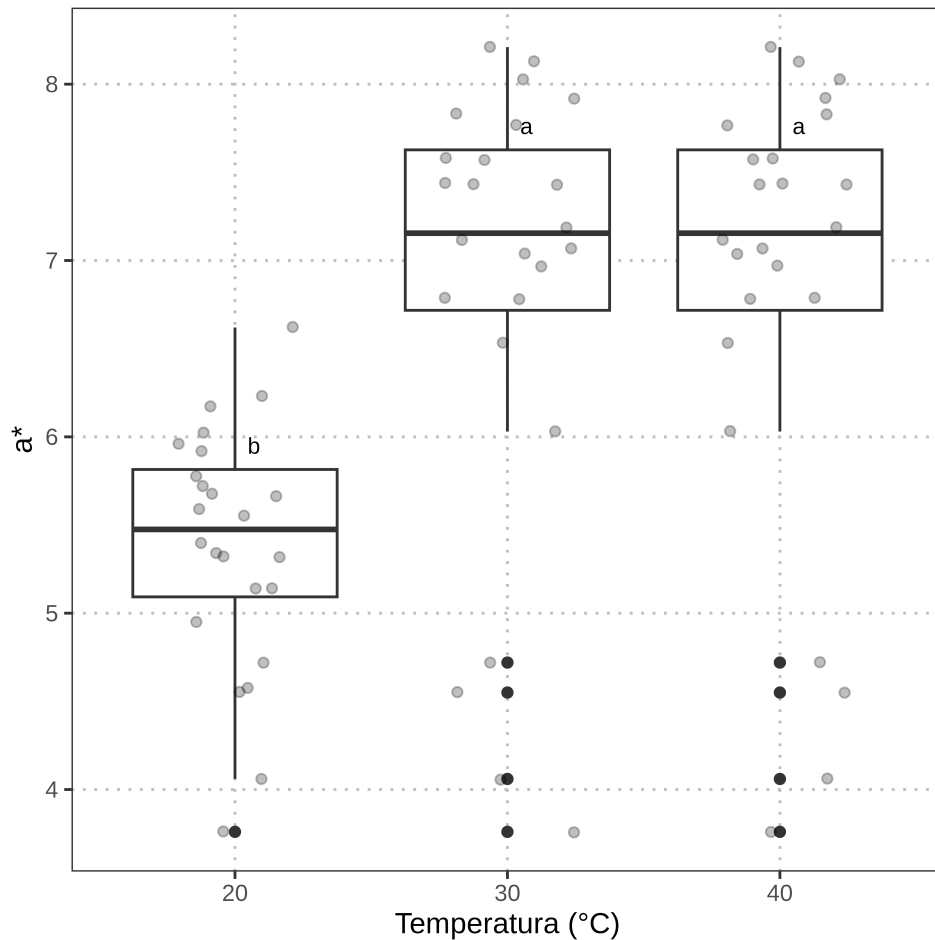


Figura 2.10: Valores de cambio en el a^* de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

2.4.2.3. b^*

Por último, en la Tabla A.7 correspondiente al ANOVA del valor b^* , se presentan los valores de p . Estos indican que todos los valores tienen influencia significativa sobre las variaciones de b^* , de manera que para la Temperatura y la interacción Temperatura y Tiempo (AB) se estimó un valor $p = < 2 \times 10^{-16}$, mostrando la mayor significancia. Mientras que para el parámetro del Tiempo (B)

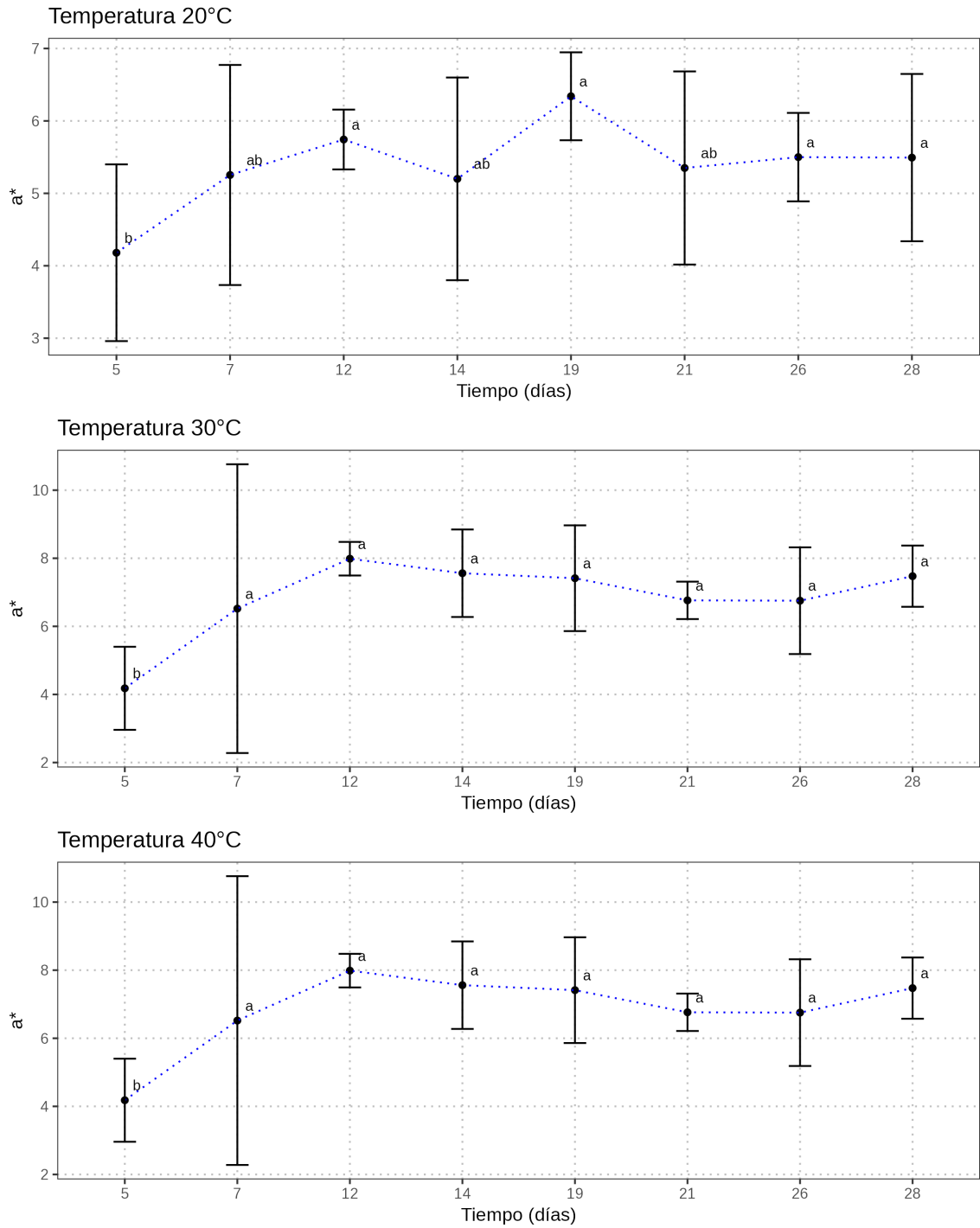


Figura 2.11: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de a^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

se estimó el valor $p = 8.88 \times 10^{-10}$.

Los resultados para la influencia de la temperatura se presentan gráficamente en la Figura 2.12 en la que es posible observar la variación de rangos y distribución de los datos. Se destaca una diferencia visual significativa entre los resultados a 20°C con respecto a los valores en 30 y 40°C. Mientras que en la Figura 2.13 se puede observar la variación de datos, sobre todo en las temperaturas de 30 y 40°C, además entre gráficos de diferentes temperaturas es posible observar el efecto conjunto del tiempo y la temperatura sobre las variaciones del atributo.

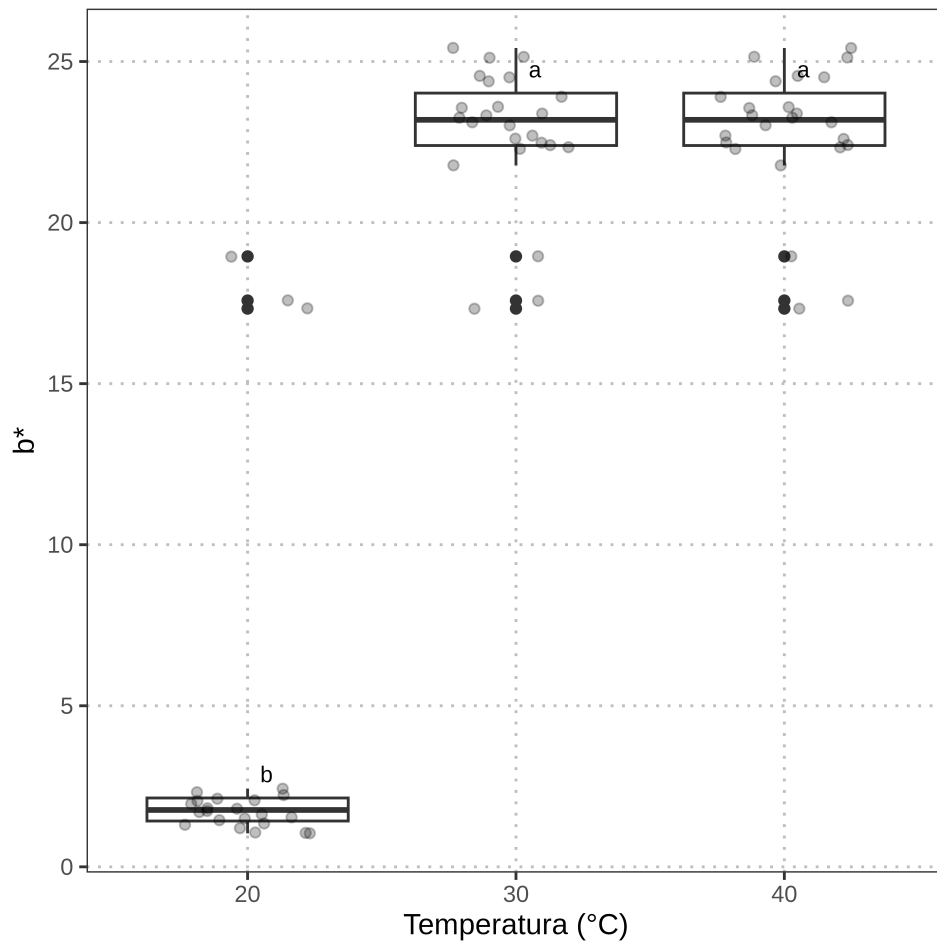


Figura 2.12: Valores de cambio en el b^* de galletas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

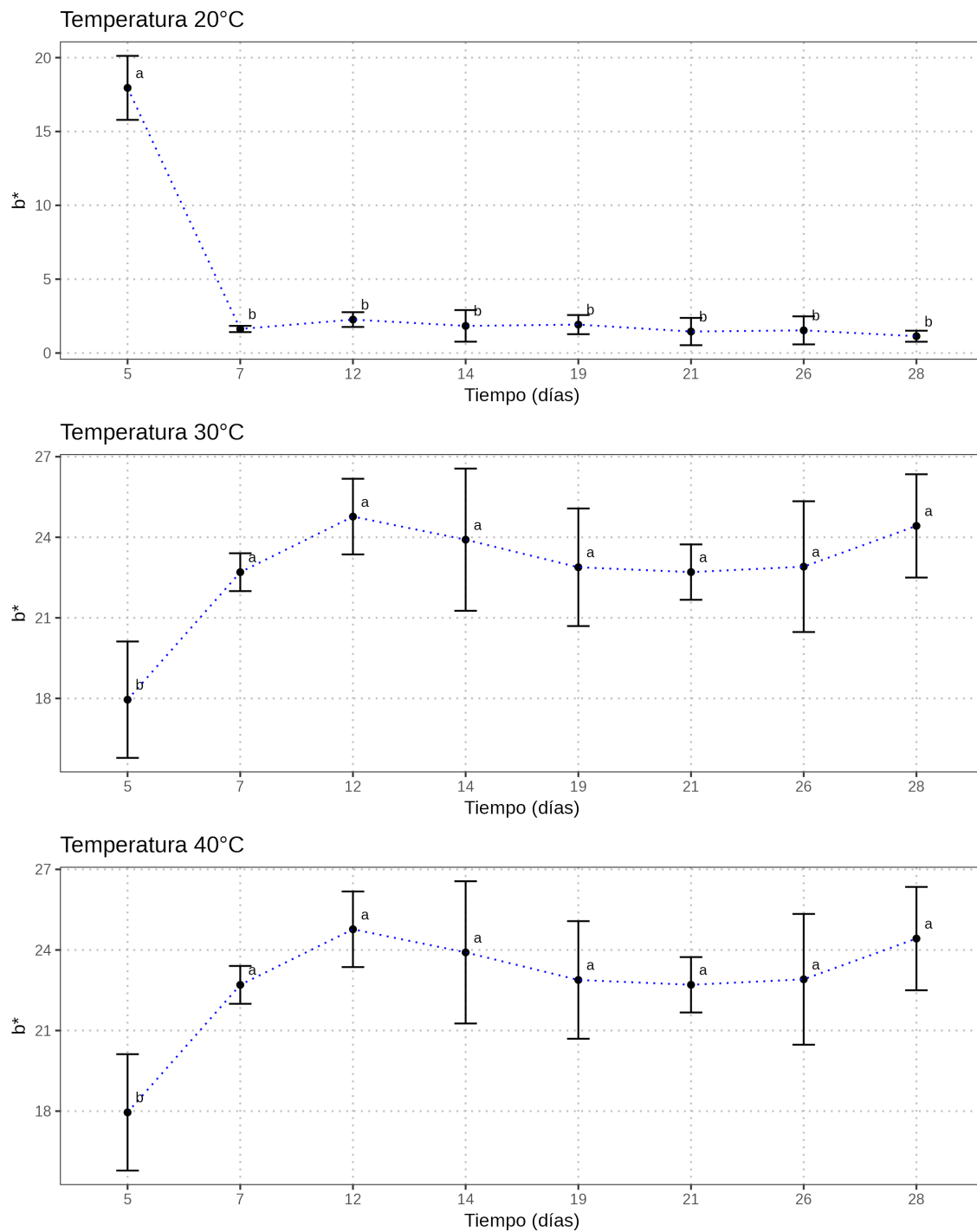


Figura 2.13: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de b^* de las galletas en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

2.4.3. Análisis cinético

Se analizó que atributo tenía el mejor ajuste ante un modelo de orden 0, para lo cual se determinaron los valores presentados en la Tabla 2.2, y posteriormente se utilizó el valor de Coeficiente de determinación (R^2), evaluando cuál se acercaba más al valor de 1. A 20°C se pudo observar que el atributo de peso, con un valor de $R^2 = 0.5530 \pm 0.3748$ presentó el mejor ajuste al modelo, mientras que a 30°C se determina nuevamente que el peso tiene el mejor ajuste debido a su valor $R^2 = 0.9941 \pm 0.00487$, a 40°C con un valor de $R^2 = 0.8873 \pm 0.0091$ se considera al peso como el atributo con mejor ajuste, aunque presenta menor valor en comparación a las otras dos temperaturas. En cuanto a las tasas de cambio, basadas en el valor absoluto más grande de la constante k , se determinó que a 20°C la tasa de cambio del valor L^* ($k = -0.0976 \pm 0.1415$) presentaba el valor absoluto más grande, a 30°C el valor b^* registró el valor absoluto más grande ($k = 0.0475 \pm 0.0153$), mientras que a 40°C el valor a^* tuvo la mayor tasa de cambio $k = 0.0422 \pm 0.0081$. El análisis de los datos prácticos bajo un modelo 0 infieren que el peso se ajustó mejor bajo las tres condiciones de temperatura elegidas, mientras que las tasas de cambio fueron mayores en los diferentes valores de color en las tres temperaturas consideradas, lo que quiere decir que estas cambiarían primero a medida que el tiempo de almacenamiento avanza.

Tabla 2.2: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para galletas.

T (°C)	Atributo (Q)	Q_0	k	R^2
20	AW	0.4978 ± 0.0131	$-0.0023 \pm 4.72 \times 10^{-4}$	0.2575 ± 0.1157
	Peso	22.4588 ± 2.0744	$-0.0918 \pm 8.94 \times 10^{-2}$	0.5530 ± 0.3748
	L^*	75.3336 ± 1.0297	-0.0976 ± 0.1415	0.0667 ± 0.0946
	a^*	4.5579 ± 0.0834	0.0159 ± 0.0019	0.0667 ± 0.0220
	b^*	24.4327 ± 0.3494	0.0372 ± 0.0131	0.1027 ± 0.0566
	acidez	0.0626 ± 0.0137	$-0.0006 \pm 7.49 \times 10^{-4}$	0.0414 ± 0.0560
30	AW	0.4800 ± 0.0079	$-0.0064 \pm 1.08 \times 10^{-3}$	0.4055 ± 0.1346
	Peso	18.1107 ± 0.5062	$-0.0096 \pm 1.93 \times 10^{-4}$	0.9941 ± 0.0048
	L^*	74.7577 ± 0.1555	0.0047 ± 0.0032	0.0024 ± 0.0030
	a^*	4.9469 ± 0.0820	0.0141 ± 0.0042	0.0302 ± 0.0162
	b^*	25.0843 ± 0.0871	0.0475 ± 0.0153	0.4385 ± 0.2768
	acidez	0.1898 ± 0.0097	$-0.0061 \pm 3.99 \times 10^{-4}$	0.1591 ± 0.0114
40	AW	0.4266 ± 0.0059	$-0.0078 \pm 6.72 \times 10^{-4}$	0.7321 ± 0.0813
	Peso	18.5431 ± 0.8149	$-0.0157 \pm 6.87 \times 10^{-4}$	0.8873 ± 0.0091
	L^*	75.4888 ± 0.4910	-0.0146 ± 0.0162	0.0200 ± 0.0256
	a^*	4.9276 ± 0.0456	0.0422 ± 0.0081	0.4559 ± 0.0822
	b^*	24.6168 ± 0.3876	0.0375 ± 0.0114	0.2602 ± 0.2186
	acidez	0.0342 ± 0.0068	$-0.0004 \pm 2.43 \times 10^{-4}$	0.1216 ± 0.0969

Para el análisis de los datos cinéticos de los atributos bajo un modelo de primer orden (Tabla 2.3), se determinó que debido a su valor de R^2 , el peso fue el atributo con mejor ajuste bajo las tres diferentes condiciones de temperatura, siendo que a 20°C se obtuvo un valor de $R^2 = 0.5539 \pm 0.3740$, a 30°C

un valor de $R^2 = 0.9943 \pm 0.0047$ y finalmente a 40°C registrando un valor $R^2 = 0.8892 \pm 0.0089$, de esta manera indicando que no solo el peso tuvo mayor afinidad con el modelo de orden 1, sino que a 30°C se presentaba el mayor ajuste de este atributo, según los datos recabados. Para el análisis de la tasa de cambio, basada en el valor k absoluto, se destacó que el atributo AW a 20°C ocurría con mayor rapidez por su valor $k = -0.0050 \pm 1.05 \times 10^{-3}$, mientras que a 30°C el atributo acidez presentó la mayor tasa de cambio con un valor $k = -0.0374 \pm 0.0097$, por último a 40°C con un valor $k = -0.0241 \pm 2.55 \times 10^{-3}$ se determinó que la AW tenía la mayor tasa de cambio. El análisis conjunto de estos datos nos quiere decir que ante cualquier temperatura, bajo el modelo de primer orden, el peso presentará mejor ajuste, a pesar de que otros atributos ocurran con mayor rapidez según su constante k .

Tabla 2.3: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para galletas.

T (°C)	Atributo (Q)	$\ln Q_0$	k	R^2
20	AW	-0.6983 ± 0.0253	$-0.0050 \pm 1.05 \times 10^{-3}$	0.2440 ± 0.1051
	Peso	3.1020 ± 0.0849	$-0.0038 \pm 3.56 \times 10^{-3}$	0.5539 ± 0.3740
	L*	4.3233 ± 0.0165	$-0.0015 \pm 2.22 \times 10^{-3}$	0.0699 ± 0.1011
	a*	1.5180 ± 0.0163	$0.0029 \pm 3.53 \times 10^{-4}$	0.0548 ± 0.0227
	b*	3.1941 ± 0.0144	$0.0016 \pm 5.45 \times 10^{-4}$	0.1046 ± 0.0547
	acidez	-3.2080 ± 0.2491	0.0012 ± 0.0135	0.0174 ± 0.0124
30	AW	-0.7356 ± 0.0202	$-0.0172 \pm 2.74 \times 10^{-3}$	0.2849 ± 0.0909
	Peso	2.8963 ± 0.0280	$-0.0005 \pm 2.60 \times 10^{-5}$	0.9943 ± 0.0047
	L*	4.3142 ± 0.0021	$0.0001 \pm 4.09 \times 10^{-5}$	0.0023 ± 0.0028
	a*	1.5913 ± 0.0186	$-2.57 \times 10^{-3} \pm 0.0008$	0.0279 ± 0.0153
	b*	3.2223 ± 0.0031	0.0018 ± 0.0006	0.4364 ± 0.0782
	acidez	-2.4268 ± 0.2264	-0.0374 ± 0.0097	0.1140 ± 0.1622
40	AW	-0.8434 ± 0.0219	$-0.0241 \pm 2.55 \times 10^{-3}$	0.6590 ± 0.0957
	Peso	2.9195 ± 0.0440	$-0.0009 \pm 3 \times 10^{-7}$	0.8892 ± 0.0089
	L*	4.3239 ± 0.0065	$-0.0002 \pm 2.14 \times 10^{-4}$	0.0206 ± 0.0258
	a*	1.5951 ± 0.0100	$0.0077 \pm 1.49 \times 10^{-3}$	0.4638 ± 0.0870
	b*	3.2026 ± 0.0163	0.0015 ± 0.0004	0.2604 ± 0.2163
	acidez	-3.4206 ± 0.2295	-0.0135 ± 0.0072	0.1529 ± 0.1249

Para el modelo de segundo orden (Tabla 2.4), se concluyó con respecto al valor R^2 el peso era el atributo que mejor se ajustaba a todas las temperaturas estudiadas, registrando el valor de $R^2 = 0.5549 \pm 0.3731$ a 20°C, $R^2 = 0.9944 \pm 0.0046$ a 30°C y $R^2 = 0.8911 \pm 0.0087$ a 40°C, presentando buen ajuste en general, con una mayor afinidad a 30°C.

Mientras que para la determinación de la tasa de cambio, basándose en los valores absolutos de k se determinó que la acidez presentaba mayor tasa a todas las temperaturas, a 20°C se obtuvo un valor de $k = -0.4053 \pm 0.3974$, a 30°C el valor fue de $k = 0.1863 \pm 0.4064$ y a 40°C $k = 0.5981 \pm 0.2375$. Obteniendo la reacción más rápida de este atributo a la temperatura de 40°C.

Tabla 2.4: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para galletas.

T (°C)	Atributo (Q)	$\frac{1}{Q_0}$	k	R^2
20	AW	2.0120 ± 0.0488	0.0110 ± 0.0024	0.2303 ± 0.0954
	Peso	0.0453 ± 0.0035	$1.58 \times 10^{-4} \pm 1.44 \times 10^{-4}$	0.5549 ± 0.3731
	L*	$0.0132 \pm 2.65 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-5} \pm 3.51 \times 10^{-5}$	0.0728 ± 0.1072
	a*	0.2191 ± 0.0033	$-5.17 \times 10^{-4} \pm 8.49 \times 10^{-5}$	0.0442 ± 0.0232
	b*	$0.0411 \pm 5.96 \times 10^{-4}$	$-6.56 \times 10^{-5} \pm 2.27 \times 10^{-5}$	0.1065 ± 0.0529
	acidez	39.5089 ± 9.3388	-0.4053 ± 0.3974	0.0185 ± 0.0156
30	AW	2.1033 ± 0.0523	$0.0493 \pm 6.98 \times 10^{-3}$	0.1832 ± 0.0531
	Peso	0.0552 ± 0.0015	$2.98 \times 10^{-5} \pm 2.30 \times 10^{-6}$	0.9944 ± 0.0046
	L*	$0.0134 \pm 2.58 \times 10^{-5}$	$-8.09 \times 10^{-7} \pm 5.24 \times 10^{-7}$	0.0022 ± 0.0026
	a*	0.2051 ± 0.0042	$-4.72 \times 10^{-4} \pm 1.69 \times 10^{-4}$	0.0250 ± 0.0142
	b*	0.0399 ± 0.0001	$-7.13 \times 10^{-5} \pm 2.17 \times 10^{-5}$	0.4342 ± 0.2756
	acidez	27.2845 ± 12.2869	0.1863 ± 0.4064	0.0612 ± 0.0994
40	AW	2.2797 ± 0.0820	$0.0790 \pm 9.68 \times 10^{-3}$	0.5377 ± 0.1016
	Peso	0.0540 ± 0.0024	$4.66 \times 10^{-5} \pm 2.08 \times 10^{-6}$	0.8911 ± 0.0087
	L*	$0.0132 \pm 8.64 \times 10^{-5}$	$2.64 \times 10^{-6} \pm 2.85 \times 10^{-6}$	0.0212 ± 0.0261
	a*	0.2029 ± 0.0022	$-1.41 \times 10^{-3} \pm 2.81 \times 10^{-4}$	0.4705 ± 0.0910
	b*	0.0407 ± 0.0007	$-6.19 \times 10^{-4} \pm 1.68 \times 10^{-5}$	0.2607 ± 0.2139
	acidez	31.7684 ± 8.3800	0.5981 ± 0.2375	0.1842 ± 0.1613

En general, para los tres modelos el atributo que tuvo un mejor ajuste fue el peso, de acuerdo a sus valores de R^2 . Considerando la temperatura de 40°C, con la que se trabajaría en un estudio de VU acelerado, se determinó que para todos los atributos, el mejor ajuste sería el modelo de segundo orden. Bajo estas mismas condiciones, ahora considerando el valor absoluto de k para la tasa de

cambio, el atributo de acidez se definió como crítico, es decir, que la variaciones en este atributo se presentarían antes según la información recabada.

2.4.4. Análisis termodinámico

Se hizo el análisis conjunto de los datos cinéticos y conjuntos para lograr obtener los datos en la Tabla 2.5, estos correspondientes al atributo de peso ajustado al modelo de orden 1, el análisis de estos parámetros se enfocó en tener una mejor comprensión de las reacciones de deterioro asociadas a la muestra problema del presente trabajo.

Primeramente, para el valor de energía de activación (E_a) se calculó en -47.511 kJ/mol, este valor representa numéricamente la energía mínima necesaria para que una reacción ocurra. Mientras que la constante cinética A , la cual proporciona información sobre la frecuencia de colisión de las moléculas en la reacción, así como se su orientación adecuada, tuvo un valor estimado de 3.88×10^{-13} .

De igual manera se determinaron parámetros termodinámicos como la Entalpía ($\Delta H^\ddagger$) cuyo valor fue estimado en -50.029 kJ/mol, debido a que el valor de la ($\Delta H^\ddagger$) es negativo, se considera que las variaciones en el peso durante el almacenamiento conllevan un proceso exotérmico, lo que indica que se absorbe energía del entorno para llevarse a cabo. Otro parámetro calculado fue la Entropía ($\Delta S^\ddagger$), que describe el desorden de un proceso o reacción, lo que puede ayudar a comprender sus variaciones o comportamientos, se obtuvo un valor aproximado de -490.983 J/Kmol.

El último valor estimado fue Q_{10} , este permite describir la sensibilidad al cambio de la velocidad de una reacción ante cambios de temperatura de 10°C , este valor es importante para comprender el comportamiento de un proceso o reacción ante los cambios de temperatura. El resultado de este parámetro se explica como que la constante k se incrementaría 0.547 veces por cada 10°C que se incrementa la temperatura.

Los parámetros termodinámicos son de gran utilidad para comprobar que una formulación es estable ante diversas condiciones de almacenamiento, por ejemplo, el cálculo de energía de activación para reacciones de oxidación en unas galletas formuladas con harina de almendra y cáscara de mango, permitieron determinar que en comparación de datos antes reportados, la E_a que presentaban las nuevas formulaciones estaban por debajo del límite inferior para que una reacción de oxidación ocurriera, por lo que se consideró que al menos para este parámetro la formulación era adecuada, igualmente, al calcular el parámetro Q_{10} se pudo determinar cuántas veces más se aceleraba la reacción de deterioro relacionada al índice de peróxidos y humedad a medida que se incrementaban 10°C la temperatura de almacenamiento, comparando estos valores entre 4 formulaciones hechas, se pudo elegir la mejor entre estas refiriéndose a su estabilidad termodinámica a lo largo de su VU (López et al., 2023). En el presente estudio, será posible aplicar los parámetros termodinámicos como una referencia sobre como el control de temperatura que el productor tenga durante el almacenamiento, podrá extender o acortar la VU del producto.

Tabla 2.5: Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de orden cero que describe la variación del peso.

$E_a/\text{kJ mol}^{-1}$	A día $^{-1}$	$\Delta H^\ddagger/\text{kJ mol}^{-1}$	$\Delta S^\ddagger/\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	Q_{10}
-47.511	3.88×10^{-13}	-50.029	-490.983	0.547

2.4.5. Cálculo de vida útil

A partir del estudio cinético fue posible determinar la Ecuación 2.2, la cual permite calcular la VU de las galletas de mantequilla en función de la temperatura de almacenamiento ($^{\circ}\text{C}$), con un nivel de confianza del 81.90 %. El despeje de la Ecuación 2.2, presentado en la 2.3, reveló una VU de 109.20 días (3.64 meses) para el producto almacenado a 25°C . Adicionalmente, en la Tabla 2.6 se presentan los resultados correspondientes a diversas temperaturas obtenidos mediante esta ecuación. Esta ecuación fue determinada utilizando el cambio general de color (ΔE) del producto como atributo crítico de calidad. Este atributo fue calculado a partir del espacio de color CIE-L*a*b* del producto almacenado a 20, 30 y 40°C durante 28 días.

El cambio total de ΔE de la muestra durante el estudio tomó valores desde 0.48 a los 20°C , hasta 3.80 a los 40°C . En estudios previos se ha reportado que a partir de que ΔE adquiere valores superiores a 5, los consumidores comienzan a detectar estas variaciones del color en el producto (Obón et al., 2009). El ΔE fue asociado a la degradación de los pigmentos y de los colorantes presentes en la muestra (Contreras-López et al., 2022; García-Curiel et al., 2023).

$$\log \theta = 2.3523 - 0.0126T \quad (2.2)$$

$$\theta = 10^{2.3523 - 0.0126T} \quad (2.3)$$

Tabla 2.6: Tiempo de VU a diferentes temperaturas.

T($^{\circ}\text{C}$)	θ (días)	θ (meses)
15	145.83	4.86
20	126.20	4.21
25	109.20	3.64
30	94.50	3.15
35	81.78	2.73
40	70.76	2.36

2.4.6. Discusión general

El estudio de VU de las galletas de mantequilla permitió identificar los factores críticos que afectan su estabilidad durante el almacenamiento a diferentes temperaturas y tiempos de almacenamiento. Se lograron observar las tendencias de comportamiento de los diversos atributos fisicoquímicos analizados.

Los modelos cinéticos aplicados demostraron que el peso es el atributo con mejor ajuste a los tres órdenes de reacción. El análisis termodinámico indicó que el deterioro del peso es un proceso exotérmico y que la velocidad de degradación aumenta con la temperatura, evidenciado por el valor de Q_{10} . Finalmente, la ecuación de predicción permitió estimar que la VU de las galletas es de 109 días a 25°C , disminuyendo a medida que la temperatura de almacenamiento se incrementa. Estos resultados destacan la importancia del control de la temperatura y la humedad en la conservación del producto y proporcionan herramientas útiles para la optimización de su estabilidad en la industria alimentaria.

En diversos alimentos como las frutas, se ha atribuido la pérdida de peso a la disminución de la humedad, estrategias como recubiertas se han utilizado en estos casos mostrando resultados

favorables para reducir la incidencia de este fenómeno de deterioro ([Villanueva Trujillo et al., 2021](#)). Gracias a este tipo de estudios es posible determinar que condiciones como la temperatura y humedad son de importancia para la extensión de la VU de alimentos con el peso como atributo crítico.

2.5. Estrategias de optimización de vida útil

Los empaques en los alimentos se relacionan con varias funciones con respecto a estos, ya sea para contención, protección y/o transportación, el tipo de empaque de un alimento depende de factores como el tipo de alimento, las condiciones en las que se transporta y almacena, además de la presentación deseada. La protección que ofrecen los empaques es una de las funciones más importantes entre las antes mencionadas ya que limita el contacto del alimento con factores externos que aceleran su deterioro como la luz, oxígeno, diversos microorganismos o contaminantes físicos diversos, un empaque adecuado es capaz de extender la VU de un alimento ([Bauer et al., 2022](#)).

La demanda por innovaciones en los empaques de alimentos se ve incrementada ante la necesidad de alimentos percibidos como menos procesados al tener menos aditivos, debido a esto se ha requerido de estrategias adicionales para extender la VU de los alimentos, una de estas son los paquetes con propiedades antimicrobianas ([Fadiji et al., 2023](#)). Otro tipo de empaques son los llamados empaques inteligentes, estos permiten monitorear los cambios que tiene el alimento durante su almacenamiento, asegurando así la inocuidad y seguridad alimentaria además de las posibles fallas de manejo en la cadena de distribución del alimento ([Thirupathi Vasuki et al., 2023](#)).

En otros casos se ha optado por empaques comestibles en alimentos como las galletas para extender su VU. Este tipo de empaques no solo se enfoca a la protección del producto sino que atiende a la preocupación de reducción de residuos por parte de la industria alimentaria, por ejemplo, los empaques hechos con quitosano y goma arábica enriquecidos con extracto de semilla de uva puede soportar mayores condiciones de humedad aunque permite el paso de luz, lo cual puede resultar inconveniente en galletas con un alto contenido graso. A pesar de esto, estos paquetes ofrecen beneficios extra como el aumento del contenido de compuestos como polifenoles dependiendo de los ingredientes con los que se formule. El estudio referido mostró que a pesar de que la dureza de la galleta incrementa, también se registro mejor control de las propiedades sensoriales en un periodo de seis meses de almacenamiento ([Molnar et al., 2023](#)).

Además, para productos susceptibles a la oxidación se han desarrollado empaques activos que liberan sustancias antioxidantes activas, inhibiendo en cierto grado la oxidación lipídica y la rancidez en alimentos, en este contexto se han estudiado diversas formas de liberación como empaque con actividad antioxidante *in situ*, envases activos con mecanismos de liberación o envases con mecanismos de liberación controlada que se adaptan al proceso de deterioro del alimento ([Kuai et al., 2021](#)). Es importante recalcar que empaques más sofisticados tienden a elevar el costo del producto por lo que se debe considerar el mercado al que el producto va dirigido así como el presupuesto de producción del mismo.

2.6. Conclusión

El estudio de VU de las galletas de mantequilla permitió identificar los principales parámetros de calidad que influyen en la VU y deterioro de estos alimentos durante su almacenamiento. Los resultados mostraron que el peso y la acidez son los atributos con mayor sensibilidad a cambios ante el estrés ambiental del almacenamiento. Además, el análisis termodinámico mostró que las

reacciones que conllevan un proceso exotérmico, con una velocidad de degradación influenciada significativamente por la temperatura.

La ecuación predictiva desarrollada en este trabajo estimó una VU de 109 días a 25°C, además se demostró que esta disminuye notablemente a temperaturas de almacenamiento más altas, lo que subraya la importancia de mantener condiciones de almacenamiento adecuadas para preservar la calidad del producto.

El uso de modelos cinéticos y predictivos mostró funcionar para alimentos como las galletas de mantequilla, permitiendo un estudio de VU menos costoso y más rápido que métodos convencionales como el estudio de VU en tiempo real. En conclusión, este estudio proporciona herramientas científicas para predecir y extender la VU de las galletas de mantequilla, asegurando su calidad y aceptabilidad por parte del consumidor.

2.7. Referencias

- Anuradha, K., Naidu, M. M., Manohar, R. S., & Indiramma, A. R. (2010). Effect of vanilla extract on radical scavenging activity in biscuits. *Flavour and Fragrance Journal*, 25(6), 488–492. <https://doi.org/10.1002/ffj.2009>
- Arimi, J. M., Duggan, E., O'Sullivan, M., Lyng, J. G., & O'Riordan, E. D. (2010). Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread): Mechanical and acoustic evaluation. *Food Research International*, 43(6), 1650–1655. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.004>
- Bauer, A.-S., Leppik, K., Galić, K., Anastopoulos, I., Panayiotidis, M. I., Agriopoulou, S., Milousi, M., Uysal-Unalan, I., Varzakas, T., & Krauter, V. (2022). Cereal and Confectionary Packaging: Background, Application and Shelf-Life Extension. *Foods*, 11(5), 697. <https://doi.org/10.3390/foods11050697>
- Bolea, C. A., Grigore-Gurgu, L., Aprodu, I., Vizireanu, C., & Stănciuc, N. (2019). Process-Structure-Function in Association with the Main Bioactive of Black Rice Flour Sieving Fractions. *Foods*, 8(4), 131. <https://doi.org/10.3390/foods8040131>
- Calligaris, S., Manzocco, L., Kravina, G., & Nicoli, M. C. (2007). Shelf-life Modeling of Bakery Products by Using Oxidation Indices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(5), 2004–2009. <https://doi.org/10.1021/jf063004h>
- Chu, Z., Lu, L., & Wang, J. (2013). Mathematical Model for Water Transfer in Multidomain Food Packed in Permeable Packaging. *Packaging Technology and Science*, 26(S1), 11–22. <https://doi.org/10.1002/pts.1992>
- Conforti, P. A., Yamul, D. K., & Lupano, C. E. (2012). Influence of Milk, Corn Starch, and Baking Conditions on the Starch Digestibility, Gelatinization, and Fracture Stress of Biscuits. *Cereal Chemistry*, 89(4), 205–210. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-11-11-0138>
- Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., Ugarte-Bautista, I., Ramírez-Godínez, J., González-Olivares, L. G., García-Curiel, L., & Pérez-Flores, J. G. (2022). Use of image analysis to determine the shelf-life of an apple compote with wine. *Food Science and Technology*, 42, e04122. <https://doi.org/10.1590/fst.04122>
- Coronel, J. L. (2016). *Evaluación de las características fisicoquímicas del barquillo tipo oblea enrollada durante su tiempo de vida útil* [Tesis de {Ingenier'ia}]. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Dirección General de Normas, & Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (1994). *NMX-F-006-1983 "Alimentos - Galletas"*.
- Fadiji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O., & Iwarere, S. A. (2023). A Review on Antimicrobial

- Packaging for Extending the Shelf Life of Food. *Processes*, 11(2), 590. <https://doi.org/10.3390/pr11020590>
- Galić, K., Čurić, D., & Gabrić, D. (2009). Shelf Life of Packaged Bakery Goods—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(5), 405–426. <https://doi.org/10.1080/10408390802067878>
- 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>
- García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2023). Anthocyanin content prediction in frozen strawberry puree. *Italian Journal of Food Science*, 35(2), 88–97. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i2.2315>
- Gebreselassie, E., & Clifford, H. (2016). Oxidative Stability and Shelf Life of Crackers, Cookies, and Biscuits. In *Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats* (pp. 461–478). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-63067-056-6.00012-4>
- Ghnimi, H., Ennouri, M., Chene, C., & Karoui, R. (2023). A review combining emerging techniques with classical ones for the determination of biscuit quality: Advantages and drawbacks. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, 63, 1–24. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2012124>
- Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., Bonazzi, C., & Gontard, N. (2004). Moisture diffusivity and transfer modelling in dry biscuit. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.014>
- Han, L., Jiang, M., Zhang, J., Shao, C., & Zhang, Q. (2022). Thermal Degradation and Product Analysis of 3-iodo-2-propyl-butylcarbamate as a Wood Preservative. *Polymers*, 14(21), 4531. <https://doi.org/10.3390/polym14214531>
- Hao, F., Lu, L., & Wang, J. (2017). Finite Element Analysis of Moisture Migration of Multicomponent Foods During Storage. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12319. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12319>
- Hu, H., Wang, Y., Huang, Y., Yu, Y., Shen, M., Li, C., Nie, S., & Xie, M. (2022). Natural Antioxidants and Hydrocolloids as a Mitigation Strategy to Inhibit Advanced Glycation End Products (AGEs) and 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) in Butter Cookies. *Foods*, 11(5), 657. <https://doi.org/10.3390/foods11050657>
- Hussein, A. M., Yaseen, A. A., Esmail, R. M., & Mohammad, A. A. (2020). Gluten-free biscuits produced from new drought tolerant corn hybrids: Processing and evaluation. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-0279-3>
- Kanatt, S. R. (2020). Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100506>
- Keramat, J., LeBail, A., Prost, C., & Jafari, M. (2011). Acrylamide in Baking Products: A Review Article. *Food and Bioprocess Technology*, 4(4), 530–543. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0495-1>
- Klunklin, W., Savage, G., & Department of Wine, Food and Molecular Biosciences, Lincoln University, Lincoln 7647, Christchurch, New Zealand. (2018). Biscuits: A Substitution of Wheat Flour with Purple Rice Flour. *Advances in Food Science and Engineering*, 2(3). <https://doi.org/10.22606/aese.2018.23001>
- Kuai, L., Liu, F., Chiou, B.-S., Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., & Zhong, F. (2021). Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 120, 106992.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106992>
- Lee, J., & Ju, S. (2024). What Is the Relationship Between Sensory Attributes Identified Using CATA (Check-All-That-Apply) Questionnaire and Consumer Acceptance of Cookies Using Plant-Based Oils? *Foods*, 13(22), 3593. <https://doi.org/10.3390/foods13223593>
- Lo Faro, E., Salerno, T., Montevicchi, G., & Fava, P. (2022). Mitigation of Acrylamide Content in Biscuits through Combined Physical and Chemical Strategies. *Foods*, 11(15), 2343. <https://doi.org/10.3390/foods11152343>
- López, E., Cervantes, C., Gabilán, E., & Romero, A. (2023). Determinación de la vida de anaquel de galletas con harina de almendra y cáscara de mango. *Revista IPSUMTEC*, 6(4), 98–105.
- Maldonado, R., & Pacheco de Delahaye, E. (2000). Elaboración de galletas con una mezcla de harina de trigo y de plátano verde. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(4), 387–393.
- Molnar, D., Novotni, D., Kurek, M., Galić, K., Iveković, D., Bionda, H., & Šćetar, M. (2023). Characteristics of edible films enriched with fruit by-products and their application on cookies. *Food Hydrocolloids*, 135, 108191. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108191>
- Morais, M. P. D., Caliar, M., Nabeshima, E. H., Batista, J. E. R., Campos, M. R. H., & Soares Júnior, M. S. (2018). Storage stability of sweet biscuit elaborated with recovered potato starch from effluent of fries industry. *Food Science and Technology*, 38(2), 216–222. <https://doi.org/10.1590/fst.32916>
- Nandeesh, K., Jyotsna, R., & Venkateswara Rao, G. (2011). Effect of differently treated wheat bran on rheology, microstructure, and quality characteristics of soft dough biscuits: Wheat bran treatments and soft dough biscuit. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(2), 179–200. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00470.x>
- Nicoli, M. C. (2012). *Shelf Life Assessment of Food*. CRC Press.
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M., & Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red–purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.013>
- Oyola Coral, M. A., & Padilla Fabian, R. A. (2021). *Enriquecimiento de galleta con sustitución parcial de harina de tocosh de papa (*Solanum tuberosum L*) y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*)*. [Tesis de {{Ingenier\ 'ia}}]. Universidad Nacional de Barranca.
- Pajin, B., Dimić, E., Romanić, R., & Radujko, I. (2011). Influence of fatty acid composition of sunflower kernel on quality and shelf-life of cookies. *Acta Alimentaria*, 40, 71–79. <https://doi.org/10.1556/AAlim.40.2011.1.10>
- Patrignani, M., Conforti, P. A., & Lupano, C. E. (2014). The role of lipid oxidation on biscuit texture during storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(8), 1925–1931. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12550>
- Phimolsiripol, Y., Siripatrawan, U., & Cleland, D. J. (2011). Weight loss of frozen bread dough under isothermal and fluctuating temperature storage conditions. *Journal of Food Engineering*, 106(2), 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.020>
- Piga, A., Catzeddu, P., Farris, S., Roggio, T., Sanguinetti, A., & Scano, E. (2005). Texture evolution of “Amaretti” cookies during storage. *European Food Research and Technology*, 221(3-4), 387–391. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1185-5>
- Romani, S., Tappi, S., Balestra, F., Rodriguez Estrada, M. T., Siracusa, V., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2015). Effect of different new packaging materials on biscuit quality during accelerated storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(8), 1736–1746. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6888>

- Roudaut, G. (2020). Water Activity and Physical Stability. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods* (1st ed., pp. 255–269). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch10>
- Salas Pastor, Y. A., Cruzado Abanto, A. S., Ruiz Pérez, K. A., Sánchez Cacho, J. A., Sánchez Chamaya, R., Valera Olivares, C. Y., Sangay Terrones, M. E., Minchán Quispe, W., & Vásquez Rojas, M. I. (2024). Determinación de la vida útil de galletas artesanales de maíz nixtamalizado mediante pruebas aceleradas. *Revista Científica Pakamuros*, 12(4), 94–102. <https://doi.org/10.37787/h01c8c28>
- Singh, S., Prasad Chakraborty, J., & Kumar Mondal, M. (2020). Intrinsic kinetics, thermodynamic parameters and reaction mechanism of non-isothermal degradation of torrefied *Acacia nilotica* using isoconversional methods. *Fuel*, 259, 116263. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116263>
- Tapia-Ignacio, C., & Jaguey-Hernández, Y. (2023). Deducción de la ecuación de Coats-Redfern utilizada para calcular la energía de activación en mediciones calorimétricas. *Con-Ciencia*, 10(20), 8–9.
- Thirupathi Vasuki, M., Kadirvel, V., & Pejavara Narayana, G. (2023). Smart packaging—An overview of concepts and applications in various food industries. *Food Bioengineering*, 2(1), 25–41. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12038>
- Villanueva Trujillo, C. A., Vilca Aguirre, R., Alejos Patiño, I., Cotrina Cabello, G. G., & Tello Evangelist, L. L. (2021). “Aplicación de Aceite Esencial de Canela (*cinnamomum verum*) y Clavo de Olor (*syzygium aromaticum*) en la cobertura comestible y tiempo de vida útil de la Fresa (*fragaria ananassa*)”. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(2), 1504–1526. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i2.367
- Wei, F., Wang, H., Li, X., Cao, J., & Zhang, X. (2024). Preparation of *Astragalus Membranaceus*–cranberry biscuits and the evaluation of physicochemical properties and antioxidant activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(5), 3134–3141. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17057>
- Yilmaz, E., & Karadeniz, F. (2014). Effect of storage on the bioactive compounds and antioxidant activity of quince nectar. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(3), 718–725. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12355>
- Zambrano, V., Bustos, R., Arozarena, Y., & Mahn, A. (2023). Optimization of a Microencapsulation Process Using Oil-in-Water (O/W) Emulsion to Increase Thermal Stability of Sulfuraphane. *Foods*, 12(20), 3869. <https://doi.org/10.3390/foods12203869>
- Zhang, W., Luo, Z., Wang, A., Gu, X., & Lv, Z. (2021). Kinetic models applied to quality change and shelf life prediction of kiwifruits. *LWT*, 138, 110610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110610>
- Zheng, H., & Lu, H. (2011). Use of kinetic, Weibull and PLSR models to predict the retention of ascorbic acid, total phenols and antioxidant activity during storage of pasteurized pineapple juice. *LWT - Food Science and Technology*, 44(5), 1273–1281. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.023>
- Zoulias, E. I., Oreopoulou, V., & Kounalaki, E. (2002). Effect of fat and sugar replacement on cookie properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(14), 1637–1644. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1230>

APÉNDICE A

Material suplementario

A.1. Condiciones de experimentación

A continuación se presentan las condiciones de experimentación utilizadas para las galletas de mantequilla, cada determinación se hizo al triplicado para los atributos de AW, color (CIELAB), acidez y peso.

Temperatura	Tiempo (días)
20	0
20	5
20	7
20	12
20	14
20	19
20	21
20	26
20	28
30	0
30	5
30	7
30	12
30	14
30	19
30	21
30	26
30	28
40	0
40	5

Temperatura	Tiempo (días)
40	7
40	12
40	14
40	19
40	21
40	26
40	28

A.2. Resultados del análisis de varianza

En las Tablas [A.2](#), [A.3](#), [A.4](#), [A.5](#), [A.6](#) y [A.7](#) 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 las galletas de mantequilla. Estos atributos incluyen la Actividad de agua ([AW](#)), el contenido de humedad, la variación del peso, el pH, la acidez, y el análisis de color con los valores $L^*a^*b^*$.

Tabla A.2: ANOVA completo de la AW de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	0.31	0.155	502.62	$<2 \times 10^{-16}***$
B: Tiempo	8	0.3424	0.0428	138.79	$<2 \times 10^{-16}***$
AB	16	0.1022	0.00639	20.71	$<2 \times 10^{-16}***$
Residuales	54	0.0167	0.00031		

Tabla A.3: ANOVA completo del peso de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	107.01	53.51	22.961	$1.5 \times 10^{-6}***$
B: Tiempo	8	15.44	1.93	0.828	0.586
AB	16	21.81	1.36	0.585	0.868
Residuales	27	62.92	2.33		

Tabla [A.4](#)

Tabla A.4: ANOVA completo de la acidez titulable de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	0.07128	0.03564	258.4	$<2 \times 10^{-16}***$

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
B: Tiempo	8	0.26652	0.03332	241.6	$<2 \times 10^{-16}***$
AB	16	0.28429	0.01777	128.8	$<2 \times 10^{-16}***$
Residuales	54	0.00745	0.00014		

Tabla A.5

Tabla A.5: ANOVA completo del valor de L* de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	1661.6	830.8	1648.321	$<2 \times 10^{-16}***$
B: Tiempo	7	63.8	9.1	18.092	$1.62 \times 10^{-11}***$
AB	14	21.6	1.5	3.065	0.00193
Residuales	48	24.2	0.5		

Tabla A.6

Tabla A.6: ANOVA completo del valor de a* de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	33.58	16.791	38.569	$1.03 \times 10^{-10}***$
B: Tiempo	7	58.12	8.303	19.072	$6.67 \times 10^{-12}***$
AB	14	8.11	0.579	1.331	0.225
Residuales	48	20.9	0.435		

Tabla A.7

Tabla A.7: ANOVA completo del valor de b* de las galletas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	2	5816	2907.9	6355.48	$<2 \times 10^{-16}***$
B: Tiempo	7	45	6.5	14.11	$8.88 \times 10^{-10}***$
AB	14	840	60	131.11	$<2 \times 10^{-16}***$
Residuales	48	22	0.5		

