

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: **“Evaluación del efecto del almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*) aplicado en un pan de masa madre como alternativa baja en gluten”**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingeniera en Alimentos

AUTORA: Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira

TUTOR: Ing. Rivas Rosero Carlos Alberto, MSc

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que la Estudiante Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira con el número de cédula 0402071112 respectivamente ha desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación del efecto del almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*) aplicado en un pan de masa madre como alternativa baja en gluten"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva.



Ing. Rivas Rosero Carlos Alberto MSc

TUTOR

Tulcán, septiembre de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniera en la Carrera de alimentos de la FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

Yo, Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira con cédula de identidad número 0402071112, declaro que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.



Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira

AUTORA

Tulcán, septiembre de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira declaro ser autora de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación del efecto del almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*) aplicado en un pan de masa madre como alternativa baja en gluten" Eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira

AUTORA

Tulcán, septiembre de 2026

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la fortaleza para superar con sabiduría cada desafío que se me ha presentado durante mi trayectoria académica.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Estatal de Carchi (UPEC) y a los docentes de mi querida carrera de Alimentos, por acogerme y brindarme sus conocimientos los cuales serán herramientas para mi futura formación personal.

Al MSc. Carlos Rivas mi tutor, por sus conocimientos, paciencia, guía, y tiempo, los cuales me ayudaron a en el desarrollo y éxito de esta investigación. Así mismo agradezco al MSc. Carlos Paredes y PhD. Gualberto Leon, no solo por ayudarme a emprender mi camino con su respaldo a mi transición en el ámbito académico y profesional, sino que también hayan creído en mi potencial cuando daba mis primeros pasos, reitero mi gratitud por su tiempo, su paciencia y por la solidez de la confianza depositada en mí.

Finalmente, a mi familia por haber creído en mí desde el el primer día, incluso cuando el camino parecía incierto. Por su apoyo incondicional, sus sacrificios silenciosos y la fe inquebrantable en mis capacidades han sido el motor que me inspiro e impulso a superar cada desafío. Gracias por ser ese refugio constante y los pilares en los que he construido mi futuro profesional, nada de esto habría sido posible sin su amor.

Alejandra Cusangua

DEDICATORIA

A Dios porque a pesar de todos los errores me ha dado la fe y fortaleza para poder superar todas las angustias que se me presentaron y por ser ese refugio cuando todo estaba perdido.

Dedico este trabajo con todo mi cariño a mi Madre Nely Tupe por ser el pilar fundamental de mi vida, mi refugio y por siempre confiar en mí por ser mi mayor fuente de inspiración por siempre darme su amor y por ser ese faro que guio mi camino en los momentos de mayor presión y cansancio. La fe que tuviste en mi capacidad me dio la fuerza para levantarme ante cada obstáculo. Este logro académico es el fruto de tu amor, cuidados y ejemplo hermoso de fortaleza que me regalas cada día.

A mi padre Jorge Cusangua por ser el cimiento sólido sobre el cual he construido mi futuro mi mayor ejemplo de perseverancia. Gracias por todos los sacrificios silenciosos, por tu esfuerzo incansable para asegurar mi educación por enseñarme tu disciplina y el trabajo honrado. Saber que creías en mí y priorizar mi educación por encima de todo; tu disposición para proveer cada herramienta y cada oportunidad que solicite fue un pilar que expandió mis horizontes profesionales. Tu inversión constante en mi preparación no solo facilitó mi camino, sino que demostraron la fe inquebrantable que siempre tuviste en mi potencial y en tu niña consentida.

A mi hermana mayor Elizabeth y su esposo Johan, quienes han sido mi inspiración, mi guía y el refugio incondicional al que siempre puedo volver; este triunfo es el reflejo de su amor, su entrega y sus regaños. A mis hermanos Carlos y Wendy por ser mi certeza de siempre y el apoyo silencioso pero inquebrantable que me ha acompañado a lo largo de toda mi vida. A mis sobrinos por ser esa alegría y por siempre entregarme ese amor fraternal que me inspiran a dar todo por ellos.

A Jhonatan mi mejor amigo por estar cuando todo se ponía difícil, por los incontables abrazos por siempre escuchar mis frustraciones y siempre celebrar cada logro así sea pequeño, por sus consejos, por esa persona con la que podía llorar y reír, por cuidarme y siempre ser ese apoyo incondicional que nunca me dejó dudar de mí misma.

A Genessis y Mauro por transformar el peso del camino en risas compartidas, por estar en el día a día y por recordarme siempre que en cada momento de oscuridad siempre estará su luz acogedora, por ser más que mis amigos; gracias por ser esa

calma y por su paciencia infinita por creer en mí cuando yo no lo hacía, por empujarme a seguir adelante cuando el cansancio me ganaba y por demostrarme lo que significa una amistad real, sincera y dispuesta a sostener en las buenas y en las malas.

A mi gata, mi pequeña compañera, mi testigo silenciosa de tantas noches, que con su presencia serena y su calidez lleno de paz y alegrías mis madrugadas por darme su amor y consuelo a pesar del silencio.

También a todos mis amigos que aparecieron en toda mi vida universitaria por aquellos que fueron motivos de risas y anécdotas que quedaran en mi corazón, esos amigos que fueron una red invisible y acompañaron en cada paso. Así mismo a esa persona especial que llegó en el instante para encender la luz cuando las fuerzas faltaban, por brindarme tu apoyo el cual fue clave para cruzar esta meta por esas huellas que dejaste y quedaran grabadas con profunda gratitud en el final de este ciclo.

Con todo mi cariño, amor y gratitud a todos ustedes que de una forma u otra sostuvieron mi mundo mientras yo construía este sueño: gracias. Este logro no solo me pertenece a mí, es el reflejo de haber tenido la fortuna de caminar junto a las mejores personas. Lo logramos.

Alejandra Cusangua

ÍNDICE

RESUMEN	16
ABSTRACT	17
INTRODUCCIÓN	18
I. EL PROBLEMA	19
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. JUSTIFICACIÓN	20
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	21
1.4.1. Objetivo General	21
1.4.2. Objetivos Específicos	21
1.4.3. Preguntas de Investigación	22
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	23
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	23
2.2. MARCO TEÓRICO	24
2.2.1. Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	24
2.2.2 Clasificación taxonómica	25
2.2.3. Composición química de la papa	25
2.2.4. Importancia industrial de la papa	26
2.2.5. Aplicaciones alimentarias de la papa	26
2.3. Almidón de papa	26
2.3.1. Definición de almidón	26
2.3.2. Estructura química del almidón	27
2.3.3. Estructura granular del almidón de papa	28
2.3.4. Propiedades fisicoquímicas del almidón de papa	28
2.3.5. Propiedades funcionales del almidón nativo	29
2.4. Modificación de almidones	29

2.4.1. Concepto de modificación de almidones.....	29
2.4.2. Objetivos de la modificación del almidón	29
2.4.3. Métodos de modificación.....	30
2.4.4. Ventajas de la modificación física frente a otros métodos	31
2.5. Tratamiento hidrotérmico (Heat Moisture Treatment, HMT)	31
2.5.1. Definición del tratamiento HMT	31
2.5.2. Fundamento del proceso.....	32
2.5.3. Parámetros que influyen en el HMT.....	32
2.5.4. Cambios estructurales inducidos por HMT	33
2.5.5. Efecto del HMT sobre las propiedades funcionales del almidón	34
2.5.6. Aplicaciones del almidón modificado por HMT en alimentos.....	34
2.6. Propiedades funcionales evaluadas en almidones modificados	35
2.6.1. Solubilidad.....	35
2.6.2. Poder de hinchamiento.....	36
2.6.3. Capacidad de absorción de agua.....	37
2.6.4. Capacidad de retención de agua	37
2.6.5. Estabilidad térmica.....	37
2.7. Masa madre	38
2.7.1. Definición de masa madre.....	38
2.7.2. Historia y evolución de la masa madre	38
2.7.3. Microbiota presente en la masa madre	39
2.7.4. Proceso de fermentación.....	40
2.7.5. Beneficios tecnológicos de la masa madre	40
2.7.6. Beneficios nutricionales de la masa madre.....	40
2.8. Panificación	41
2.8.1. Concepto de pan	41
2.8.2. Ingredientes básicos del pan.....	41
2.8.3. Etapas del proceso de panificación	42

2.8.4. Factores que afectan la calidad del pan	43
2.9. Gluten y su función en la panificación.....	43
2.9.1. Definición de gluten	43
2.9.2. Composición del gluten	43
2.9.3. Formación de la red de gluten.....	44
2.9.4. Funciones tecnológicas del gluten en el pan	44
2.9.5. Limitaciones asociadas al consumo de gluten.....	45
2.10. Productos de panificación bajos en gluten	45
2.10.1. Definición de productos bajos en gluten.....	45
2.10.2. Tendencias actuales de consumo	45
2.10.3. Desafíos tecnológicos en la reducción de gluten.....	46
2.10.4. Ingredientes sustitutos del gluten	46
2.11. Aplicación de almidones modificados en productos panificados	47
2.11.1. Uso de almidones modificados en panificación	47
2.11.2. Efectos sobre la textura.....	47
2.11.3. Efectos sobre la humedad	48
2.11.4. Efectos sobre el volumen específico	48
2.11.5. Efectos sobre la aceptabilidad sensorial	48
III. METODOLOGÍA	50
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	50
3.1.1. Enfoque	50
3.1.2. Tipo de Investigación	50
3.2. HIPÓTESIS	50
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	50
3.3.1. Definición de variables	50
3.3.2. Operacionalización de variables	51
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	53
3.4.1. Métodos	53

3.4.2. Características fisicoquímicas.....	57
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	65
3.5.1. Diseño experimental.....	65
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
4.1. RESULTADOS.....	68
4.1.1. Determinación de la solubilidad y poder de hinchamiento del almidón de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).	68
4.1.2. Análisis fisicoquímico, reológico, microbiológico y sensorial del pan de masa madre con adición de almidón modificado de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).	69
4.2. DISCUSIÓN	80
4.2.1. Análisis fisicoquímico, reológico, microbiológico y sensorial del pan de masa madre con almidón modificado.....	80
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
5.1. CONCLUSIONES.....	100
5.2. RECOMENDACIONES	101
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
VII. ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño y operacionalización de variables	52
Tabla 2. Escala de valores de aceptabilidad	65
Tabla 3. Porcentajes de la formulación del pan de masa madre	66
Tabla 4. Formulación pan de masa madre.....	67
Tabla 5. Resultados solubilidad almidón	68
Tabla 6. Resultados poder de hinchamiento	68
Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para pH	69
Tabla 8. Comparación de Dunn-Bonferroni.....	69
Tabla 9. Resultado ANOVA para acidez	69
Tabla 10. Prueba de Tukey para acidez	70
Tabla 11. Resultados ANOVA para humedad	70
Tabla 12. Grupos homogéneos Tukey para humedad.....	70
Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis en cenizas	71
Tabla 14. Comparaciones prueba Dunn-Bonferroni.....	71
Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA.....	71
Tabla 16. Grupos homogéneos Tukey	72
Tabla 17. Prueba Kruskal-Wallis para grasa	72
Tabla 18. Comparaciones significativas de Dunn en grasa	72
Tabla 19. Prueba Kruskal-Wallis para fibra	72
Tabla 20. Análisis de varianza gluten.....	73
Tabla 21. Grupos homogéneos de Tukey para gluten	73
Tabla 22. Análisis de varianza para dureza	73
Tabla 23. Grupos homogéneos Tukey para dureza	74
Tabla 24. Análisis de varianza para elasticidad.....	74
Tabla 25. Análisis de varianza para cohesividad.....	74
Tabla 26. Análisis de varianza para masticabilidad	75
Tabla 27. Grupos homogéneos de Tukey para masticabilidad.....	75
Tabla 28. Análisis de varianza para resiliencia	75
Tabla 29. Resultados Kruskal-Wallis para C1	75
Tabla 30. Resultados ANOVA par C2.....	76
Tabla 31. Comparaciones Tukey para C2.....	76
Tabla 32. Grupos homogéneos de Tukey C3.....	76
Tabla 33. Análisis de varianza para C3	76
Tabla 34. Comparaciones significativas de Tukey Par C3.....	77
Tabla 35. Grupos homogéneos prueba Tukey par C3.....	77

Tabla 36. Resultados de ANOVA `Par C4.....	77
Tabla 37. Comparaciones significativas prueba Tukey Par C4	78
Tabla 38. Grupos homogéneos Par C4 (Tukey).....	78
Tabla 39. Resultados ANOVA Par C5.....	78
Tabla 40. Comparaciones de Tukey Par C5.....	78
Tabla 41. Grupos homogéneos de Tukey Par C5.....	79
Tabla 42. Resultados ANOVA Estabilidad	79
Tabla 43. Resultados descriptivos sensorial	79
Tabla 44. Prueba Kruskal-Wallis.....	80
Tabla 45. Análisis microbiológico pan de masa madre con almidón modificado.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de modificación de almidón de papa	54
Figura 2. Proceso elaboración pan de masa madre	56
Figura 3. Elaboración del pan de masa madre	105
Figura 4. Análisis de pH en el pan de masa madre.....	105
Figura 5. Muestras del pan en crisoles para análisis de humedad	105
Figura 6. Análisis microbiológico del pan de masa madre con almidón.....	106
Figura 7. Análisis de fibra en el pan de masa madre	106
Figura 8. Análisis de proteína en el pan de masa madre.....	106
Figura 9. Análisis sensorial del producto.....	106

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del ABSTRACT por parte de idiomas.....	104
Anexo 2. Fotografías.....	105
Anexo 3. Ficha sensorial	107

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del almidón de papa modificado en un pan de masa madre, con el fin de elaborar un producto con bajo contenido de gluten conservando sus propiedades nutricionales. La modificación de almidón se realizó a 110 °C durante 2.5 h con 25% de humedad, el cual se verificó mediante las pruebas de solubilidad y poder de hinchamiento. Así mismo se analizaron cinco niveles de incorporación de almidón (0%,5%,10%,15%,20%), trabajando con un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron que la adición de almidón modificado influyó de manera significativa en la estructura del pan. La proteína (9,79% a 7,59%), humedad (32,73% a 26,35%) y gluten (37,83 a 32,12 mg/kg) disminuyeron de forma progresiva conforme el porcentaje de incorporación aumentó, por otra parte, el contenido de fibra fue mayor en el T2 con 2,87% debido a la generación de almidón resistente durante el HMT. Las propiedades reológicas demostraron que la consistencia inicial de la masa no se vio afectada al incorporar almidón, la gelatinización y estabilidad del gel aumentaron progresivamente. La dureza fue significativa a partir de T2 sin afectar a la elasticidad ni cohesividad es decir que preservó la red viscoelástica. El pan con adición de almidón mostró parámetros fisicoquímicos dentro del rango establecido conforme lo dicta la normativa NTE INEN 2945.2016. Los análisis microbiológicos confirmaron la inocuidad del producto según la norma NTE INEN 616. Sensorialmente el T4 obtuvo la mayor aceptabilidad, sin embargo, el tratamiento T2 (10%) fue el más adecuado y teniendo la mejor formulación al presentar una mayor cantidad de fibra, reducción de gluten y menor impacto sobre la calidad proteica siendo la mejor alternativa para el desarrollo de pan de masa madre bajo en gluten.

Palabras Claves: almidón modificado, tratamiento calor humedad, gluten reducido, pan de masa madre,

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the effect of modified potato starch on sourdough bread, with the goal of producing a low-gluten product while preserving its nutritional properties. Starch modification was carried out at 110 °C for 2.5 h at 25% moisture, which was verified through solubility and swelling power tests. Five levels of starch incorporation (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) were analyzed using a completely randomized design with three replicates. The results showed that the addition of modified starch significantly influenced the bread's structure. Protein (9.79% to 7.59%), moisture (32.73% to 26.35%), and gluten (37.83 to 32.12 mg/kg) decreased progressively as the percentage of incorporation increased. Furthermore, the fiber content was higher in treatment T2 (2.87%) due to the generation of resistant starch during the HMT (Heat-Moisture treatment). The rheological properties demonstrated that the initial consistency of the dough was not affected by the addition of starch; gelatinization and gel stability increased progressively. Hardness was significantly increased from T2 onward without affecting elasticity or cohesiveness, meaning the viscoelastic network was preserved. The bread with added starch showed physicochemical parameters within the established range according to standard NTE INEN 2945.2016. Microbiological analyses confirmed the product's safety according to standard NTE INEN 616. Sensory evaluation showed the highest acceptability, however, Treatment T2 (10%) was the most suitable and had the best formulation, presenting a higher fiber content, reduced gluten, and less impact on protein quality, making it the best alternative for developing low-gluten sourdough bread.

Keywords: modified starch, heat and moisture treatment, reduced gluten, sourdough bread.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población con trastornos asociados a la ingesta de gluten, como la enfermedad celiaca, la sensibilidad al gluten no celiaca y varias alergias alimentarias, ha impulsado la demanda creciente de productos de panificación con menor contenido de gluten. Sin embargo, eliminar o disminuir el gluten constituye un reto tecnológico para la industria panadera, ya que esta red proteica es la que proporciona estructura, elasticidad y capacidad de retener gases, cualidades que determinan la calidad. La papa (*Solanum tuberosum*) es uno de los principales cultivos a nivel mundial y una importante fuente de almidón, ya que posee propiedades funcionales en sistemas alimentarios. Este puede ser sometido a procesos de modificación física hidrotérmica (HMT). Para mejorar sus propiedades como la estabilidad térmica, la capacidad de absorción de agua y el comportamiento reológico. Estas modificaciones amplían su uso en productos de panadería para reducir el contenido de gluten.

Por otra parte, el pan de masa madre es un pan tradicional que ha ganado importancia por sus características nutricionales y la facilidad de digestión del mismo. El proceso de fermentación natural mejora dichas características y ayuda a la degradación de proteínas de gluten convirtiéndolo en un producto con propiedades funcionales. La incorporación de almidón de papa modificado en la formulación del pan de masa madre, permite elaborar un producto con menos contenido de gluten, puesto que produce cambios físicos y sensoriales. Asimismo, los almidones modificados físicamente tienden a presentar mejores características tecnológicas evitando el uso de aditivos químicos.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del almidón de papa modificado (*Solanum tuberosum*), obtenido mediante el método HMT aplicado en un pan de masa madre como alternativa baja en gluten, este estudio busco determinar la influencia de la sustitución parcial de la harina de trigo por almidón modificado, en el cual se analizó las propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales, a razón de desarrollar una opción de panificación que permita responder a las crecientes demandas de productos funcionales que no pierdan sus características tradicionales.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la antigüedad el consumo de pan representa una práctica ancestral en las diferentes culturas alrededor del mundo. A pesar de ello, la presencia de gluten implica un reto significativo para individuos con sensibilidad al gluten o enfermedades celíacas, debido a que es una patología multisistémica de origen inmunológico, la cual afecta al 1% de la población mundial. Por lo tanto, es una inquietud que necesita respuesta en el sector de la alimentación con el objetivo de encontrar alternativas seguras y nutritivas para garantizar la percepción de bienestar y digestibilidad (Vuletić et al., 2022).

En la elaboración del pan, la aplicación de la masa madre, una combinación fermentada de harina y agua, ha emergido como una opción por sus ventajas sensoriales y nutricionales. Es un proceso natural que implica la fermentación mediada por levaduras y bacterias lácticas; incrementa la textura, sabor y vida útil del pan. De igual manera, esta fermentación disminuye el contenido de gluten, mejorando la digestibilidad del pan y favoreciendo a individuos con enfermedades vinculadas a este (De Bondt et al., 2024).

Sin embargo, la harina de trigo es rica en gluten, proteína importante para el pan. Se encarga de dar elasticidad y volumen al pan. Pese a ello, muchas personas no pueden consumir gluten, así que es necesario desarrollar alternativas que no sean dependientes de esta proteína. Por eso, se buscan ingredientes que sustituyan al gluten pero que no alteren las propiedades reológicas y sensoriales del pan (Culetu et al., 2021).

Asimismo, (Culetu et al., 2021) mencionan que los anti nutrientes presentes en harinas como el ácido fítico, taninos e inhibidores de enzimas representan un desafío para la biodisponibilidad de nutrientes esenciales, como son el hierro, zinc y calcio. Esto por su capacidad de formar complejos insolubles en el tracto digestivo, lo que tiende a afectar potencialmente la salud nutricional de los consumidores (Chondrou et al., 2024).

Por otra parte, la conservación del pan de masa madre se ve afectada por la retrogradación acelerada del almidón que provoca el endurecimiento de la miga, la pérdida de humedad y el riesgo de desarrollo microbiano, afectando la calidad y vida útil del producto (Mohammadi-Moghaddam et al., 2024).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo influye la adición de almidón de papa modificado en las características reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La industria alimentaria ha estado en constante innovación de productos alternativos, debido a las exigencias del consumidor por opciones saludables y sostenibles que garanticen su bienestar. En este sentido, el pan de masa madre ha sido de interés gracias a sus beneficios digestivos y características sensoriales, lo que lo diferencia de los panes convencionales, debido a su proceso de fermentación natural. Es así que la demanda de opciones bajas en gluten ha generado la exploración de ingredientes que incrementen la calidad del producto sin alterar su aceptabilidad.

La papa (*Solanum tuberosum*) es una importante fuente de almidón, con una concentración que alcanza valores superiores al 16-20% de manera fresca (Tong et al., 2023). En comparación al maíz (*Zea mays*) que llega a valores del 70-80% en endospermo seco (Tong et al., 2023). Pese a ello, el almidón de maíz ha sido utilizado en la industria alimentaria en gran escala, por su disponibilidad y rendimiento elevado.

El almidón de papa, al presentar una estructura granular amplia y mayor capacidad de absorción de agua, con relación al maíz, beneficia la retención de humedad, puesto que mejora la textura de la miga en productos horneados; al presentar mayor contenido de amilopectina, ofrece masas más suaves y extensibles.

La incorporación de almidón modificado de papa en la industria no solo puede beneficiar a las comunidades agrícolas, sino que también genera un impacto positivo con valor agregado al darle uso en formulaciones innovadoras como el pan de masa madre bajo en gluten.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), establece normativas para la producción de alimentos adecuados para personas con intolerancia al gluten.

El almidón de papa modificado sin gluten puede ser una alternativa parcial a la harina de trigo para la elaboración de pan. Es por eso por lo que se empleará almidón de papa modificado mediante métodos físicos que mejorarán la estabilidad al calor, la capacidad de hincharse y la textura en productos horneados que tienen poco gluten. (Tong et al., 2023)

La combinación de masa madre y almidón de papa modificado ofrece una solución innovadora para desarrollar un pan bajo en gluten que mantenga sus características sensoriales y nutricionales.

Es por eso por lo que la susceptibilidad de estas condiciones hace necesario explorar métodos que garanticen su conservación durante el proceso de fabricación. La estabilidad de estos componentes es crucial para que el producto no solo mantenga su calidad sensorial, sino que también ofrezca beneficios que contribuyan a la reducción de enfermedades celiacas y garantice el bienestar general (Biney et al., 2026).

Por ende, el desarrollo de pan de masa madre utilizando almidón de papa modificado se presenta como una alternativa viable y prometedora, puesto que una fermentación natural con masa madre ha demostrado ser beneficiosa al reducir la cantidad de gluten en el pan, mejorando su digestibilidad.

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el impacto del almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*) en la elaboración de un pan de masa madre como alternativa baja en gluten

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar el efecto del almidón de papa modificado sobre el proceso de producción de pan de masa madre.
- Determinar la formulación para la elaboración del pan de masa madre con almidón de papa.
- Evaluar parámetros reológicos, fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales del pan de masa madre.

1.4.3. Preguntas de Investigación

1. ¿Cómo afecta el almidón de papa modificado al proceso de producción de pan de masa madre?
2. ¿Cuál es la mejor formulación para lograr un pan de masa madre con almidón de papa modificado?
3. ¿Cuáles son los efectos del almidón de papa modificado en las propiedades reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

(Tong et al., 2023) Realizaron una revisión exhaustiva sobre las propiedades fisicoquímicas, modificaciones y aplicaciones del almidón de diversas fuentes botánicas. Dentro del análisis comparativo, se destaca especialmente el almidón de papa, el cual se caracteriza por su alto contenido de amilosa (aproximadamente 29,3%) y una elevada cristalinidad del tipo B (45,9%), lo que influye directamente en sus propiedades funcionales. Los autores indican que el almidón de papa presenta una elevada capacidad de hinchamiento, buena claridad en pasta y una menor retrogradación en comparación con otros almidones, debido a la presencia de mono ésteres fosfato en su estructura. Estas características lo hacen particularmente útil en productos que requieren alta viscosidad, buena transparencia y estabilidad a bajas temperaturas. Asimismo, se resalta que, frente a los almidones de cereales, el almidón de papa muestra una mayor transmitancia (hasta 96%), siendo ideal para aplicaciones en alimentos como salsas, postres, productos congelados.

(Fonseca et al., 2021) desarrollaron una revisión sobre las modificaciones físicas de almidón mediante calor-humedad (HMT) y annealing (ANN), considerando sus aplicaciones en la industria alimentaria. El análisis recopiló diferentes investigaciones en las que el HMT se aplicó a temperaturas de 90 a 120 °C con contenidos de humedad limitados (10–30%), mientras que el ANN se efectuó bajo condiciones de elevada humedad y temperaturas inferiores al punto de gelatinización. Los autores concluyeron que el HMT incrementa la estabilidad térmica, eleva las temperaturas de gelatinización y favorece la formación de almidón resistente, mientras que el ANN homogeniza la estructura interna de los gránulos y disminuye la viscosidad. Además, se resalta que estas modificaciones físicas generan almidones con propiedades tecno funcionales de interés para la elaboración de panes, salsas y formulaciones con bajo índice glucémico.

(Biney et al. 2026) realizaron una revisión sobre el uso del almidón y sus derivados en sistemas libres de gluten, con el propósito de analizar su funcionalidad en productos panificados. Para ello, recopilaron y analizaron diversos estudios científicos sobre la

modificación del almidón, su estructura, sus propiedades de gelatinización y su impacto en la reología y textura del pan sin gluten. Los autores encontraron que el almidón desempeña un papel crucial en la sustitución de la red de gluten, proporcionando viscosidad y estabilidad a la masa, aunque su comportamiento depende de la fuente botánica y el tipo de modificación aplicada. Se concluyó que los almidones modificados, como los pregelatinizados y fosfatados, mejoran la retención de agua, la expansión del pan y su textura, lo que los convierte en alternativas viables para optimizar la calidad de productos libres de gluten.

(Onyango et al. 2011) llevaron a cabo un estudio para evaluar la influencia del almidón de diferentes fuentes botánicas, como maíz, papa, yuca y arroz, en la calidad del pan de sorgo libre de gluten. Para ello, desarrollaron formulaciones con distintas proporciones de almidón y sorgo (10:90, 20:80, 30:70, 40:60 y 50:50) y analizaron las propiedades reológicas de la masa y las características del pan final. Utilizaron métodos de evaluación textural para medir la firmeza, cohesividad, elasticidad y resiliencia del pan, además de realizar análisis de almacenamiento para determinar cambios en la calidad del producto a lo largo del tiempo. Los resultados indicaron que la incorporación de almidón mejoró significativamente la textura del pan, reduciendo su firmeza y aumentando la cohesividad, especialmente cuando se emplearon almidones de yuca y arroz. Asimismo, observaron que los panes con mayor proporción de almidón retuvieron mejor sus propiedades texturales tras el almacenamiento, destacando el almidón de yuca como el más efectivo para mejorar la estructura del pan sin gluten.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Papa (*Solanum tuberosum*)

2.2.1.1. Origen e importancia económica

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta herbácea perenne perteneciente a la familia Solanaceae, originaria de los Andes sudamericanos, específicamente de las regiones altiplánicas comprendidas entre Perú y Bolivia, donde fue domesticada hace aproximadamente 8.000 años (Aversano et al., 2022). Desde su introducción en Europa durante el siglo XVI, la papa se convirtió en uno de los cultivos más importantes del mundo, adaptándose a una amplia variedad de climas y condiciones edáficas.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), la papa ocupa el cuarto lugar a nivel mundial entre los

cultivos alimentarios, después del trigo, el maíz y el arroz. La producción mundial supera los 370 millones de toneladas métricas anuales, con China, India, Rusia y Ucrania como principales productores. En América Latina, países como Perú, Ecuador y Colombia destacan tanto en producción como en diversidad genética del tubérculo.

La papa constituye una fuente fundamental de energía, carbohidratos y micronutrientes para millones de personas en el mundo, especialmente en regiones en desarrollo. Su importancia económica abarca desde la producción primaria agrícola hasta su procesamiento industrial, donde se destina a la fabricación de almidones, harinas, snacks, papas fritas y múltiples derivados de alto valor agregado ((FAO, 2024); (Tong et al., 2023).

2.2.2 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de la papa es la siguiente. Género: *Solanum*; Especie: *Solanum tuberosum* L. (Hijmans & Spooner, 2001). Dentro de esta especie se reconocen dos subespecies principales: *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*, cultivada ampliamente en regiones templadas, y *S. tuberosum* subsp. *andigenum*, predominante en los Andes. Actualmente existen más de 4.000 variedades nativas registradas, con características morfológicas, sensoriales y composicionales muy diversas.

2.2.3. Composición química de la papa

La composición química de la papa varía según la variedad, condiciones de cultivo, madurez y procesamiento postcosecha. No obstante, en términos generales, el tubérculo contiene entre 75 y 80% de agua, 15–20% de carbohidratos (principalmente almidón), 2% de proteínas, 0,1% de grasas, 1–2% de fibra dietética y 1% de cenizas (Tong et al., 2023); (Belitz et al., 2009a). El almidón representa el componente mayoritario en base seca, constituyendo entre el 65 y 80% del peso seco total.

En cuanto al perfil vitamínico, la papa es fuente relevante de vitamina C, vitaminas del complejo B (especialmente B6 y ácido fólico), y en menor medida vitamina E. Sus minerales más abundantes son potasio, fósforo, magnesio y hierro. Estos atributos nutricionales, combinados con su bajo contenido graso, posicionan a la papa como un alimento de alta densidad energética y nutricional (Belitz et al., 2009a).

2.2.4. Importancia industrial de la papa

La industria procesadora de papa ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, impulsada por la demanda de alimentos convenientes, funcionales e innovadores. Los principales productos industriales derivados de la papa incluyen: almidón nativo y modificado, harina de papa deshidratada, copos, papas prefritas congeladas, papas fritas tipo snack, fécula de papa para uso en industria papelera y textil, y más recientemente, proteínas de papa para aplicaciones funcionales (Tong et al., 2023).

El almidón de papa destaca especialmente por sus propiedades reológicas únicas: alta viscosidad de pasta, baja temperatura de gelatinización, granos de gran tamaño y bajo contenido de lípidos y proteínas, características que lo diferencian de los almidones de cereales y lo hacen especialmente valioso en aplicaciones alimentarias que requieren texturas suaves, transparencia y estabilidad (Tong et al., 2023).

2.2.5. Aplicaciones alimentarias de la papa

Además de su consumo directo como hortaliza cocida, la papa y sus derivados tienen una amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria. El almidón de papa se emplea como espesante, gelificante, ligante y estabilizador en sopas, salsas, rellenos, productos cárnicos, embutidos y platos preparados. La harina de papa se usa en la formulación de panes, galletas, pastas y productos extruidos (Tong et al., 2023). En panificación, la incorporación de papa o sus derivados mejora la suavidad, esponjosidad y vida útil de los productos, además de aportar valor nutricional adicional. En productos sin gluten, el almidón de papa constituye uno de los ingredientes base más utilizados debido a sus propiedades funcionales favorables (Culetu et al., 2021).

2.3. Almidón de papa

2.3.1. Definición de almidón

El almidón es el principal polisacárido de reserva de las plantas superiores y el carbohidrato más abundante en la dieta humana después de la celulosa. Químicamente, es un polímero de glucosa constituido por dos fracciones estructurales distintas: la amilosa y la amilopectina, que se organizan en gránulos semicristalinos de tamaño y forma variables según la especie botánica de origen

(Tong et al., 2023). Los gránulos de almidón se sintetizan en los plastidios de células vegetales especializadas y son insolubles en agua fría, aunque se gelatinizan al calentarse en presencia de humedad suficiente.

Desde el punto de vista tecnológico, el almidón es un ingrediente multifuncional de alta relevancia en la industria alimentaria, ya que cumple funciones de espesamiento, gelificación, adhesión, estabilización y formación de películas, entre otras (Tong et al., 2023); (Tong et al., 2023).

2.3.2. Estructura química del almidón

2.3.2.1. Amilosa

La amilosa es la fracción lineal del almidón, compuesta por unidades de α -D-glucopiranosas unidas mediante enlaces glucosídicos α -(1 $\rightarrow$ 4), con ramificaciones muy escasas (menos del 1% de los enlaces son α -(1 $\rightarrow$ 6)). Su grado de polimerización varía entre 500 y 5.000 unidades de glucosa, lo que le confiere una masa molecular de aproximadamente 10^5 – 10^6 Da (Tong et al., 2023). Estructuralmente, la amilosa tiende a adoptar una conformación helicoidal, lo que favorece la formación de complejos con lípidos, yodo y otras moléculas hidrofóbicas.

En el almidón de papa, el contenido de amilosa es relativamente bajo, oscilando entre el 20 y 30% del total del almidón, dependiendo de la variedad. Esta fracción influye directamente en las propiedades de gelatinización, retrogradación, formación de gel y resistencia a la digestión del almidón (He et al., 2023).

2.3.2.2. Amilopectina

La amilopectina es la fracción ramificada del almidón y constituye la mayor parte de su masa (70–80%). Está formada por cadenas de α -D-glucopiranosas unidas por enlaces α -(1 $\rightarrow$ 4) en la cadena principal y puntos de ramificación frecuentes mediante enlaces α -(1 $\rightarrow$ 6), con una frecuencia aproximada de uno por cada 24–30 unidades de glucosa. Su masa molecular es enormemente superior a la de la amilosa, con valores de 10^7 – 10^9 Da (Tong et al., 2023). Esta estructura altamente ramificada, organizada en clústeres, es responsable de la arquitectura semicristalina de los gránulos de almidón y determina en gran medida sus propiedades fisicoquímicas y funcionales.

La organización de la amilopectina en los gránulos sigue un patrón de agrupamiento en lamelas cristalinas y amorfas, cuya periodicidad de aproximadamente 9–10 nm

confiere a los gránulos su difracto grama de rayos X característico, que en el almidón de papa corresponde al tipo B ((Tong et al., 2023); (Tong et al., 2023)).

2.3.3. Estructura granular del almidón de papa

Los gránulos de almidón de papa son los más grandes entre los almidones de uso comercial, con un diámetro que oscila entre 5 y 100 μm , aunque el tamaño promedio ronda los 30–40 μm (Tong et al., 2023); (Tong et al., 2023). Su forma es oval, elipsoidal o esférica, con una hilum excéntrico y marcas de crecimiento concéntricas visibles al microscopio de luz polarizada, donde exhiben la característica cruz de Malta que evidencia su organización semicristalina.

La organización interna del gránulo comprende anillos alternos de regiones amorfas y semicristalina. Las regiones cristalinas están conformadas por los clústeres de ramificación de la amilopectina empaquetados en dobles hélices, mientras que las regiones amorfas contienen la amilosa y las zonas de ramificación de la amilopectina. Esta estructura granular semicristalina confiere al almidón de papa su patrón de difracción de rayos X de tipo B, con un alto contenido de agua en los canales de la estructura cristalina (Tong et al., 2023); (Tong et al., 2023).

2.3.4. Propiedades fisicoquímicas del almidón de papa

El almidón de papa se distingue de otros almidones debido a sus propiedades fisicoquímicas singulares. Su temperatura de gelatinización es relativamente baja, con un rango de inicio entre 58 y 65 °C, lo que facilita su procesamiento a temperaturas moderadas (Tong et al., 2023). Presenta la viscosidad de pasta más alta entre los almidones comerciales, debido a su gran tamaño granular y alto contenido de amilopectina de alta masa molecular.

El almidón de papa es prácticamente libre de lípidos (< 0,1%) y proteínas (< 0,1%), a diferencia del almidón de cereales, lo que resulta en pastas claras, con escaso sabor y sin tendencia a formar complejos amilosa-lípido durante la gelatinización (Noda et al., 2007). Además, contiene grupos fosfato esterificados principalmente en la amilopectina (0,5–1 mg P/g almidón), lo que le confiere carga aniónica y contribuye a su alta viscosidad y tendencia a la repulsión inter anular, retrasando la retrogradación (Tong et al., 2023).

2.3.5. Propiedades funcionales del almidón nativo

Las propiedades funcionales del almidón determinan su comportamiento en sistemas alimentarios y su adecuación para distintas aplicaciones. El almidón nativo de papa presenta un alto poder de hinchamiento debido a la débil asociación entre sus cadenas de amilopectina, permitiendo que absorba grandes cantidades de agua durante la gelatinización (Liu et al., 1999). Esta propiedad, sin embargo, también lo hace susceptible a la ruptura granular bajo condiciones de alta temperatura, cizallamiento mecánico o pH extremos.

La retrogradación del almidón de papa es relativamente lenta comparada con almidones de cereales, principalmente debido a su perfil de amilopectina de cadenas largas y su patrón cristalino tipo B. Sin embargo, tras múltiples ciclos de congelación-descongelación, puede presentar sinéresis (expulsión de agua). Su alta claridad de pasta lo hace apropiado para aplicaciones donde se requiere transparencia, como rellenos de frutas, salsas y otros productos gelificados (Tong et al., 2023).

2.4. Modificación de almidones

2.4.1. Concepto de modificación de almidones

La modificación de almidones se define como cualquier tratamiento físico, químico, enzimático o genético aplicado al almidón nativo con el propósito de alterar una o más de sus propiedades estructurales y funcionales, haciéndolo más adecuado para aplicaciones específicas (Alcázar-Alay & Meireles, 2015b). Los almidones nativos, aunque funcionales, presentan limitaciones como inestabilidad a alta temperatura, cizallamiento y condiciones ácidas; alta tendencia a la retrogradación; pastas opacas; y propiedades reológicas inconsistentes que restringen su uso en aplicaciones industriales exigentes.

La modificación busca superar estas limitaciones, extendiendo la funcionalidad del almidón hacia aplicaciones donde el producto nativo no podría desempeñarse adecuadamente. Las modificaciones pueden ser reversibles o permanentes, y sus efectos se manifiestan a nivel molecular, supramolecular y granular (Tong et al., 2023).

2.4.2. Objetivos de la modificación del almidón

Los objetivos fundamentales de la modificación del almidón incluyen: (1) mejorar la estabilidad ante procesos tecnológicos como el calentamiento, el cizallamiento

mecánico, los ciclos de congelación-descongelación y el almacenamiento prolongado; (2) reducir la tendencia a la retrogradación y sinéresis; (3) aumentar o disminuir la viscosidad de pasta según el requerimiento; (4) mejorar la claridad de pasta y la textura de los geles; (5) incrementar la resistencia a la digestión enzimática (almidón resistente); (6) introducir grupos funcionales para aplicaciones específicas; y (7) modular las propiedades de absorción de agua y solubilidad (Tong et al., 2023; He et al., 2023).

2.4.3. Métodos de modificación

2.4.3.1. Modificación física

La modificación física comprende tratamientos que alteran las propiedades del almidón sin el uso de reactivos químicos, aprovechando condiciones de temperatura, humedad, presión o radiación. Entre los métodos físicos más empleados se encuentran el tratamiento hidrotérmico por calor-humedad (Heat-Moisture Treatment, HMT), el recocido (annealing), la extrusión termoplástica, la micronización, el tratamiento por ultrasonido, y la irradiación con microondas o rayos gamma (Alcázar-Alay & Meireles, 2015b; Culetu et al., 2021). Estos tratamientos inducen cambios en la cristalización, la arquitectura granular y la interacción entre fracciones del almidón sin romper covalentemente sus cadenas.

2.4.3.2. Modificación química

La modificación química involucra reacciones con agentes reactivos que introducen o eliminan grupos funcionales en la molécula de almidón. Los principales tipos incluyen: esterificación (acetilación, fosfatación), eterificación (hidroxipropilación, carboximetilación), reticulación o entrecruzamiento (cross-linking con trimetafosfato sódico, oxiclورو de fósforo o epóxidos), oxidación (con hipoclorito sódico o peróxido de hidrógeno) e hidrólisis ácida (He et al., 2023). La modificación química es ampliamente utilizada en la industria, pero enfrenta regulaciones crecientes en cuanto a los agentes permitidos y los residuos tolerables en alimentos.

2.4.3.3. Modificación enzimática

La modificación enzimática utiliza enzimas específicas amilasas, pululanasa, ciclodextrinas, transglucosidasa, ramificante y otras para alterar selectivamente la estructura del almidón. Esta vía permite modificaciones muy precisas, como la desramificación de la amilopectina para incrementar el contenido de almidón resistente

tipo III, la ciclización para producir ciclodextrinas, o la síntesis de almidones con perfil de digestión lenta (He et al., 2023). Su principal ventaja es la alta especificidad y la ausencia de residuos químicos; su principal limitación es el costo elevado.

2.4.4. Ventajas de la modificación física frente a otros métodos

La modificación física del almidón presenta importantes ventajas frente a los métodos químico y enzimático. En primer lugar, no implica el uso de reactivos químicos exógenos ni la generación de subproductos potencialmente perjudiciales para la salud o el medioambiente, lo que la posiciona como una alternativa más limpia y sostenible (Alcázar-Alay & Meireles, 2015b). En segundo lugar, los almidones físicamente modificados son percibidos por los consumidores como más naturales, lo que favorece su aceptación en el contexto de la tendencia de etiqueta limpia. Por lo tanto, la modificación física puede lograrse con equipos relativamente accesibles, como autoclaves, hornos de convección u otras instalaciones de procesamiento térmico, haciendo que su escalado industrial sea factible y económicamente atractivo (Subroto et al., 2022).

2.5. Tratamiento hidrotérmico (Heat Moisture Treatment, HMT)

2.5.1. Definición del tratamiento HMT

El tratamiento hidrotérmico por calor-humedad (Heat-Moisture Treatment, HMT) es un método de modificación física que consiste en someter el almidón a condiciones controladas de temperatura elevada (80–140 °C) y contenido de humedad limitado (inferior al 35% base húmeda), durante un tiempo determinado (0,5–16 horas) (Guadarrama-Lezama et al., 2016; Nguyen et al., 2020). Bajo estas condiciones, el almidón permanece en estado no gelatinizado, pero sufre reorganizaciones estructurales tanto en las regiones amorfas como cristalinas del gránulo, dando lugar a cambios significativos en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales.

Este tratamiento fue descrito inicialmente por Sair y Fetzer en la década de 1940 y ha sido ampliamente estudiado en almidones de diversas fuentes botánicas, incluyendo papa, maíz, arroz, trigo, cassava y leguminosas (Tong et al., 2023). A diferencia de la gelatinización convencional, el HMT conserva la integridad granular, produciendo un almidón que mantiene su forma, pero con propiedades funcionales sustancialmente modificadas.

2.5.2. Fundamento del proceso

El fundamento fisicoquímico del HMT reside en la movilización parcial de las cadenas de amilosa y amilopectina bajo condiciones de temperatura y humedad restrictiva. La humedad limitada actúa como plastificante, incrementando la movilidad molecular dentro del gránulo sin inducir la gelatinización completa. El calor aplicado proporciona la energía necesaria para romper las interacciones por puente de hidrógeno débiles y permite la reasociación de las cadenas poliméricas en conformaciones más estables termodinámicamente (Tong et al., 2023).

Como resultado, las cadenas de amilosa tienden a migrar hacia las zonas periféricas del gránulo y a formar complejos con los grupos fosfato del almidón de papa o con lípidos. La amilopectina experimenta una reorganización de sus dobles hélices, lo que puede ocasionar una transición del patrón cristalino tipo B (característico de almidones de tubérculos) hacia el tipo A o tipo C, dependiendo de las condiciones del tratamiento (Subroto et al., 2022; Tong et al., 2023).

2.5.3. Parámetros que influyen en el HMT

2.5.3.1. Temperatura

La temperatura es el parámetro más determinante del HMT, ya que controla la movilidad molecular y la extensión de las reorganizaciones estructurales. A temperaturas bajas (80-100 °C), los cambios son sutiles y predominan las modificaciones en las regiones amorfas; a temperaturas más altas (110-140 °C), se producen alteraciones más profundas en las regiones cristalinas, con posible conversión del patrón cristalino. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden provocar degradación térmica de las cadenas de almidón o incluso gelatinización parcial si la humedad supera el umbral crítico (Subroto et al., 2022). Para el almidón de papa, la temperatura óptima de HMT generalmente reportada en la literatura oscila entre 100 y 120 °C.

2.5.3.2. Humedad

El contenido de humedad del almidón durante el HMT determina el grado de plastificación interna del gránulo y, por ende, la extensión de la movilidad molecular. Se ha establecido que humedades entre el 20 y el 35% (base húmeda) son las que permiten el mayor rango de modificaciones sin inducir gelatinización (Subroto et al., 2022). Humedades inferiores al 20% limitan la movilidad molecular y reducen la

efectividad del tratamiento, mientras que humedades superiores al 35% pueden conducir a la gelatinización parcial de los gránulos. Para el almidón de papa, dada su baja temperatura de gelatinización, el control del contenido de humedad es especialmente crítico para evitar el colapso granular.

2.5.3.3. Tiempo de tratamiento

El tiempo de exposición al tratamiento HMT determina la extensión de los cambios estructurales. Tiempos cortos (0,5–2 h) generan modificaciones moderadas en las propiedades funcionales, mientras que tiempos prolongados (6–16 h) producen cambios más profundos en la cristalinidad, la viscosidad de pasta y la digestibilidad (Subroto et al., 2022). La relación tiempo-temperatura en el HMT sigue en gran medida el principio de equivalencia termal: un tratamiento a temperatura más alta por tiempo más corto puede producir efectos similares a uno a temperatura más baja por tiempo más largo, aunque no necesariamente idénticos. En la práctica, los tiempos de HMT reportados para almidón de papa oscilan entre 2 y 12 horas, combinados con temperaturas de 100–120 °C.

2.5.4. Cambios estructurales inducidos por HMT

El HMT induce una serie de cambios estructurales tanto a nivel molecular como supramolecular en el almidón. A nivel granular, se observa generalmente un aumento en el grado de cristalinidad relativa, evidenciado por difracción de rayos X (WAXS), como resultado de la reorganización de las dobles hélices de amilopectina en estructuras más perfectas (Tong et al., 2023). En almidones de tipo B (como el de papa), el HMT puede inducir una conversión parcial o total del patrón cristalino hacia el tipo A o C, lo que se atribuye a la redistribución del agua intercristalina bajo las condiciones de tratamiento.

A nivel molecular, el HMT favorece la asociación de la amilosa con los grupos fosfato de la amilopectina y con ella misma, formando complejos que incrementan la rigidez estructural del gránulo. Esto se traduce en una reducción del pico de temperatura de gelatinización (T_p) medido por calorimetría diferencial de barrido (DSC), en un aumento de la entalpía de gelatinización en algunos casos y en una reducción del poder de hinchamiento (Subroto et al., 2022). La morfología granular generalmente se conserva, aunque pueden observarse superficies ligeramente más rugosas o fusionadas en las condiciones más severas de tratamiento.

2.5.5. Efecto del HMT sobre las propiedades funcionales del almidón

El HMT modifica de forma significativa las propiedades funcionales del almidón de papa. En términos de comportamiento de pasta (medido con viscosímetro RVA), el HMT generalmente reduce la viscosidad máxima de pasta, la viscosidad final y el índice de retrogradación, reflejando una mayor estabilidad térmica y mecánica del gránulo (Subroto et al., 2022). Esta reducción en la viscosidad es ventajosa en aplicaciones donde se requiere fluidez controlada durante el procesamiento térmico.

En cuanto a la gelatinización (medida por DSC), el HMT típicamente aumenta la temperatura de inicio (T_o), pico (T_p) y conclusión (T_c) de gelatinización, lo que implica que el almidón modificado requiere mayor temperatura para gelatinizarse completamente; esto es atribuible a la formación de estructuras cristalinas más perfectas y estables (Subroto et al., 2022; Tong et al., 2023). Respecto a la digestibilidad, el HMT puede incrementar el contenido de almidón resistente (RS), especialmente tras múltiples ciclos de calentamiento-enfriamiento, lo que tiene implicaciones positivas para el índice glucémico de los alimentos resultantes (He et al., 2023).

2.5.6. Aplicaciones del almidón modificado por HMT en alimentos

El almidón de papa modificado por HMT ha demostrado potencial en diversas aplicaciones alimentarias que requieren estabilidad térmica, menor absorción de agua o mejora en la textura. En panificación, su uso como ingrediente parcial o total aporta mayor rigidez de miga, menor humectación excesiva y mejor conservación de la estructura durante el almacenamiento (Subroto et al., 2022). En la elaboración de productos sin gluten, el almidón modificado por HMT puede actuar como sustituto funcional de la red de gluten, contribuyendo a la cohesión de la masa y a la retención de gases durante la fermentación (Yazar, 2023).

También se han reportado aplicaciones en fideos, pastas, productos extruidos, salsas y alimentos funcionales donde se requiere almidón resistente o de digestión lenta. La modificación por HMT permite obtener un almidón con baja expansión durante la cocción, alta resistencia a la congelación-descongelación y buena compatibilidad con ingredientes de sistemas alimentarios complejos (Subroto et al., 2022).

2.6. Propiedades funcionales evaluadas en almidones modificados

2.6.1. Solubilidad

2.6.1.1. Definición

La solubilidad del almidón se define como la proporción de material que pasa a la fase acuosa durante un proceso de calentamiento en condiciones controladas de temperatura y concentración. Se expresa generalmente como el porcentaje en masa de almidón disuelto respecto al total de almidón inicial, determinado por gravimetría tras la separación del sobrenadante y el residuo granular por centrifugación (Tong et al., 2023). La solubilidad refleja la capacidad de las fracciones del almidón principalmente amilosa y fragmentos de amilopectina de baja masa molecular para difundirse fuera del gránulo durante la gelatinización.

2.6.1.2. Factores que afectan la solubilidad

La solubilidad del almidón está determinada por múltiples factores: la relación amilosa/amilopectina, ya que la amilosa, siendo lineal y más soluble, tiende a lixiviarse más fácilmente; la temperatura, pues a mayor temperatura, mayor es la movilización de cadenas y la disrupción de la estructura cristalina; el grado de asociación intermolecular (cristalinidad), que actúa como barrera a la difusión de cadenas hacia la fase acuosa; y la presencia de grupos cargados, como los fosfatos del almidón de papa, que favorecen la hidratación y solubilidad (Tong et al., 2023; Srichuwong & Jane, 2007). Modificaciones previas del almidón tanto físicas como químicas alteran significativamente estos factores.

2.6.1.3. Efecto del HMT sobre la solubilidad

El HMT generalmente reduce la solubilidad del almidón de papa en comparación con el almidón nativo. Esta reducción se atribuye al incremento en la cristalinidad y al fortalecimiento de las interacciones entre cadenas de amilosa y amilopectina durante el tratamiento, lo que dificulta la difusión de las cadenas hacia la fase acuosa durante el calentamiento (Subroto et al., 2022). La magnitud de la reducción en solubilidad depende de las condiciones del HMT: a mayor temperatura y tiempo, mayor reducción de la solubilidad. Esta propiedad es relevante en aplicaciones como salsas y sopas, donde se busca controlar la cantidad de material disuelto para evitar turbidez excesiva o pegajosidad no deseada.

2.6.2. Poder de hinchamiento

2.6.2.1. Definición

El poder de hinchamiento (swelling power) es una medida de la capacidad de los gránulos de almidón para absorber agua y expandirse cuando se calientan en exceso de agua. Se determina gravimétrica y matemáticamente como la relación entre el peso del gel hidratado (residuo granular hinchado tras centrifugación) y el peso seco del almidón original (Tong et al., 2023). Esta propiedad refleja la magnitud de la hidratación intragranular y la extensión de la disrupción de la estructura cristalina durante la gelatinización.

2.6.2.2. Factores que afectan el hinchamiento

El poder de hinchamiento del almidón está influenciado principalmente por la relación amilosa/amilopectina, dado que la amilosa actúa como agente de restricción del hinchamiento debido a su capacidad para formar asociaciones estabilizadoras con los brazos de la amilopectina; la fuerza de las interacciones intermoleculares en las regiones cristalinas del gránulo; la temperatura de calentamiento, que determina el grado de fusión cristalina; y la presencia de lípidos, proteínas u otros componentes que puedan formar complejos con la amilosa y restringir el hinchamiento (Tong et al., 2023; He et al., 2023)). El almidón de papa nativo presenta uno de los poderes de hinchamiento más altos entre los almidones botánicos comerciales, atribuible a su baja interacción amilosa-lípido y a sus grupos fosfato hidrofílicos.

2.6.2.3. Efecto del HMT sobre el poder de hinchamiento

El HMT reduce consistentemente el poder de hinchamiento del almidón de papa. Esta reducción es consecuencia del fortalecimiento de las interacciones entre cadenas de amilosa y amilopectina durante el tratamiento térmico en condiciones de humedad limitada, creando una estructura granular más rígida y resistente a la hidratación (Subroto et al., 2022). La reducción en el poder de hinchamiento puede ser deseable en aplicaciones donde una viscosidad excesiva o una textura demasiado gelatinosa son indeseables, como en productos de panadería, snacks extruidos o sistemas de encapsulación.

2.6.3. Capacidad de absorción de agua

La capacidad de absorción de agua (CAA) se refiere a la cantidad de agua retenida por el almidón en condiciones específicas de temperatura y tiempo, sin aplicar calentamiento o con calentamiento moderado. A diferencia del poder de hinchamiento, la CAA suele medirse a temperatura ambiente o ligeramente elevada y refleja principalmente la hidratación superficial e intergranular del almidón. El HMT afecta la CAA del almidón de papa dependiendo de las condiciones del tratamiento: en algunos estudios se observa reducción por el aumento de la cristalinidad; en otros, leves incrementos asociados a cambios en la porosidad granular superficial (Subroto et al., 2022). La CAA es relevante en formulaciones de pan sin gluten, donde el balance de agua disponible para la formación de la masa es fundamental para la calidad del producto final.

2.6.4. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) evalúa la habilidad del almidón cocido o gelatinizado para mantener el agua atrapada en su estructura de gel tras aplicar una fuerza centrífuga o mecánica. Esta propiedad es relevante para la predicción del comportamiento de los almidones en productos horneados y procesados térmicamente, donde la expulsión de agua (sinéresis) puede deteriorar la textura y la vida útil. El HMT, al generar una red polimérica más estructurada y resistente tras la gelatinización, tiende a mejorar la CRA del almidón de papa, especialmente en condiciones de almacenamiento prolongado o ciclos de temperatura (Subroto et al., 2022). Esta propiedad es particularmente valorada en productos de panificación donde se busca retardar el endurecimiento de la miga.

2.6.5. Estabilidad térmica

La estabilidad térmica del almidón modificado por HMT se evalúa mediante el perfil de viscosidad de pasta obtenido con el analizador de viscosidad rápida (RVA) y mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). El HMT incrementa la temperatura de gelatinización del almidón de papa (T_0 , T_p y T_c), lo que implica que el almidón modificado resiste mejor el colapso de su estructura a temperaturas de procesamiento más elevadas (Subroto et al., 2022; Tong et al., 2023). Además, la viscosidad de pastas de almidón HMT presenta menor caída durante la fase de cocción, lo que refleja una mayor resistencia mecánica de los gránulos hinchados.

Esta mayor estabilidad térmica es esencial en aplicaciones de procesamiento a alta temperatura, como el horneado, la esterilización en autoclave o la extrusión.

2.7. Masa madre

2.7.1. Definición de masa madre

La masa madre se define como un sistema de fermentación espontánea o controlada en el que harinas de cereales y agua son fermentadas por una comunidad simbiótica de bacterias ácido-lácticas (BAL) y levaduras naturalmente presentes en los cereales, el ambiente y los utensilios de fermentación (De Bondt et al., 2024). El proceso de fermentación con masa madre produce ácidos orgánicos principalmente ácido láctico y acético, CO₂, alcoholes y una diversidad de compuestos volátiles que confieren al pan propiedades sensoriales, tecnológicas y nutricionales únicas (De Bondt et al., 2024).

La masa madre puede clasificarse en tres tipos según su proceso de elaboración: Tipo I (masa madre tradicional, mantenida a temperatura ambiente mediante refrescos frecuentes, con fermentación activa continua); Tipo II (masa madre industrial, fermentada a temperaturas más altas durante tiempos prolongados con alto contenido de ácido acético, generalmente utilizada como aditivo); y Tipo III (masa madre seca, sometida a secado posterior a la fermentación para su uso como ingrediente en polvo) (De Bondt et al., 2024).

2.7.2. Historia y evolución de la masa madre

La fermentación espontánea de harinas de cereal mediante masa madre es posiblemente la biotecnología alimentaria más antigua conocida por la humanidad. Evidencias arqueológicas y escritas sitúan su uso en el antiguo Egipto, hace aproximadamente 6.000 años, donde la fermentación natural de pastas de harina era el único método para leudar el pan (De Bondt et al., 2024). Durante milenios, la masa madre fue la tecnología de panificación universal, siendo gradualmente desplazada en el siglo XX por las levaduras comerciales de *Saccharomyces cerevisiae*, que ofrecen mayor reproducibilidad, velocidad de fermentación y conveniencia industrial.

Sin embargo, en las últimas décadas ha habido un renacimiento de la panificación con masa madre impulsado por la evidencia científica sobre sus beneficios nutricionales, tecnológicos y de salud, así como por el interés de los consumidores en

productos artesanales, de larga fermentación y con mejores propiedades organolépticas (Collar & Armero, 2021; De Bondt et al., 2024).

2.7.3. Microbiota presente en la masa madre

2.7.3.1. Bacterias ácido-lácticas

Las bacterias ácido-lácticas (BAL) constituyen los microorganismos más abundantes y metabólicamente activos de la masa madre, representando entre el 90 y el 99% del microbiota bacteriano total (De Bondt et al., 2024). Los géneros predominantes incluyen *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* y *Weissella*, siendo las especies del género *Lactobacillus* (recientemente reclasificado en múltiples géneros como *Limosilactobacillus*, *Lactiplantibacillus*, *Fructilactobacillus*, entre otros) las más diversas y predominantes. Metabolizan principalmente maltosa, glucosa, fructosa y otros azúcares fermentables de la harina, produciendo ácido láctico (homofermentadoras obligadas), o una mezcla de ácido láctico, ácido acético, etanol y CO₂ (heterofermentadoras obligadas y facultativas).

La producción y proporción de ácido láctico frente a ácido acético en la masa madre (expresada como cociente fermentativo) está determinada por la especie bacteriana predominante, la temperatura, la hidratación, la frecuencia de refresco y la disponibilidad de oxígeno (De Bondt et al., 2024).

2.7.3.2. Levaduras

Las levaduras presentes en la masa madre pertenecen principalmente a las especies *Saccharomyces cerevisiae*, *Kazachstania humilis* (anteriormente *Candida humilis*), *Kazachstania milleri*, *Wickerhamomyces anomalus* y *Torulaspora delbrueckii*, entre otras (De Bondt et al., 2024). A diferencia de las BAL, las levaduras son responsables fundamentalmente de la producción de CO₂ mediante la fermentación alcohólica de azúcares, que confiere el levado de la masa, y de la generación de compuestos aromáticos como ésteres, aldehídos y alcoholes superiores que contribuyen al perfil sensorial característico del pan de masa madre.

La relación simbiótica entre BAL y levaduras en la masa madre se sostiene en parte en que las BAL consumen maltosa y producen etanol y otros compuestos que pueden inhibir microorganismos competidores pero que las levaduras adaptadas toleran, mientras que las levaduras aportan al ecosistema vitaminas B y otros nutrientes que estimulan el crecimiento bacteriano (Yazar, 2023; De Bondt et al., 2024)

2.7.4. Proceso de fermentación

El proceso de fermentación con masa madre involucra una secuencia de etapas bioquímicas coordinadas. En una primera fase, los microorganismos fermentan los azúcares disponibles en la harina, produciendo ácidos orgánicos que acidifican la masa y CO₂ que contribuye al volumen. La caída del pH activa enzimas propias del cereal (proteasas, amilasas, fitasas) y favorece la selección de las BAL acidófilas más adaptadas (De Bondt et al., 2024).

La acidificación de la masa tiene efectos estructurales importantes: reduce la fuerza de la red de gluten en trigo (por hidrólisis parcial de proteínas), modifica la hidratación de los almidones, y afecta la retención de gas. La duración de la fermentación, la temperatura y la proporción masa madre/harina nueva (refrescado) determinan el nivel de acidez final, el perfil aromático y las propiedades reológicas de la masa (Collar & Armero, 2021).

2.7.5. Beneficios tecnológicos de la masa madre

Los beneficios tecnológicos de la fermentación con masa madre en panificación son múltiples. Las enzimas activadas durante la fermentación amilasas, proteasas, lipasas, hemicelulosas contribuyen a la modificación de la harina, mejorando la extensibilidad de la masa, la maquinabilidad y la retención de gas (De Bondt et al., 2024). La producción de exopolisacáridos (EPS) por algunas BAL heterofermentadoras actúa como agente que texturiza natural, imitando el efecto de los hidrocoloides y mejorando la retención de agua y la suavidad de la miga.

En el contexto de panificación sin gluten, la fermentación con masa madre puede compensar parcialmente la ausencia de gluten, ya que los EPS y los ácidos orgánicos producidos modifican la viscosidad de la masa y mejoran la retención de burbujas de gas, incrementando el volumen específico del pan (Collar & Armero, 2021; Yazar, 2023). Además, la acidificación retarda el crecimiento de mohos y bacterias patógenas, extendiendo la vida útil del producto.

2.7.6. Beneficios nutricionales de la masa madre

La fermentación con masa madre mejora de manera significativa el valor nutricional del pan. La activación de fitasas endógenas y bacterianas durante la fermentación reduce el contenido de fitatos antinutrientes presentes en los cereales integrales que reducen la biodisponibilidad de minerales como zinc, hierro, calcio y magnesio

incrementando la bioaccesibilidad de estos minerales en el producto final (De Bondt et al., 2024). Las BAL heterofermentadoras producen ácido fólico y otras vitaminas del complejo B, contribuyendo al perfil nutricional.

Desde la perspectiva de la salud digestiva, el pan de masa madre presenta generalmente un índice glucémico más bajo que el pan elaborado con levadura comercial, atribuible a la formación de almidón resistente durante la fermentación y el horneado, así como a los efectos de los ácidos orgánicos sobre la digestión del almidón (Collar & Armero, 2021). La fermentación prolongada también contribuye a la hidrólisis parcial de epítomos de gliadinas responsables de la respuesta inmune en individuos sensibles al gluten no celíaco, aunque no convierte el pan en apto para celíacos (De Bondt et al., 2024).

2.8. Panificación

2.8.1. Concepto de pan

El pan es un alimento elaborado a partir de una masa de harina de cereal, agua y sal con o sin agentes leudantes, fermentados o no que se somete a cocción, generalmente por horneado. Es uno de los alimentos más antiguos y ampliamente consumidos del mundo, constituyendo una fuente fundamental de carbohidratos, proteínas y micronutrientes en la dieta de numerosas culturas (Yazar, 2023). La gran diversidad de panes en el mundo refleja la variabilidad en los tipos de harina, ingredientes adicionales, procesos de fermentación y métodos de cocción empleados en distintas tradiciones culturales.

2.8.2. Ingredientes básicos del pan

Los ingredientes básicos del pan convencional son la harina de trigo, el agua, la sal y el agente leudante (levadura o masa madre). La harina de trigo aporta el gluten responsable de la estructura cohesiva de la masa y los almidones que gelatinizan durante el horneado y aportan la estructura de la miga. El agua actúa como solvente, plastificante y participante en las reacciones de gelatinización y fermentación. La sal regula la fermentación, fortalece la red de gluten y aporta sabor. El agente leudante genera el CO₂ que infla la masa y crea la estructura alveolada de la miga (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

En formulaciones sin gluten, estos ingredientes básicos se sustituyen parcial o totalmente por harinas alternativas, almidones, gomas, proteínas no gluten y otros

agentes estructurantes que buscan replicar la funcionalidad de la red proteica del gluten (Culetu et al., 2021; Yazar, 2023).

2.8.3. Etapas del proceso de panificación

2.8.3.1. Mezclado

El mezclado es la primera etapa de la panificación, en la que los ingredientes secos y líquidos se combinan de manera homogénea. Durante esta fase se inicia la hidratación de la harina y comienza la formación de la red de gluten. La duración e intensidad del mezclado afectan directamente el desarrollo de la estructura proteica y la distribución de los gránulos de almidón, agua y otros componentes (Yazar, 2023).

2.8.3.2. Amasado

El amasado es la etapa de desarrollo mecánico de la masa, durante la cual las proteínas de la harina (gliadinas y gluteninas) forman la red viscoelástica del gluten mediante el estiramiento y realineación de las cadenas proteicas. La intensidad y duración del amasado determinan las propiedades reológicas de la masa extensibilidad, elasticidad, tenacidad que a su vez influyen en la retención de gas, el volumen del pan y la textura de la miga (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

2.8.3.3. Fermentación

La fermentación es el proceso biológico mediante el cual los microorganismos leudantes levaduras y/o BAL metabolizan los azúcares fermentables de la masa, produciendo CO₂ que queda atrapado en la red de gluten (o en el equivalente estructural en masas sin gluten), generando la estructura alveolada del pan. La fermentación también modifica las propiedades reológicas de la masa, el perfil de ácidos orgánicos y compuestos aromáticos, y contribuye a la degradación parcial de fitatos y proteínas (Yazar, 2023; De Bondt et al., 2024).

2.8.3.4. Horneado

El horneado es la etapa final de la panificación, en la que la masa es sometida a temperatura elevada (generalmente 180–250 °C) en un horno. Durante el horneado ocurren simultáneamente múltiples procesos: gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, expansión final del gas atrapado, evaporación del agua, formación de la corteza por reacciones de Maillard y caramelización, y consolidación de la estructura de la miga (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

.

2.8.4. Factores que afectan la calidad del pan

La calidad del pan es el resultado de la interacción compleja de factores de materia prima, proceso y formulación. Entre los factores de materia prima, la fuerza y extensibilidad del gluten determinadas por la composición y estructura de las proteínas de la harina son los más críticos en pan de trigo (Pourmohammadi et al., 2023). En pan sin gluten, el tipo y cantidad de almidones, proteínas alternativas, hidrocoloides y agentes fermentables determinan en gran medida la calidad del producto (Culetu et al., 2021).

Entre los factores de proceso, los parámetros de fermentación (temperatura, tiempo, pH), la intensidad del amasado y las condiciones de horneado (temperatura, tiempo, humedad del horno) influyen decisivamente en el volumen específico, la textura de la miga y la cáscara, el color y el perfil sensorial del pan (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

2.9. Gluten y su función en la panificación

2.9.1. Definición de gluten

El gluten se define como la fracción proteica insoluble en agua del endospermo del trigo, formada por la hidratación y el amasado de las proteínas de almacenamiento del grano. Constituye aproximadamente el 75–85% de las proteínas totales del trigo y es el principal responsable de las propiedades viscoelásticas únicas de la masa de trigo, que permiten la retención de CO₂ durante la fermentación y la obtención de pan con miga esponjosa y bien desarrollada (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

2.9.2. Composición del gluten

2.9.2.1. Gliadinas

Las gliadinas son la fracción monomérica y soluble en alcohol del gluten, con masa molecular de 28.000–55.000 Da. Se clasifican en cuatro grupos según su movilidad electroforética: α/β -gliadinas, γ -gliadinas y ω -gliadinas, cada uno con características estructurales y funcionales distintas. Las gliadinas confieren fundamentalmente las propiedades de viscosidad y extensibilidad de la masa, es decir, su capacidad para fluir y estirarse sin romperse (Pourmohammadi et al., 2023).

Desde el punto de vista clínico y nutricional, las gliadinas especialmente las α -gliadinas contienen los epítomos inmunogénicos primariamente responsables de la

respuesta autoinmune en la enfermedad celíaca y de las reacciones de sensibilidad al trigo no celíaca (Pourmohammadi et al., 2023)

2.9.2.2. Gluteninas

Las gluteninas son polímeros de alto y bajo peso molecular (HMW-GS y LMW-GS, respectivamente) estabilizados mediante puentes disulfuro intra e intermoleculares. Las HMW-GS (masa molecular 67.000–88.000 Da) son particularmente importantes para determinar la elasticidad de la masa, ya que forman la red polimérica de mayor extensión y confieren la capacidad de recuperación elástica tras la deformación (Pourmohammadi et al., 2023). Las LMW-GS también contribuyen a las propiedades reológicas, aunque en menor grado. La calidad panadera de un trigo está fuertemente correlacionada con la composición y proporción de sus subunidades de glutenina.

2.9.3. Formación de la red de gluten

La red de gluten se forma durante el amasado a través de la hidratación de las proteínas de almacenamiento del trigo y su orientación tridimensional mediante interacciones no covalentes (enlaces hidrófobos, puentes de hidrógeno, fuerzas iónicas) y covalentes (puentes disulfuro). Las gliadinas y gluteninas, hidratadas, interactúan entre sí para formar una matriz proteica continua, viscoelástica y extensible, capaz de encapsular los gránulos de almidón y las burbujas de gas durante la fermentación y el horneado (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

La integridad y las propiedades de la red de gluten determinan directamente el volumen, la textura de la miga, la forma y el aspecto superficial del pan. Cualquier factor que debilite o interrumpa esta red como la reducción en el contenido de gluten, la adición de ingredientes que diluyan o interfieran con la proteína, o modificaciones del pH impactará negativamente en la calidad del pan convencional.

2.9.4. Funciones tecnológicas del gluten en el pan

El gluten cumple en el pan múltiples funciones tecnológicas insustituibles: actúa como agente estructurante, formando la matriz que confiere cohesión a la masa y sostiene su forma; retiene los gases producidos durante la fermentación, permitiendo el levado; contribuye a la expansión rápida durante el inicio del horneado al ser lo suficientemente extensible para acomodar la expansión gaseosa; gelatiniza junto al

almidón durante el horneado para fijar definitivamente la estructura de la miga; y aporta masticabilidad, elasticidad y textura característica al producto terminado (Yazar, 2023; Pourmohammadi et al., 2023).

2.9.5. Limitaciones asociadas al consumo de gluten

El consumo de gluten está asociado a diversas condiciones de salud que obligan a su restricción o eliminación de la dieta. La enfermedad celíaca es una enteropatía autoinmune crónica desencadenada por la ingesta de gluten en individuos genéticamente predispuestos (portadores de los haplotipos HLA-DQ2 o HLA-DQ8), caracterizada por atrofia de las vellosidades intestinales, malabsorción y síntomas sistémicos; su único tratamiento es la dieta estricta sin gluten (Yazar, 2023). La alergia al trigo es una reacción inmune mediada por IgE que puede provocar respuestas anafilácticas en casos severos. La sensibilidad al gluten no celíaca es una condición de diagnóstico reciente que agrupa a individuos que mejoran sintomáticamente al eliminar el gluten de su dieta sin presentar marcadores de celiaquía ni alergia al trigo. Estas tres condiciones, sumadas a la creciente adopción voluntaria de dietas sin gluten por motivos de salud percibida, han impulsado enormemente la demanda de productos sin o bajos en gluten (Yazar, 2023).

2.10. Productos de panificación bajos en gluten

2.10.1. Definición de productos bajos en gluten

De acuerdo con el Codex Alimentarius (Norma CODEX STAN 118-1979, revisada), los alimentos sin gluten son aquellos que contienen menos de 20 mg/kg (20 ppm) de gluten, mientras que los productos de contenido reducido en gluten no deben superar los 100 ppm. Los productos bajos en gluten se sitúan en un espectro intermedio, donde el contenido de gluten es significativamente inferior al de los productos convencionales de trigo, pero puede superar el límite de los productos estrictamente sin gluten. Estos productos están destinados a personas con sensibilidad al gluten no celíaca o con alergia al trigo leve, aunque no son aptos para celíacos (Yazar, 2023).

2.10.2. Tendencias actuales de consumo

El mercado global de productos sin y bajos en gluten ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, impulsado tanto por el diagnóstico creciente de enfermedades relacionadas con el gluten como por la adopción

voluntaria de dietas libres de gluten por razones de salud y bienestar. Se estima que entre el 0,5 y 2% de la población mundial padece enfermedad celíaca, pero el segmento de consumidores que elige activamente productos sin gluten es mucho mayor, representando en algunos mercados hasta el 10 -15% de los consumidores (Culetu et al., 2021; Yazar, 2023). Este contexto ha motivado a la industria alimentaria a invertir en el desarrollo de formulaciones de panificación sin o bajas en gluten con calidad sensorial y nutricional comparable a los productos convencionales.

2.10.3. Desafíos tecnológicos en la reducción de gluten

La reducción o eliminación del gluten en productos de panificación representa un desafío tecnológico considerable, dado el papel central de esta proteína en la estructura y calidad del pan. La ausencia de gluten resulta en masas de baja cohesión y extensibilidad, escasa retención de gas durante la fermentación, volúmenes específicos reducidos, migas densas y de poro irregular, mayor pérdida de humedad durante el horneado, aceleración del endurecimiento durante el almacenamiento, y propiedades sensoriales inferiores en términos de textura, masticabilidad y flavor (Culetu et al., 2021). Superar estos desafíos requiere la combinación inteligente de ingredientes funcionales que emulen, al menos parcialmente, la funcionalidad de la red de gluten.

2.10.4. Ingredientes sustitutos del gluten

2.10.4.1. Almidones

Los almidones de arroz, maíz, papa, mandioca, trigo desglutinado son los ingredientes base más utilizados en la formulación de panes sin gluten, aportando la mayor parte de la estructura y la textura del producto. Su gelatinización durante el horneado fija la estructura de la miga, actuando como sustituto funcional parcial del gluten. Sin embargo, los almidones nativos por sí solos producen panes con miga excesivamente compacta, poco elástica y de rápido endurecimiento (Yazar, 2023). La modificación de estos almidones ya sea química o física puede mejorar significativamente sus propiedades funcionales en el contexto sin gluten.

2.10.4.2. Hidrocoloides

Los hidrocoloides (gomas y mucílagos) son polisacáridos de alto peso molecular ampliamente empleados en panificación sin gluten como agentes viscosantes, espesantes y emulantes de la viscoelasticidad del gluten. Los más utilizados incluyen

la goma xantana, el HPMC (hidroxipropilmetilcelulosa), la goma guar, el psyllium (mucílago de *Plantago ovata*) y la carragenina (Culetu et al., 2021; Lazaridou et al., 2007). Estos hidrocoloides incrementan la viscosidad de la masa, mejoran la retención de gas y contribuyen a la suavidad de la miga, aunque su uso en exceso puede generar texturas gomosas o pastosas indeseables.

2.10.4.3. Fibras alimentarias

Las fibras alimentarias como el β -glucano de avena o cebada, la inulina, el almidón resistente, la fibra de psyllium, el salvado de arroz o el concentrado de fibra de guisante se emplean en formulaciones sin gluten tanto por sus propiedades funcionales como nutricionales. Desde el punto de vista tecnológico, algunas fibras solubles actúan como gelificantes o formadoras de red hidrogel que pueden compensar parcialmente la falta de gluten (Culetu et al., 2021). Desde el punto de vista nutricional, su incorporación mejora el perfil de fibra dietética de los panes sin gluten, que suelen ser deficientes en este nutriente en comparación con los panes integrales de trigo.

2.11. Aplicación de almidones modificados en productos panificados

2.11.1. Uso de almidones modificados en panificación

El uso de almidones modificados en panificación especialmente en formulaciones sin o bajas en gluten ha sido objeto de intensa investigación en los últimos años. Los almidones modificados ofrecen propiedades funcionales optimizadas respecto a los almidones nativos, incluyendo mayor estabilidad térmica, menor retrogradación, mejor retención de agua y perfiles de viscosidad más adecuados para las condiciones del proceso de panificación (Subroto et al., 2022). En el contexto específico del almidón de papa modificado por HMT, estudios recientes han demostrado su potencial para mejorar diversas propiedades de calidad del pan sin gluten, aunque su aplicación sigue siendo un área de investigación activa.

2.11.2. Efectos sobre la textura

La textura de la miga es uno de los atributos de calidad más críticos en panificación sin gluten. El uso de almidón modificado por HMT puede mejorar la cohesión, la elasticidad y la firmeza de la miga en comparación con el almidón nativo, al aportar una estructura gelificada más resistente y estable durante el horneado (Tong et al., 2023; Subroto et al., 2022). No obstante, los efectos sobre la textura dependen

fuertemente del nivel de sustitución y de las condiciones del HMT: concentraciones demasiado altas de almidón HMT pueden generar migas excesivamente densas, mientras que proporciones óptimas permiten obtener una miga con poro uniforme y buenas propiedades masticatorias. La combinación de almidón de papa modificado con agentes fermentantes como la masa madre ha mostrado resultados prometedores en la mejora simultánea de la textura y el flavor del pan (Yazar, 2023).

2.11.3. Efectos sobre la humedad

El contenido de humedad y la retención de agua en la miga son determinantes de la frescura, la jugosidad y la vida útil del pan. El almidón de papa modificado por HMT, al presentar mayor capacidad de retención de agua tras la gelatinización en comparación con el nativo, puede contribuir a mantener la humedad de la miga durante el almacenamiento, retardando el proceso de endurecimiento (Subroto et al., 2022). Este efecto es especialmente relevante en panes sin gluten, que tienden a secarse más rápidamente que los panes de trigo convencionales por la ausencia de la red de gluten que actúa como reservorio de agua. Sin embargo, la humedad excesiva puede afectar negativamente la estructura de la miga, por lo que la optimización del nivel de sustitución y del proceso de horneado es esencial.

2.11.4. Efectos sobre el volumen específico

El volumen específico del pan es un indicador clave de la capacidad de retención de gas durante la fermentación y el horneado, y está estrechamente relacionado con la aceptabilidad del producto. En panes sin gluten, el volumen específico es generalmente inferior al de los panes de trigo convencionales, debido a la ausencia de la red proteica que retiene el CO₂. El almidón de papa modificado por HMT puede influir positivamente en el volumen específico del pan sin gluten al proporcionar mayor viscosidad de la masa a temperaturas de fermentación, lo que mejora la retención de burbujas de gas (Culetu et al., 2021). Sin embargo, el efecto es variable y depende del nivel de modificación del almidón, la concentración empleada, y la presencia de otros ingredientes funcionales como hidrocoloides o masa madre.

2.11.5. Efectos sobre la aceptabilidad sensorial

La aceptabilidad sensorial es el criterio final de éxito de cualquier producto alimentario. Los panes elaborados con almidón de papa modificado por HMT presentan generalmente mejores atributos sensoriales color de corteza, uniformidad de miga, textura al morder y palatabilidad que los elaborados exclusivamente con

almidones nativos, aunque pueden exhibir un flavor ligeramente diferente al pan de trigo convencional (Culetu et al., 2021; Subroto et al., 2022). La combinación de almidón modificado con fermentación por masa madre es especialmente prometedora desde el punto de vista sensorial, ya que la masa madre aporta complejidad aromática, acidez equilibrada, y una miga más suave y cohesiva que contrarresta las limitaciones texturales propias de la formulación sin gluten. En conjunto, la optimización de la proporción y condiciones del almidón modificado, junto con el uso de masa madre, ofrece perspectivas sólidas para el desarrollo de panes bajos en gluten con alta aceptabilidad por parte de los consumidores

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

Esta investigación tiene un enfoque mixto, debido a que se recolectarán datos mediante pruebas de laboratorio para analizar el efecto del almidón de papa en el proceso de producción, formulación y características finales del pan de masa madre.

3.1.2. Tipo de Investigación

Se desarrolló una investigación experimental, puesto que se llevó a cabo la manipulación de variables, como la proporción de almidón de papa y condiciones de producción, con el fin de analizar su impacto en la calidad del pan de masa madre.

3.2. HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H0): el almidón de papa modificado no tiene un efecto significativo en las propiedades reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre.

Hipótesis alterna (H1): el almidón de papa modificado sí influye de manera significativa en las propiedades reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de variables

Variable independiente

- Adición de almidón de papa modificado

Variable dependiente

- Características reológicas
- Características fisicoquímicas
- Características microbiológicas
- Características sensoriales

3.3.2. Operacionalización de variables

En la tabla 1 se muestran las variables con sus respectivas dimensiones, indicadores, técnicas e instrumentos

Tabla 1. Diseño y operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
V. independiente Adición de almidón de papa modificado	Porcentaje	• 0% • 5% • 10% • 15% • 20%	• Gravimetría	• NTE INEN 2945
V. Dependiente Características reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas, sensoriales	Análisis reológico Análisis fisicoquímicos Análisis Microbiológicas Análisis Sensoriales	• Dureza, elasticidad, masticabilidad, cohesividad, resiliencia • Par C1, C2, tiempo C2, Temp C2 • pH • acidez • Humedad • Cenizas • Gluten • Proteína • Grasa • Fibra • Mohos y levaduras • <i>Aerobios mesófilos</i> • <i>E. coli</i>/coliformes • Sabor • Color • Olor • Textura • Aceptabilidad general	• Análisis de perfil de textura • Análisis Mixolab • Potenciometría • Acidez titulable • Gravimetría • Gravimetría por calcinación • Método ELISA • Método Kjeldahl • Método Soxhlet • Método Weende - Recuento microbiológico en superficie en placas Petrifilm - Pruebas de aceptación con escala hedónica	• (Acosta, 2013) • AOAC 981.12 • AOAC 943.02 • AOAC 925.10 • AOAC 930.22 • AOAC 2012.01 • AOAC 950.36 • AOAC 920.39 • AOAC 962.09 • AOAC 2014.05 • AOAC 2015.13 • AOAC 991.14 • Ficha técnica- hoja de cata

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Métodos

3.4.1.1. Descripción del proceso de modificación de almidón de papa

La modificación de almidón de papa se realizó siguiendo el método físico calor-humedad (HMT) descrito por (Fang et al., 2022), presentado a continuación.:

1. Pesado: Se realizó un pesado de 1500 g de almidón en una balanza digital de marca (Montero).
2. Mezclado: Se añadieron aproximadamente 166,2 ml de agua destilada y se homogeneizó manualmente.
3. Acondicionado: La muestra fue acondicionada hasta obtener una humedad del 25% verificada mediante un analizador de humedad con infrarrojo marca (RADWAG).
4. Trasvasado: El almidón acondicionado se traspasó a frascos autoclavables cerrados con papel aluminio.
5. Equilibrado: Los frascos autoclavables se mantuvieron 24 horas a temperatura ambiente para que la humedad se distribuya uniformemente en todos los gránulos de almidón.
6. Preparación del tratamiento HMT: Los frascos se llevaron a la estufa a una temperatura de 110 °C durante 2,5 horas.
7. Enfriado: Una vez que el tratamiento térmico finalizó, los frascos se abrieron de manera parcial para evitar la evaporación y pérdida del tratamiento y se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 2 horas.
8. Secado: Posterior a que el almidón se enfrió, se esparció en capas de 1 cm y se llevó a la estufa a una temperatura de 45 °C, hasta llegar a peso constante y reducir el contenido de humedad.
9. Molido: Las muestras se molieron en un molino de rotor para disminuir el tamaño de partícula.
10. Tamizado: se realizó en un agitador de tamices con medidas de 500 µm y 250 µm para obtener uniformidad de partículas y separar residuos.
11. Almacenado: Una vez obtenido el almidón modificado mediante HMT, se procedió a almacenarlo en recipientes herméticos para evitar la absorción de humedad hasta su posterior uso.

En la figura 1 se muestra el proceso de modificación de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) mediante el método calor-humedad (HMT).

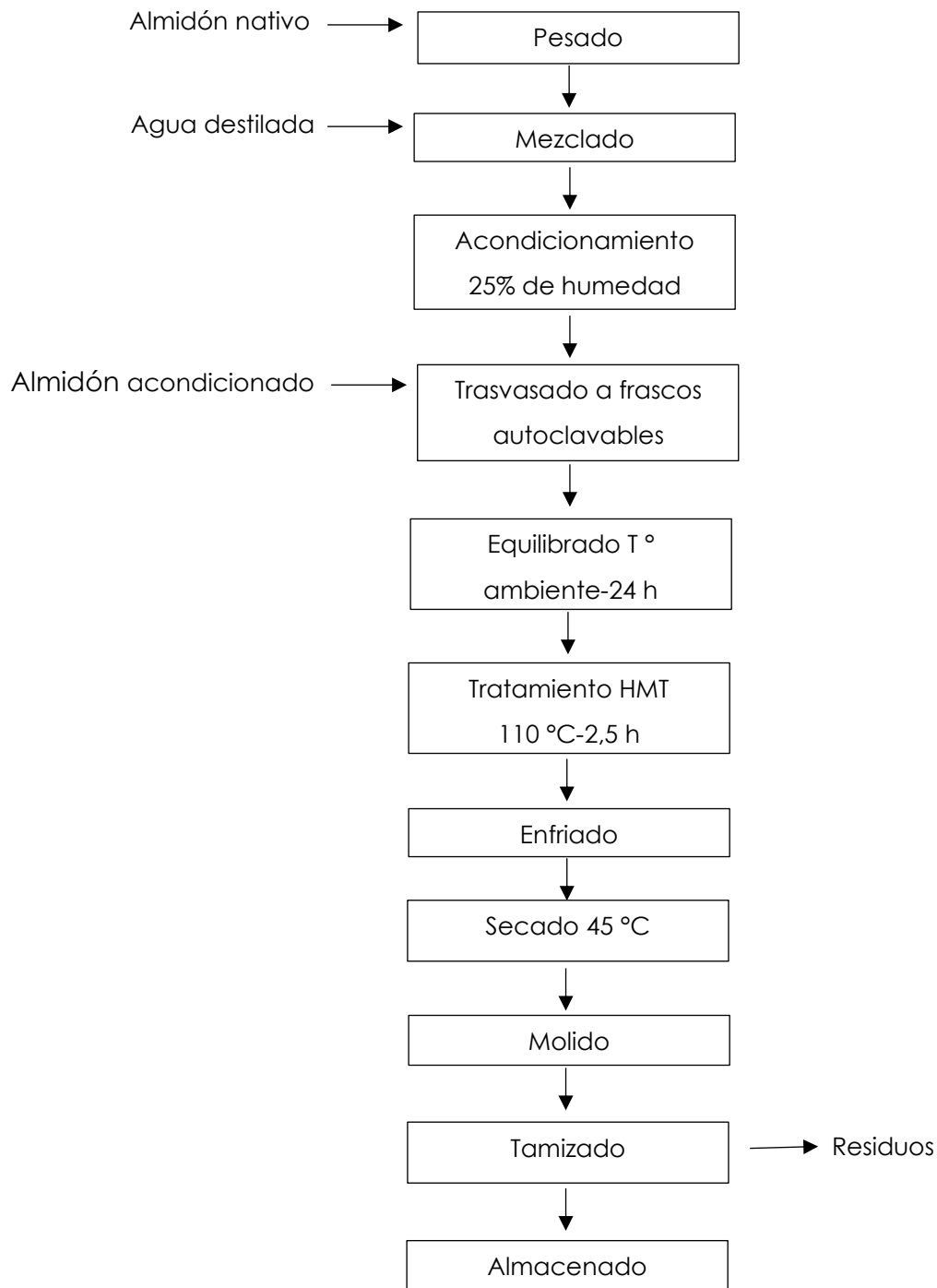


Figura 1. Proceso de modificación de almidón de papa
Fuente: (Fang et al., 2022)

3.4.1.2. Descripción del proceso de elaboración de pan de masa madre

Para la elaboración del pan se siguió la metodología de (De Bondt et al., 2024), descrita a continuación.:

1. Pesado: Se pesaron la harina de trigo, el almidón, el agua, la masa madre y la sal, de acuerdo con la formulación de cada tratamiento.
2. Formulación de tratamientos: Se establecieron diferentes porcentajes de sustitución de harina de trigo por almidón (0%, 5%, 10%, 15%, 20%).
3. Mezclado y amasado: Los ingredientes secos de cada tratamiento se añadieron a una amasadora junto con los ingredientes húmedos como la masa madre utilizada al 14% y el agua a un 36% aprox. del total de los demás ingredientes.
4. Reposado: la masa obtenida se dejó reposar 15 minutos para beneficiar la hidratación de los componentes.
5. Plisado: Una vez que transcurrieron 15 minutos, se realizaron pliegues a la masa para mejorar su estructura, esto se desarrolló en un periodo de 3 horas.
6. División y moldeado: Cuando el proceso de plisado finalizó, la masa se dividió en porciones de 750 g para la formación de panes.
7. Fermentado: Luego de haber formado las piezas se sometieron a una fermentación durante 12-18 horas, para desarrollar características sensoriales e incrementar el volumen.
8. Horneado: Posterior a la fermentación, las piezas fueron horneadas hasta obtener diferentes características de color, textura y estructura.
9. Enfriado: Los panes fueron enfriados a temperatura ambiente.
10. Almacenado: Se almacenaron en condiciones adecuadas para su posterior uso.

En la figura 2 se describe el proceso de elaboración de pan de masa madre

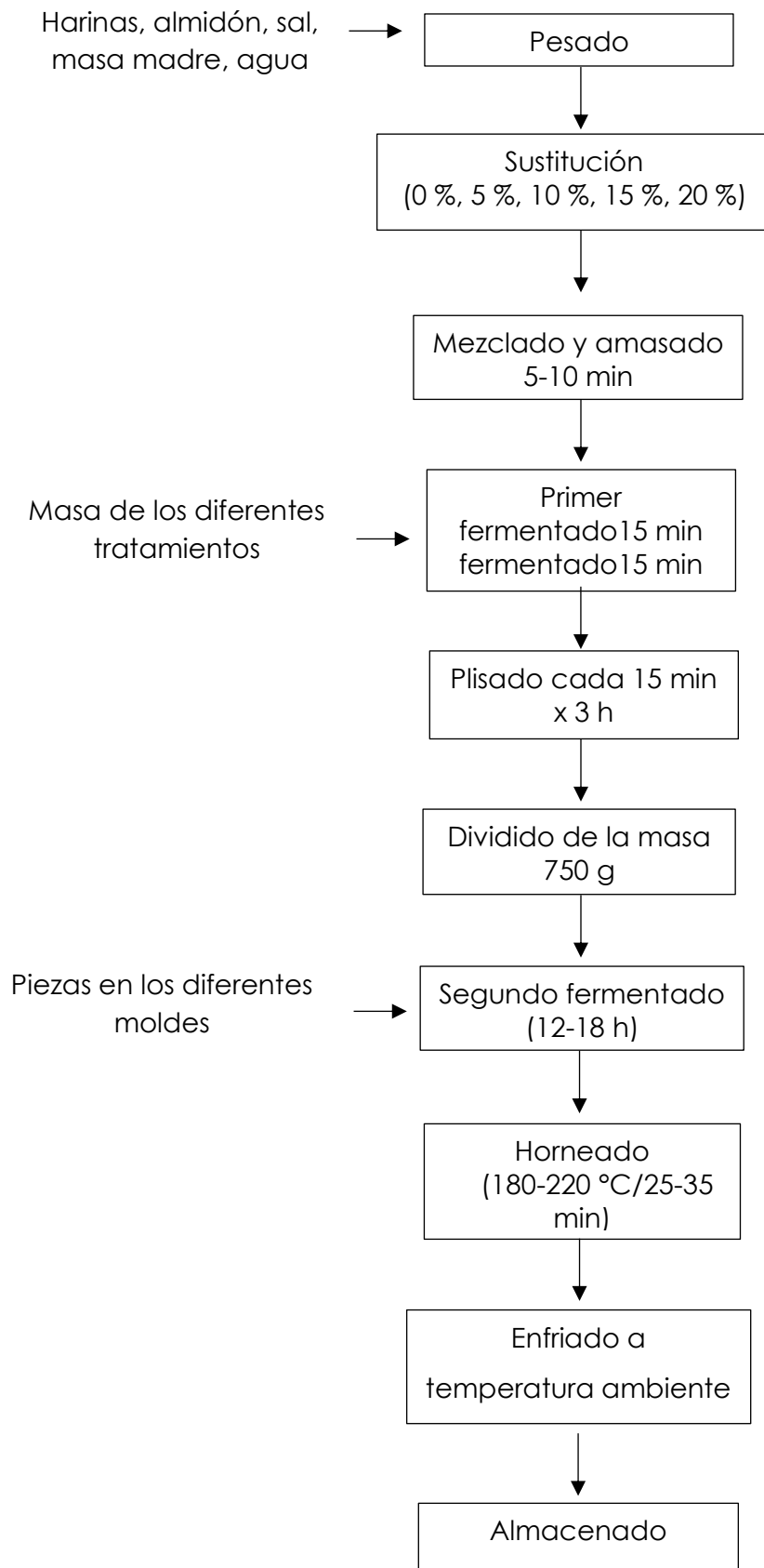


Figura 2. Proceso elaboración pan de masa madre

Fuente: (De Bondt et al., 2024)

3.4.2. Características fisicoquímicas

3.4.2.1. Determinación de pH

El pH se determinó utilizando el potenciómetro (Mettler Toledo), de acuerdo con el método oficial AOAC 981.12 AOAC, (2016).

Se realizó una dilución 1:10, se añadieron 10 gramos de muestra y 90 ml de agua destilada en un vaso de precipitación de 200 ml. Se agitó hasta homogeneizar la muestra, posteriormente, se filtraron 50 ml de la solución y se introdujo el electrodo. El potenciómetro fue calibrado previamente con una solución buffer. Los datos obtenidos se anotaron al finalizar la lectura del instrumento.

3.4.2.2. Determinación de acidez

La medición de acidez titulable se realizó mediante titulación ácido-base, bajo los lineamientos del método oficial AOAC 943.02.

Se pesaron 10 g de la muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml y se diluyeron con 90 ml de agua destilada, adicionando 3-4 gotas de fenolftaleína como indicador de viraje. La mezcla se homogeneizó y se procedió con la titulación empleando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,0995 N, la cual se dosificó gota a gota hasta alcanzar una tinción de color rosa persistente durante 30 segundos. Por último, los valores obtenidos se aplicaron en la fórmula para el cálculo final.

$$\text{Acidez titulable} = \frac{\text{NaOH consumido} * \text{Normalidad} * \text{Coeficiente láctico}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Donde:

NaOH volumen gastado (mL)

N = normalidad del NaOH

0.09 = factor del ácido láctico

m = masa de la muestra (g)

3.4.2.3. Determinación de humedad

El análisis de contenido de humedad se efectuó mediante la norma AOAC 925.10. El proceso se describe a continuación:

- Inicialmente se lavaron y secaron los crisoles de porcelana para comenzar con el análisis.

- Los crisoles se colocaron en la estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas o hasta que lleguen a peso constante.
- Finalizado el secado, utilizando pinzas metálicas, los crisoles se colocaron en un desecador para enfriarlos y pesarlos.
- Luego se añadieron 3-4 g de muestra triturada en cada crisol y se registró el peso.
- Los crisoles fueron llevados a la estufa a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 horas.
- Cuando el tiempo de secado haya transcurrido, se pasaron las muestras al desecador durante 15-20 min para su enfriamiento y registrar su peso.
- El procedimiento de secado, enfriado y pesado se realizó hasta llegar a peso constante.
- Finalmente, el porcentaje de humedad fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P1 - P2}{P1 - P0} * 100$$

Donde:

P0= Peso del crisol vacío (g)

P1 = Peso del crisol + muestra húmeda (g)

P2 = Peso del crisol + muestra seca

3.4.2.4. Determinación de cenizas

La determinación del contenido de cenizas en las muestras del pan de masa madre se realizó siguiendo la metodología AOAC 930.22. El procedimiento desarrollado fue el siguiente:

- Los crisoles de porcelana fueron lavados y secados.
- Se colocaron en la estufa durante 3 horas para eliminar posibles residuos de humedad.
- Pasado el tiempo, se retiraron utilizando pinzas metálicas y se llevaron al desecador durante 15-20 minutos para tomar su peso.
- Se pesaron 3-4 g de muestra de pan triturada en cada crisol y se tomó su peso.
- Las muestras fueron llevadas a la mufla a una temperatura de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 3 a 5 horas hasta obtener cenizas de color gris claro.

- Finalizada la incineración, los crisoles fueron retirados de la mufla y colocados en estufa durante 1 hora.
- Se dejaron enfriar en un desecador durante 30 minutos y se registró el peso final, este procedimiento se realizó hasta obtener peso constante.

El porcentaje de cenizas se calculó mediante la ecuación correspondiente

$$\%cenizas = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} * 100$$

Donde:

P0= Peso del crisol vacío (g)

P1 = Peso del crisol + muestra húmeda sin incinerar (g)

P2 = Peso del crisol + muestra incinerada (g)

3.4.2.5. Determinación de proteínas

El contenido de proteínas se realizó mediante el método Kjeldahl, siguiendo la metodología AOAC 950.36. El procedimiento fue el siguiente:

- Se pesó g de muestra de pan triturado en papel filtro y posteriormente se transfirió a un tubo Kjeldahl.
- En cada tubo se añadieron 15 ml de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) y dos pastillas catalizadoras.
- Las muestras fueron sometidas a digestión hasta obtener una coloración verde clara.
- Posteriormente los tubos fueron enfriados hasta la desaparición de vapores.
- Luego, los tubos fueron colocados en el destilador y se adicionaron 40 ml de NaOH al 40% para liberar amoníaco (NH₃).
- El NH₃ liberado fue captado en un matraz Erlenmeyer con una solución de ácido bórico (H₃BO₃) al 4%.
- Finalmente, la solución obtenida fue titulada con ácido clorhídrico 0,1 N utilizando indicador Shiro Tashiro hasta que la tonalidad cambie de verde a rosa.

El contenido de proteína se calculó siguiendo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ nitrógeno} = \frac{N * 1,4 * (V_1 - V_0)}{P \text{ muestra}}$$

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ de nitrógeno calculado} * F$$

Donde:

N = 0,10139 estándar

P.m. = Peso de la muestra en gramos

F = Factor de conversión valor 5.7

V1 = volumen de HCL consumido

V2 = volumen de HCL consumido del blanco

3.4.2.6. Determinación de fibra cruda

El contenido de fibra cruda se realizó mediante el método Weende, siguiendo la normativa AOAC 962.09. El procedimiento fue el siguiente:

- Inicialmente, la muestra de pan fue secada, molida y tamizada para obtener uniformidad de partícula.
- Se pesó 1 g de muestra en los crisoles previamente acondicionados y tarados.
- Se colocaron en el extractor de fibra y celulosa para realizar la digestión.
- En primer lugar, las muestras fueron sometidas a digestión ácida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 1,25 %), hasta que llegaron a ebullición durante 30 minutos, manteniendo el volumen constante.
- Finalizada la digestión ácida, se filtraron los crisoles y se lavaron con agua destilada caliente hasta eliminar residuos ácidos.
- El residuo obtenido fue sometido a digestión alcalina utilizando hidróxido de sodio (NaOH al 1,25 %) durante 30 minutos.
- Luego la muestra se filtró nuevamente y el residuo fue lavado con agua destilada caliente hasta neutralidad.
- Los crisoles con el residuo fueron llevados a la estufa a 105 °C hasta peso constante.
- Después del secado, las muestras fueron incineradas en una mufla a 475 °C durante 5-6 horas.
- Finalmente, los crisoles se enfriaron en un desecador durante 20-30 minutos para poder pesarlos y determinar el contenido de fibra mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{\text{Peso después de digestión} - \text{Peso de cenizas}}{\text{Peso de muestra}} * 100$$

3.4.2.7. Determinación de grasa

El contenido de grasa se realizó mediante el método de Randall, de acuerdo con la metodología AOAC 920.39 con el siguiente procedimiento:

- Se pesó 2-3 g de muestra de pan previamente molida y tamizada.
- La muestra se colocó dentro de un dedal de extracción previamente secado en estufa durante 3 horas a 100-102 °C
- Se adicionó hexano en los vasos como solvente de extracción en el equipo Soxhlet automático para realizar la extracción.
- El equipo fue programado para realizar las etapas de extracción, recuperación del solvente y secado.
- Finalizada la extracción, los recipientes colectores fueron llevados a la estufa a 105 °C por dos horas para eliminar residuos del solvente.
- Luego las muestras fueron enfriadas en el desecador para poder registrar su peso.

El porcentaje de grasa fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Grasa} = \frac{P2-P1}{m} * 100$$

Donde:

P1= peso del vaso extractor vacío

P2= peso del vaso extractor + grasa

m = peso de muestra

3.4.2.8. Determinación de gluten

La determinación de gluten se realizó mediante el método ELISA con el kit RIDASCREEN, basado en anticuerpos monoclonales R5 específicos de la gliadina, según la normativa AOAC 2012.0.

- Las muestras de pan fueron molidas y tamizadas para obtener uniformidad de partícula < 200 µm.
- Se pesaron 0,25 g de la muestra en tubos Falcon de 10 ml.
- Se adicionaron 2,5 ml de la solución Cocktail del kit.

- Las muestras fueron mezcladas y llevadas a la estufa a 50 °C durante 40 minutos.
- Después del calentamiento, se enfrió durante 1 a 3 minutos.
- Luego, se adicionaron 7,5 ml de etanol al 80 % y se agitaron durante 1 hora a temperatura ambiente.
- Se centrifugaron durante 10 minutos a más de 2500 revoluciones para separar el sobrenadante.
- El sobrenadante obtenido se transfirió a tubos Eppendorf de 2 ml.
- Los extractos se diluyeron con buffer en una proporción 1:12,5 antes de usarlos en la microplaca ELISA.

Para el ensayo inmunoenzimático:

- Se colocaron 100 µL de estándares y de muestras en los pocillos de la microplaca por triplicado.
- La placa fue incubada durante 30 minutos a temperatura ambiente.
- Se realizaron tres ciclos de lavado con el buffer de lavado.
- Se adicionaron 100 µL del conjugado enzimático a cada pocillo y se incubó nuevamente durante 30 minutos.
- Finalizada la incubación, se realizaron nuevamente tres lavados consecutivos.
- Se adicionaron 50 µL de sustrato y 50 µL de cromógeno a cada pocillo, incubando por 30 minutos en la oscuridad.
- Finalmente, se añadieron 100 µL de solución stop y la absorbancia fue medida a 450 nm utilizando un lector ELISA.
- La concentración de gluten presente en las muestras fue calculada mediante la curva de calibración obtenida a partir de los estándares del kit

3.4.2.9. Determinación de análisis reológico

El análisis reológico de la masa fue realizado en el equipo Mixolab 2, utilizando el protocolo Chopin+, con el siguiente procedimiento:

- Se prepararon las muestras correspondientes a cada tratamiento experimental.
- Se realizó un análisis mediante un analizador de humedad con infrarrojo.
- Se ajustó la hidratación al 60% considerando el contenido de humedad de cada tratamiento.
- Luego se colocó la cantidad requerida de harina en la cubeta del equipo.

- Durante el análisis, el equipo mostró los cambios reológicos relacionados con la absorción de agua, estabilidad de la masa, debilitamiento proteico y comportamiento del almidón.
- Se obtuvieron las curvas y parámetros reológicos generados automáticamente por el software del equipo Mixolab 2 Chopin+.

3.4.2.10. Determinación de perfil de textura

La determinación de la textura se realizó mediante un análisis de perfil de textura (TPA), utilizando un texturómetro (marca Brookfield Ametek CTX). El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Las muestras de pan fueron cortadas y colocadas en la base TA-SBA del equipo.
- Para el ensayo se utilizó la sonda TA4/1000 con una prueba de compresión de doble ciclo.
- Se configuró utilizando una carga/fuerza de 10 g, distancia de 1 mm/s, una velocidad de ensayo de 2 mm/s y una distancia de compresión de 5 mm para simular la acción de masticación.
- Al realizar el ensayo se registraron los diferentes valores correspondientes a dureza, elasticidad, cohesividad, resiliencia y masticabilidad.

3.4.2.11. Análisis microbiológico

Las muestras de pan fueron sometidas a análisis microbiológico de mohos y levaduras, aerobios mesófilos y *E. coli/coliformes* mediante el método de recuento en superficie utilizando placas Petrifilm. Para ellos se siguió el procedimiento descrito a continuación:

- Bajo condiciones asépticas, se pesaron $10 \pm 0,1$ g de muestra representativa de cada tratamiento realizando una dilución 1:10. Posteriormente, la muestra se colocó en una bolsa estéril para Stomacher.
- Se añadieron 90 ml de agua peptona estéril, obteniéndose la dilución inicial 10^{-1} , y se homogeneizaron en el Stomacher durante 30 segundos.
- Posteriormente, se efectuaron diluciones seriadas de acuerdo con lo requerido y la siembra se realizó por triplicado para cada tratamiento evaluado.
- Las placas pretifilm fueron previamente rotuladas con su respectiva dilución. El proceso de siembra se realizó en la cámara de flujo laminar.

- Se pipeteó 1 ml de muestra en el centro de cada placa y se distribuyó utilizando un dispensador Petrifilm para evitar la formación de burbujas.
- Luego se dejó reposar la placa durante 1 minuto para permitir la solidificación del gel.
- Las placas fueron colocadas en posición horizontal y apiladas para su incubación.
- Finalizado el tiempo de incubación correspondiente para cada microorganismo, se realizó el conteo de colonias utilizando un contador de colonias, siguiendo los criterios establecidos para cada método.

Para el recuento de mohos y levaduras se aplicó el método oficial AOAC 2014.05. Las placas Petrifilm fueron incubadas a una temperatura de 25 ± 1 °C durante 48 horas. Posteriormente, se efectuó el conteo considerando las características típicas de crecimiento de mohos y levaduras presentes en las placas.

El análisis de aerobios mesófilos se empleó el método oficial AOAC 2015.13. Las placas se incubaron a 35 ± 1 °C durante 48-72 horas, condiciones adecuadas para el desarrollo de este grupo de microorganismos. Finalizado el periodo de incubación, se realizó el recuento de las colonias desarrolladas.

Para la determinación de *E. coli* y coliformes se utilizó el método oficial AOAC 991.14. Las placas se incubaron a una temperatura de 35 ± 1 °C, durante 24 horas. El recuento de *E. coli* se efectuó considerando las colonias de tonalidad azul o rojo-azulada con presencia de gas, mientras que para coliformes se contabilizaron las colonias rojas asociadas a la formación de gas.

3.4.2.12. Análisis sensorial del producto

El análisis sensorial se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, utilizando el aula 101 para la preparación de muestras y el aula 102 para la ejecución de la evaluación sensorial. En esta actividad participaron 50 panelistas no entrenados, seleccionados con el propósito de obtener una apreciación representativa de la aceptación del consumidor.

Para iniciar la prueba, se explicó el objetivo del análisis y el procedimiento a seguir durante la evaluación, además, se brindaron indicaciones acerca de los atributos sensoriales a calificar y la manera correcta de completar la ficha de evaluación. Para el registro se utilizó una escala hedónica de 7 puntos.

En la tabla 2 se presenta la escala hedónica para el análisis sensorial

Tabla 2. Escala de valores de aceptabilidad

Categoría	Puntaje
Me disgusta mucho	1
Me disgusta poco	2
Me disgusta	3
Ni me gusta ni me disgusta	4
Me gusta	5
Me gusta poco	6
Me gusta mucho	7

Durante la evaluación, las muestras fueron presentadas de manera codificada para evitar posibles sesgos en la preparación de los panelistas. Se mantuvieron condiciones uniformes de iluminación y ambiente durante toda la prueba. Por cada degustación se solicitó enjuagar el paladar con agua para eliminar residuos de sabor y evitar interferencias en la evaluación del siguiente tratamiento.

Finalmente, los datos obtenidos fueron recopilados para su posterior análisis estadístico, permitiendo determinar y comparar la aceptabilidad y las características sensoriales de los diferentes tratamientos.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.5.1. Diseño experimental

Para la elaboración del pan de masa madre con adición de almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*), se estableció un diseño experimental completamente al Azar (DCA) con un solo factor, con cinco tratamientos y tres repeticiones.

Se utilizó el software R en el que las variables se distribuyeron en dos secciones el primero incluyó las variables fisicoquímicas y texturales, la segunda sección variables reológicas realizadas en el equipo de Mixolab. En primer lugar para cada variable se verificó previamente cumplimiento de los supuestos de normalidad mediante Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas mediante Levene ($\alpha = 0,05$). Si se cumplieron se aplicó un análisis de ANOVA y en caso de haber diferencias significativas se realizó una prueba post hoc de Tukey para identificar grupos homogéneos. En el caso de las variables que no cumplieron el supuesto de normalidad se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y en el caso de haber diferencias significativas se realizó comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Bonferroni. Para determinar el mejor tratamiento se realizó un análisis integral de todas

las variables verificando que tratamiento presento el mejor equilibrio fisicoquímico, reológico y sensorial.

En la tabla 3 se describen los tratamientos realizados en la presente investigación

Tabla 3. Porcentajes de la formulación del pan de masa madre

Tratamientos	Repeticiones	Formulación
T0 (testigo)	3	100% Harina de trigo + 0% almidón
T1	3	95% Harina de trigo + 5% almidón
T2	3	90% Harina de trigo + 10% almidón
T3	3	85% Harina de trigo + 15% almidón
T4	3	80% Harina de trigo + 20% almidón

Consideraciones de la fase experimental:

- Número de tratamientos: 5
- Número de repeticiones: 3
- Número de unidades experimentales: 15

La población de estudio estuvo formada por 15 unidades experimentales correspondientes a los 5 tratamientos a evaluar y a sus 3 repeticiones. En cada tratamiento se elaboraron 3000 g de pan, los que fueron divididos en dos lotes: 1000 g que fueron analizados en variables fisicoquímicas, microbiológicas y reológicas y los 2000 g a los que se les realizaron el análisis de contenido de gluten y la evaluación sensorial. Así se garantizó la realización de todos los análisis necesarios para la investigación.

Dentro de la investigación se tuvo como objetivo evaluar el efecto que tuvo la sustitución parcial de la harina de trigo por almidón de papa sobre las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, texturales y sensoriales del pan de masa madre.

Para las variables evaluadas se efectuó el análisis de varianza (ANOVA), debido a que cumplieron con los supuestos estadísticos necesarios para su aplicación. Este tipo de análisis permitió evaluar si existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

En caso de que los tratamientos presentaran diferencias estadísticamente significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para identificar qué tratamientos diferían entre sí.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la evaluación sensorial, al ser medidos en una escala hedónica, se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-

Wallis. Posteriormente se le aplicó la prueba post hoc de Dunn para comparar entre sí a los tratamientos y evaluar qué diferencias en los atributos sensoriales fueron estadísticamente significativas.

3.5.2. Formulaciones

(Milkias et al., 2025), manifestaron que el almidón modificado de papa mediante el tratamiento calor-humedad (HMT) se presenta como un ingrediente funcional para la elaboración de pan. Su incorporación en porcentajes de hasta 20% de sustitución permite mejorar la estabilidad del producto, aumentando la consistencia y textura del pan, además promueve el aprovechamiento de materiales subutilizados,

En la tabla 4 se indica las formulaciones establecidas en porcentajes para la elaboración del pan de masa madre

Tabla 4. Formulación pan de masa madre

Almidón modificado (%)	Harina de trigo (%)	Masa madre (%)	Agua adicional (%)	sal (%)
0	50	14	34	2
5	45	14	34	2
10	40	14	34	2
15	35	14	34	2
20	30	14	34	2

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos, reológicos y microbiológicos evaluados en el pan de masa madre con adición de almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*).

4.1.1. Determinación de la solubilidad y poder de hinchamiento del almidón de papa (*Solanum tuberosum*).

Al almidón adquirido se le realizó una modificación física siguiendo el método calor-humedad (HMT), el cual se verificó calculando su porcentaje de solubilidad y poder de hinchamiento de la siguiente manera:

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{\text{masa de materia seca}}{\text{masa de almidón seco}} \times 100$$

$$\text{Poder de hinchamiento (g/g)} = \frac{\text{Peso del precipitado}}{\text{masa del almidón seco} * (1 - \text{solubilidad})} \times 100$$

En la tabla 5 se evidencian los resultados obtenidos para la solubilidad del almidón nativo y modificado mediante el tratamiento HMT en diferentes temperaturas.

Tabla 5. Resultados solubilidad almidón

Almidón	T °C	Masa de Materia Seca	Masa de Almidón Seco	%Solubilidad
Nativo	65	0,0853	1	8,53
	80	0,1425	1	14,25
	95	0,229	1	22,9
HMT	65	0,0778	1	7,78
	80	0,1043	1	10,43
	95	0,1171	1	11,71

En la tabla 6 se registra los resultados obtenidos del poder de hinchamiento.

Tabla 6. Resultados poder de hinchamiento

Almidón	T °C	Peso tubo vacío	Peso Tubo+ Precipitado	Masa usada (g)	(sedimento)	Solubilidad/100	PH (g/g)
Nativo	65	12,3209	19,3811	1	7,0602	0,0853	7,72
	80	12,4078	23,7271	1	11,3193	0,1425	13,20
	95	12,3413	27,1888	1	14,8475	0,2290	19,26
	65	12,3997	18,2525	1	5,8528	0,0778	6,35

HMT	80	12,3278	19,9513	1	7,6235	0,1043	8,51
	95	12,5841	25,3292	1	12,7451	0,1171	14,44

4.1.2. Análisis fisicoquímico, reológico, microbiológico y sensorial del pan de masa madre con adición de almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*).

El análisis fisicoquímico se estableció como una herramienta esencial para la evaluación de productos, debido a que permitió evaluar parámetros como pH, acidez, proteína, fibra, humedad, cenizas, gluten y grasa, esto con el objetivo de influir directamente a la calidad nutricional y sensorial del producto final.

4.1.2.1. Potencial de hidrógeno pH

En la tabla 7 Se muestran los resultados obtenidos mediante la prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de pH evaluado en los diferentes tratamientos.

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para pH

Variable	Chi-cuadrado	gl	p-valor
pH	12,900	4	0,01177

Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, el p-valor al ser menor a 0,05 indico que la incorporación de almidón modificado de papa si influyo en el pH del pan, puesto a que la variable no cumplió con el supuesto de normalidad, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis para evidenciar diferencias entre tratamientos.

En la tabla 8 se indican los resultados realizados de prueba post hoc

Tabla 8. Comparación de Dunn-Bonferroni

Variable	Comparación	P sin ajuste	P ajustado
pH	T0-T3	0,00591	0,025913

Además, se realizó una prueba post hoc de Dunn con ajuste de Bonferroni, en el cual los tratamientos T0 y T3 mostraron diferencias significativas con un ($p=0,025913$), reflejando que el almidón si genero cambio en el sistema fermentativo.

4.1.2.2. Acidez

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para la variable acidez evaluada en los diferentes tratamientos, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Resultado ANOVA para acidez

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Acidez	4	0,07488	0,018719	53,05	1.07×10^{-6}

Los resultados obtenidos mostraron diferencias estadísticamente significativas de los diferentes tratamientos evaluados mostrando un p-valor inferior al 0,05. Esto refleja que la incorporación de almidón modificado si influyo en la acidez del producto final.

En la tabla 10 se presentan los resultados de los grupos homogéneos en la prueba de Tukey. Al realizar la prueba de comparación múltiple de Tukey se identificó diferencias entre tratamientos, mostrando una tendencia de variación de la acidez conforme se fue aumentando el porcentaje de sustitución de almidón modificado.

Tabla 10. Prueba de Tukey para acidez

Tratamiento	Grupo
T0	a
T1	ab
T2	b
T3	b
T4	c

4.1.2.3. Humedad

Para el contenido de humedad se realizó un análisis de varianza (ANOVA) presentados en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados ANOVA para humedad

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Humedad	4	96,51	24,128	102,10	$4,59 \times 10^{-8}$

Se observo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos obteniendo un p-valor <0,05 lo que significa que la adición de almidón modificado de papa influyo sobre la humedad contenida del pan. Además, se realizó una prueba de Tukey para identificar grupos homogéneos presentados en la tabla 12 demostrando que la humedad disminuyo de manera progresiva conforme el incremento del almidón modificado rechazando la hipótesis nula.

Tabla 12. Grupos homogéneos Tukey para humedad

Tratamiento	Grupo
T0	a
T1	a
T2	b
T3	c
T4	d

4.1.2.4. Cenizas

El contenido de cenizas mostro diferencias significativas entre tratamientos, en la tabla 13 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de Kruskal-Wallis con un p de 0,01111 indicando que la adición de almidón si influyo en el contenido mineral del producto.

Tabla 13. Prueba de Kruskal-Wallis en cenizas

Variable	Chi-cuadrado	gl	p-valor
Cenizas	13,033	4	0,01111

Para realizar comparaciones múltiples se utilizó la prueba de Dunn-Bonferroni evidenciando diferencias entre los tratamientos T0 y T4, confirmando que el efecto de la adición de almidón mostro más evidencia en aquel con mayor porcentaje de sustitución, llegando aceptar la hipótesis alterna. Estos resultados se indican en la tabla 14.

Tabla 14. Comparaciones prueba Dunn-Bonferroni

Variable	Comparación	P sin ajuste	P ajustado
Cenizas	T0-T4	0,001015	0,010150

4.1.2.5. Proteína

En la tabla 15 se indica los resultados realizados con el análisis de varianza (ANOVA), mostrando diferencias significativas entre los tratamientos con un ($p= 2,76 \times 10^{-8}$), es decir que la incorporación de almidón modificado influencio de manera directa sobre esta variable.

Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Proteína	4	10,794	2,6986	113,30	$2,76 \times 10^{-8}$

En la tabla 16 se realizó la prueba de Tukey para evaluar los diferentes grupos homogéneos demostrando que el contenido proteico disminuyo de manera significativa conforme la incorporación del almidón fue aumentando rechazando la hipótesis nula y aceptando la alterna.

Tabla 16. Grupos homogéneos Tukey

Tratamiento	Grupo
T0	a
T1	a
T2	b
T3	b
T4	c

4.1.2.6. Grasa

La prueba de Kruskal-Wallis presentada en la tabla 17 mostro diferencias significativas entre tratamientos evidenciando un $p = 0,008979$ esto quiere decir que la incorporación de almidón de papa modificado si influyo el contenido lipídico del producto final.

Tabla 17. Prueba Kruskal-Wallis para grasa

Variable	Chi-cuadrado	gl	p-valor
Grasa	13,524	4	0,008979

Para realizar comparaciones múltiples entre los tratamientos se realizó la prueba de Dunn-Bonferroni mostrada en la tabla 18, la cual identificó diferencias entre los tratamientos T0 y T1 con un p ajustado = 0,01005 demostrando que la incorporación se evidencia desde los primeros porcentajes de adición. Puesto que el p fue inferior al 0,05 se acepta la hipótesis alterna indicando que el almidón modificado favorece al producto final.

Tabla 18. Comparaciones significativas de Dunn en grasa

Variable	Comparación	P sin ajuste	P ajustado
Grasa	T0-T1	0,001004	0,010045

4.1.2.7. Fibra

En la tabla 19 se presentan los resultados obtenidos mediante la prueba Kruskal-Wallis la cual mostró diferencias significativas dando un $p = 0,02012$ lo que indica que la incorporación de almidón modificado influyo sobre esta variable.

Tabla 19. Prueba Kruskal-Wallis para fibra

Variable	Chi-cuadrado	gl	p-valor
Fibra	11,654	4	0,02012

Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Dunn-Bonferroni se muestran en la tabla 20 la cual identifico diferencias significativas entre los tratamientos T0 y T2 con

un p ajustado = 0,018929, lo cual indica que la incorporación de almidón fue notable en estos porcentajes de sustitución.

4.1.2.8. Gluten

Para el análisis de gluten se realizó el análisis de varianza (ANOVA), lo que mostró altas diferencias significativas entre tratamientos dando un $p = 9,27 \times 10^{-7}$, evidenciando que al incorporar almidón modificado si tiene efecto sobre esta variable, estos resultados se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Análisis de varianza gluten

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Gluten	4	58,74	14,685	54,64	$9,27 \times 10^{-7}$

Además, se realizó una prueba de Tukey para comprobar que la disminución progresiva permitió reducir el contenido de gluten presente en el producto final, la tabla 21 presenta los resultados obtenidos en esta prueba.

Tabla 21. Grupos homogéneos de Tukey para gluten

Tratamiento	Grupo
T0	a
T1	b
T2	bc
T3	cd
T4	c

4.1.2.9. Dureza

Para los análisis de textura específicamente de la textura se realizó un análisis de varianza en la tabla 22 se muestran los resultados, los cuales mostraron diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,000286$, demostrando que la adición de almidón modificado influyo directamente sobre la textura del producto final.

Tabla 22. Análisis de varianza para dureza

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Dureza	4	39787438	9946859	15,35	0,000286

Se realizó una prueba de grupos homogéneos mediante la prueba de Tukey descrita en la tabla 23 la cual indica la comparación entre el tratamiento de control con el T4 en cual aumento aproximadamente un 130% indicando una modificación dentro de la estructura interna del pan.

Tabla 23. Grupos homogéneos Tukey para dureza

Tratamiento	Grupo
T0	b
T1	b
T2	a
T3	a
T4	a

4.1.2.10. Elasticidad

Los resultados realizados mediante ANOVA se muestran en la tabla 24 la cual muestra que la variable elasticidad no mostró diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,684$ indicando que la incorporación parcial de almidón modificado no cambio significativamente la capacidad del pan para recuperar su forma al aplicar deformación mecánica.

Tabla 24. Análisis de varianza para elasticidad

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Elasticidad	4	0,002973	0,0007433	3,103	0,684

4.1.2.11. Cohesividad

En análisis de cohesividad se realizó mediante ANOVA, los resultados se muestran en la tabla 25, el análisis de varianza mostró un $p = 0,0667$ al ser mayor al 0,05 los resultados sugieren que la incorporación de almidón modificado no alteró significativamente la unión interna de la estructura del pan. Es decir que no se rechaza la hipótesis nula concluyendo que la cohesividad fue estable entre tratamientos.

Tabla 25. Análisis de varianza para cohesividad

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Cohesividad	4	0,05271	0,013177	3,103	0,0667

4.1.2.12. Masticabilidad

En la tabla 26 se muestra los resultados obtenidos del análisis de varianza indicando diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,00182$. Es decir que la sustitución de almidón modificado influyó sobre la fuerza/energía requerida para masticar el producto reflejando que los tratamientos con mayor sustitución aumentan la dureza.

Tabla 26. Análisis de varianza para masticabilidad

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Masticabilidad	4	17801989	4450497	9,662	0,00182

Para identificar grupos homogéneos se realizó la prueba de Tukey para masticabilidad descrita en la tabla 27.

Tabla 27. Grupos homogéneos de Tukey para masticabilidad

Tratamiento	Grupo
T0	b
T1	b
T2	a
T3	ab
T4	a

4.1.2.13. Resiliencia

En la tabla 28 el análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos $p = 0,0118$, evidenciando que los diferentes porcentajes aplicados en los tratamientos influyo sobre la capacidad de recuperación del pan después de la deformación. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna indicando que el porcentaje aplicado si influyo sobre la capacidad de recuperación de la estructura del pan.

Tabla 28. Análisis de varianza para resiliencia

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Resiliencia	4	0,07844	0,01961	5,701	0,0118

4.1.2.14. Parámetro C1 de la masa

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis se muestran en la tabla 29, los cuales no evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,1526$, es decir que el almidón modificado no produjo cambios estadísticamente detectables en este parámetro reológico. Entonces se acepta la hipótesis nula indicando que no hay diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Tabla 29. Resultados Kruskal-Wallis para C1

Variable	Chi-cuadrado	gl	p-valor
Par C1	6,700	4	0,1526

4.1.2.15. Parámetro C2 de la masa

En la tabla 30 se presentan los datos obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) mostrando diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,0369$ indicando que la incorporación de almidón modificado si influyo en la masa y acepta la hipótesis alterna. Al realizar comparaciones múltiples indicaron diferencias entre el T2 y T4 evidenciando el efecto de sustitución es más notorio en tratamientos con mayor porcentaje de adición.

Tabla 30. Resultados ANOVA par C2

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Par C2	4	0,001793	0,0004482	3,895	0,0369

En las tablas 31 y 32 se realizó una prueba de Tukey en la que se evidencio que la diferencia significativa esta entre el T2 y T4 con un p ajustado = 0,0340 en el que T2 tuvo un promedio más alto y T4 más bajo. Para los grupos homogéneos el T2 pertenecen al grupo "a", y el T4 en el grupo "b" generando modificación significativa en el par C3.

Tabla 31. Comparaciones Tukey para C2

Variable	Comparación	P ajustado
Par C2	T4-T2	0,0340

Tabla 32. Grupos homogéneos de Tukey C3

Tratamiento	Grupo
T0	ab
T1	ab
T2	a
T3	ab
T4	b

4.1.2.16. Parámetro C3 de la masa

La tabla 33 muestra los resultados del análisis de varianza que evidencian diferencias altamente significativas entre tratamientos con un $p = 9,33 \times 10^{-8}$, es decir que la tendencia demuestra que al aumentar el almidón modificado el parámetro C3 también se incrementó. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna.

Tabla 33. Análisis de varianza para C3

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Par C3	4	0,1869	0,04673	88,19	9.33×10^{-8}

Se realizaron comparaciones múltiples para afirmar diferencias significativas entre tratamientos con excepción del T3 y T4, mostrando una respuesta creciente del par C3 relacionado a aumento de incorporación de almidón. Los grupos homogéneos mediante el análisis Tukey posicionaron al T3 Y T4 en grupo superior "a" y el T0 en el grupo inferior "d". estos resultados se presentan en las tablas 34 y 35.

Tabla 34. Comparaciones significativas de Tukey Par C3

Variable	Comparación	P ajustado
Par C3	T1-T0	0,0087
Par C3	T2-T0	0,000010
Par C3	T3-T0	0,0000005
Par C3	T4-T0	0,0000002
Par C3	T2-T1	0,0013
Par C3	T3-T1	0,000016
Par C3	T4-T1	0,0000037
Par C3	T3-T2	0,0184
Par C3	T4-T2	0,0016

Tabla 35. Grupos homogéneos prueba Tukey par C3

Tratamiento	Grupo
T0	d
T1	c
T2	b
T3	a
T4	a

4.1.2.17. Parámetro C4 de la masa

Conforme se aumentó el nivel de sustitución el parámetro C4 también incremento de manera gradual. En la tabla 36 se desglosa los resultados del análisis de ANOVA con un $p = 1.61 \times 10^{-6}$. En la tabla 37 se realizó comparaciones múltiples que evidencian diferencias significativas entre el T0 y aquellos que tienen almidón modificado. Para los tratamientos T2, T3 y T4 estuvieron en el grupo estadístico superior "a", por otro lado, el T0 tuvo un valor más bajo, estos resultados se muestran en la tabla 38 demostrando que la incorporación influyo significativamente en el Par C3 por lo que se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 36. Resultados de ANOVA `Par C4

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Par C3	4	0,17350	0,04337	48,61	$1,61 \times 10^{-6}$

Tabla 37. Comparaciones significativas prueba Tukey Par C4

Variable	Comparación	P ajustado
Par C4	T1-T0	0,0034
Par C4	T2-T0	0,000041
Par C4	T3-T0	0,0000031
Par C4	T4-T0	0,0000032
Par C4	T2-T1	0,0275
Par C4	T3-T1	0,000482
Par C4	T4-T1	0,000508

Tabla 38. Grupos homogéneos Par C4 (Tukey)

Tratamiento	Grupo
T0	c
T1	b
T2	a
T3	a
T4	a

4.1.2.18. Parámetro C5 de la masa

En la tabla 39 se muestran los resultados obtenidos en el análisis de varianza obteniendo un $p = 7.93 \times 10^{-5}$ y al ser inferior a 0,05 se indica que la incorporación de almidón si influyó para el Par C5, por otro lado en la tabla 40 dentro de las comparaciones múltiples evidenciaron diferencias significativas entre el T0 y los tratamientos con mayor nivel de sustitución, además, los valores de C5 se incrementaron progresivamente desde T0 hasta T3 y elevado en T4, en la tabla 41 los grupos homogéneos indicaron que T3 y T4 estuvieron en el grupo “a” y T0 en el inferior “c”. este parámetro refleja que el almidón mejoro significativamente el par C5 rechazando la hipótesis nula.

Tabla 39. Resultados ANOVA Par C5

Variable	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Par C5	4	0,3227	0,08067	0,668	7.93×10^{-5}

Tabla 40. Comparaciones de Tukey Par C5

Variable	Comparación	P ajustado
Par C5	T1-T0	0,000722
Par C5	T3-T0	0,000141
Par C5	T3-T0	0,000218
Par C5	T3-T1	0,0084
Par C5	T4-T1	0,0149

Tabla 41. Grupos homogéneos de Tukey Par C5

Tratamiento	Grupo
T0	c
T1	bc
T2	ab
T3	a
T4	a

4.1.2.19. Parámetro de estabilidad de la masa

Para realizar el análisis inferencial primero se verificaron los supuestos afirmando que se cumplió con el supuesto de normalidad es decir un $p = 0,5556$, el de homogeneidad de varianzas $p = 0,5358$, para ello se aplicó un análisis de varianza ANOVA, los cuales indicaron que no hay diferencias significativas entre tratamientos con un $p = 0,628$ lo que quiere decir que el almidón modificado no realizó cambios estadísticamente detectables sobre la estabilidad de la masa y por lo tanto como p-valor fue superior a 0,05 se acepta la hipótesis nula. En la tabla 42 se muestra los resultados del análisis de varianza.

Tabla 42. Resultados ANOVA Estabilidad

Variable estabilidad	Df trat.	SC	CM	F	p-valor
Tratamientos	4	0,1800	0,04500	0,668	0,628
Residual	10	0,6733	0,06733		

4.1.2.20. Análisis descriptivo de los parámetros sensoriales

Para identificar el efecto de incorporar almidón de papa modificado sobre las características sensoriales en el pan de masa madre se evaluaron atributos de color, olor, sabor, textura y aceptabilidad en la tabla 43 se muestran los resultados descriptivos de cada tratamiento, en el cual el T4 tuvo mayor promedio en el color (5,34), olor (5,42), sabor (5,28), textura (5,08) y aceptabilidad general (5,32).

Tabla 43. Resultados descriptivos sensorial

Tratamiento	Color	Olor	Sabor	Textura	Aceptabilidad
T0	4,60 ± 1,03	4,70 ± 1,249	4,48 ± 1,147	4,50 ± 1,129	4,80 ± 1,088
T1	4,84 ± 0,934	4,90 ± 1,249	4,66 ± 1,099	4,62 ± 1,105	4,80 ± 1,125
T2	4,96 ± 1,068	4,96 ± 1,106	4,82 ± 0,983	4,64 ± 1,102	4,92 ± 1,066
T3	4,74 ± 1,026	4,86 ± 0,948	4,72 ± 0,858	4,80 ± 0,808	4,88 ± 0,799
T4	5,34 ± 1,002	5,42 ± 1,071	5,28 ± 0,970	5,08 ± 0,986	5,32 ± 0,891

Para determinar si hay diferencias significativas entre tratamientos se realizó una prueba de Kruskal-Wallis presentado en la tabla 44, el cual indicó diferencias

significativas para color con un $p = 0,0097$, olor $p = 0,0271$ y sabor $p = 0,0045$, esto quiere decir que la incorporación de almidón si influyo significativamente sobre estos atributos. Sin embargo, para la textura con un $p = 0,0568$ y aceptabilidad $p = 0,0645$ no se mostró diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 44. Prueba Kruskal-Wallis

Variable	ANOVA p	Kruskal-Wallis p
Color	0,0047	0,0097
Olor	0,0241	0,0271
Sabor	0,0021	0,0045
Textura	0,0551	0,0568
Aceptabilidad	0,0561	0,0645

4.1.2.21. Análisis microbiológico

En la tabla 45, se presentan los resultados de la carga microbiana de coliformes totales, *E. coli*, Aerobios mesófilos y mohos y levaduras de los diferentes tratamientos del pan de masa madre con adición de almidón modificado.

Tabla 45. Análisis microbiológico pan de masa madre con almidón modificado

Parámetro	T0	T1	T2	T3	T4	Unidad	Referencia
Coliformes totales	$<1 \times 10^1$	$<1 \times 10^1$	$<1 \times 10^1$	$<1 \times 10^1$	$<1 \times 10^1$	UFC/g	NTE INEN 616: ≤ 100 UFC/g
<i>E. coli</i>	Estimado $<1,0 \times 10^1$	Estimado $<1,0 \times 10^1$	Estimado $<1,0 \times 10^1$	Estimado $<1,0 \times 10^1$	Estimado $<1,0 \times 10^1$	UFC/g	NTE INEN 616: 0 UFC/g
Mohos y levaduras	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	UFC/g	NTE INEN 616: ≤ 500 UFC/g
Aerobios mesófilos	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	UFC/g	NTE INEN 616: $\leq 100\,000$ UFC/g

Se observó una incidencia de coliformes totales, mohos y levaduras, aerobios mesófilos con una carga menor a 10 UFC/g y una carga estimada a $<1,0 \times 10^1$ de *Escherichia coli*.

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Análisis fisicoquímico, reológico, microbiológico y sensorial del pan de masa madre con almidón modificado

4.2.1.1. Potencial hidrógeno (pH)

Los panes elaborados con diferentes porcentajes de incorporación de almidón de papa modificado mediante el método HMT muestran valores de pH diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, la prueba de Kruskal-Wallis con un

$p = 0,0118$; al realizar la comparación múltiple de Dunn con ajuste de Bonferroni se identificó diferencias significativas entre el tratamiento control T0 y T3 p ajustado = 0,026. Este parámetro se lo determinó mediante potenciometría según el método AOAC 981.12, el tratamiento T0 registro el pH más alto con un valor de 4,58, seguido del T1 con 4,56 y los que tuvieron mayor concentración de almidón presentaron valores más bajos: T2 (4,27), T3 (4,25), T4 (4,30).

Los resultados obtenidos de pH se encuentran en el rango establecido para panes elaborados con masa madre, según (De Bondt et al., 2024) los valores están dentro del rango 3,8 y 4,8 unidades de pH. Esto afirma que el proceso fermentativo se desarrolló correctamente en todos los tratamientos. El pH disminuyó progresivamente debido al incremento del almidón modificado esto se puede atribuir a una mayor disposición de sustratos fermentables presentes en las bacterias ácido-lácticas de la masa madre. Al modificar la estructura cristalina del almidón mediante tratamiento térmico HMT existen regiones más accesibles para las amilasas, liberando maltosa y glucosa durante la fermentación, potenciando la producción de ácidos orgánicos y por lo tanto se reduce el pH. (De Bondt et al., 2024) mencionan que al incorporar almidones modificados en masas fermentadas con masa madre observaron una reducción progresiva del pH final del producto, proporcional al nivel de sustitución empleado, efecto que atribuyeron al incremento en la actividad fermentativa de los microorganismos lácticos frente a la mayor biodisponibilidad de azúcares fermentables.

4.2.1.2. Acidez titulable

La acidez titulable se determinó mediante titulación con NaOH 0,1 N según el método AOAC 943,02 expresado como porcentaje de ácido láctico mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos $p = 1,07 \times 10^{-6}$. La prueba de Tukey reveló la formación de cuatro grupos homogéneos claramente diferenciados: T0 presentó la acidez más alta (0.713 %), constituyendo el grupo 'a'; T1 (0.687 %) se ubicó en el grupo 'ab'; los tratamientos T2 (0.657 %) y T3 (0.663 %) compartieron el grupo 'b'; mientras que T4 registró el valor más bajo (0.510 %), constituyendo el grupo 'c' de forma independiente.

Los resultados muestran una tendencia inversa a la del pH, lo que es fisicoquímicamente coherente ya que, a menor concentración de ácidos libres titulables, mayor es el valor de pH registrado. La reducción en la acidez titulable con

el incremento del almidón modificado HMT puede relacionarse con la interacción entre los ácidos orgánicos producidos durante la fermentación principalmente ácido láctico y acético y la estructura molecular del almidón modificado. Diversos autores han señalado que los almidones con mayor grado de ordenamiento cristalino, como los obtenidos mediante HMT, presentan una mayor capacidad de adsorción de moléculas polares, lo que podría reducir la concentración libre de ácidos disponible para la titulación (Tong et al., 2023). Adicionalmente, (Ronda et al., 2022), reportaron que la sustitución parcial de harina de trigo por almidones modificados en panes de masa madre generó una disminución progresiva de la acidez total titulable, la cual relacionaron con cambios en la dinámica fermentativa y en la disponibilidad neta de sustratos para los microorganismos lácticos. En la presente investigación, los valores de acidez obtenidos en todos los tratamientos se encuentran dentro del rango aceptable para pan de masa madre (0.4–0.9 % de ácido láctico; (De Bondt et al., 2024), lo que indica que la adición de almidón modificado no compromete la acidez característica ni las propiedades organolépticas asociadas a este tipo de pan.

4.2.1.3. Humedad

El contenido de humedad, determinado mediante gravimetría según el método AOAC 925.10, los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 102.10$; $p = 4.59 \times 10^{-8}$). La prueba de Tukey mostró que los cinco tratamientos formaron grupos homogéneos completamente diferenciados entre sí: T0 (32.73 %) y T1 (32.57 %) compartieron el grupo 'a' con los valores más altos, T2 (30.69 %) formó el grupo 'b', T3 (27.91 %) el grupo 'c', y T4 (26.35 %) el grupo 'd' con el menor contenido de humedad.

La disminución progresiva del contenido de humedad conforme se incrementó la proporción de almidón modificado HMT resulta coherente con las propiedades fisicoquímicas de este ingrediente. El tratamiento térmico de humedad provoca una reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina dentro del gránulo de almidón, aumentando el grado de cristalinidad y generando interacciones intermoleculares más fuertes, lo que reduce la capacidad de absorción de agua del gránulo y, en consecuencia, disminuye el contenido de humedad retenida en la miga del pan durante el horneado (Tong et al., 2023). Este comportamiento contrasta con la harina de trigo, cuyas proteínas formadoras de gluten gliadinas y gluteninas retienen cantidades significativas de agua en la red proteica durante la gelatinización del almidón y el horneado. Al sustituir parte de esa harina por almidón

modificado con menor capacidad de retención hídrica, la cantidad total de agua retenida en la matriz del pan se reduce proporcionalmente. Resultados similares fueron reportados por (Bolarinwa et al., 2021) observaron una reducción significativa en la humedad de panes con sustitución creciente de harina por almidón modificado de tubérculo, relacionando este efecto con la menor capacidad de hinchamiento de los gránulos modificados respecto a los nativos. La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 95 (2010) establece un contenido de humedad máximo de 35 % para el pan de molde, por lo que todos los tratamientos evaluados en la presente investigación cumplen con este requisito normativo.

4.2.1.4. Contenido de cenizas

Las cenizas, determinado mediante gravimetría por calcinación en mufla a 550 °C según el método AOAC 930.22, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 13.033$; $p = 0.0111$). La comparación múltiple de Dunn con ajuste Bonferroni detectó diferencias significativas entre T0 y T4 (p ajustado = 0.010). El tratamiento control T0 registró el mayor contenido de cenizas (2.504 %), con una tendencia decreciente conforme aumentó el nivel de sustitución de almidón modificado: T1 (2.445 %), T2 (2.404 %), T3 (2.351 %) y T4 (2.307 %).

Este comportamiento se explica directamente por la diferencia en el contenido de minerales entre la harina de trigo y el almidón de papa modificado. La harina de trigo contiene minerales como fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro y zinc en cantidades fisiológicamente relevantes, mientras que el almidón de papa, al ser un producto altamente purificado mediante procesos de extracción acuosa, presenta una fracción mineral considerablemente menor, generalmente inferior al 0.4 % (Tong et al., 2023). De este modo, al incrementar la proporción de almidón modificado en la formulación, se produce una dilución del contenido mineral total del producto, que se refleja directamente en los valores de cenizas. (Tong et al., 2023) en un estudio, reportaron que la sustitución de harina de trigo por almidones modificados de origen tuberoso redujo proporcionalmente el contenido de cenizas en productos de panificación, identificando a la dilución de la fracción mineral como el principal mecanismo subyacente. En el contexto de la presente investigación, si bien la reducción en el contenido de cenizas es estadísticamente significativa, los valores absolutos se mantienen en un rango estrecho (2.307–2.504 %), lo que sugiere que el

impacto nutricional en términos de aporte mineral es limitado dentro de los niveles de sustitución evaluados.

4.2.1.5. Contenido de proteína

El método Kjeldahl regido por la norma AOAC 950.36 con factor de conversión de nitrógeno $F = 5.7$ para cereales (AOAC 979.09), mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 113.30$; $p = 2.76 \times 10^{-8}$), siendo esta la variable con mayor valor de F entre todas las analizadas en el bloque fisicoquímico. La prueba de Tukey identificó tres grupos homogéneos bien diferenciados, T0 (9.79 %) y T1 (9.83 %) compartieron el grupo 'a' con los valores más altos; T2 (8.78 %) y T3 (8.44 %) formaron el grupo "b"; y T4 (7.59 %) se ubicó en el grupo "c" con el menor contenido proteico.

La reducción progresiva del contenido de proteína con el incremento de almidón modificado HMT era esperada y responde a un efecto de dilución proteica, dado que el almidón de papa prácticamente no aporta proteínas a la formulación su contenido proteico es inferior al 0.5 % (He et al., 2023) mientras que la harina de trigo es la principal fuente proteica del pan, con contenidos típicamente superiores al 10 %. Al sustituir harina por almidón, la fracción proteica total del producto disminuye de manera proporcional. (Pourmohammadi et al., 2023), en un artículo publicado, documentaron que la incorporación de almidones modificados como sustitutos parciales de harina en productos de panificación genera reducciones lineales en el contenido de proteína cruda, proporcionales al nivel de sustitución empleado, sin que ello implique necesariamente un deterioro en la calidad nutricional del producto siempre que se mantengan niveles de sustitución moderados. En la presente investigación, pese a la disminución estadísticamente significativa, los valores obtenidos en todos los tratamientos se encuentran dentro del rango de 7–11 % reportado para panes de masa madre (De Bondt et al., 2024), por lo que la calidad proteica del producto no se vería comprometida de manera crítica con los niveles de sustitución evaluados.

4.2.1.5. Contenido de grasa

El contenido de grasa, determinado mediante extracción de hexano según el método Soxhlet AOAC 920.39, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 13.524$; $p = 0.00898$). La prueba de Dunn con ajuste Bonferroni identificó diferencias significativas

específicamente entre T0 y T1 (p ajustado = 0.010). El tratamiento control T0 registró el mayor contenido de grasa (0.363 %), seguido de T2 (0.130 %), T3 (0.098 %), T4 (0.045 %), y T1 con el valor más bajo (0.023 %).

El elevado contenido de grasa de T0 respecto a los demás tratamientos se explica por la presencia de lípidos naturalmente asociados a los complejos lipoproteicos del gluten y a los complejos amilosa-lípido que se forman durante el proceso de gelatinización del almidón nativo de la harina de trigo (Goesaert et al., 2005). Al sustituir harina por almidón de papa purificado cuyo contenido lipídico es inferior al 0.1 % se produce una reducción drástica de los lípidos totales en la formulación. (Tong et al., 2023), reportaron que los almidones de tubérculo modificados empleados en panificación presentaban contenidos de grasa extremadamente bajos, y que su incorporación como sustituto de harina de trigo generaba productos con menor extracto etéreo total, lo cual puede ser favorable desde una perspectiva nutricional para consumidores que buscan reducir el aporte calórico proveniente de lípidos. La aparente irregularidad observada en T1, que presentó el valor más bajo de grasa incluso por debajo de los tratamientos con mayor sustitución podría atribuirse a la variabilidad inherente al método de Randall cuando se trabaja con muestras de muy bajo contenido lipídico (< 0.05 %), en las que pequeñas diferencias en la evaporación del solvente pueden generar valores no lineales (AOAC International, 2023).

4.2.1.6. Contenido de fibra cruda

El contenido de fibra cruda, determinado mediante el método gravimétrico de Weende según AOAC 962.09, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 11.654$; $p = 0.0201$). La prueba de Dunn con ajuste Bonferroni detectó diferencias significativas entre T0 y T2 (p ajustado = 0.019), siendo T0 el de menor contenido (2.143 %) y T2 el de mayor (2.867 %). Los demás tratamientos mostraron valores intermedios: T1 (2.657 %), T3 (2.470 %) y T4 (2.453 %).

El incremento del contenido de fibra cruda con la adición de almidón modificado HMT, particularmente hasta el nivel de T2 (10 % de sustitución), puede explicarse por la generación de almidón resistente tipo 2 (AR2) y tipo 3 (AR3) durante el proceso de modificación por tratamiento térmico de humedad. El método de Weende, al someter la muestra a digestión ácida y alcalina secuencial, cuantifica como fibra cruda no solo la celulosa y lignina sino también fracciones de almidón resistente que

no son hidrolizadas bajo estas condiciones, razón por la cual un mayor contenido de almidón resistente se traduce en valores más altos de fibra cruda (He et al., 2023). (Subroto et al., 2022), en un estudio, confirmaron que el tratamiento HMT incrementa significativamente el contenido de almidón resistente en almidones de tubérculos incluyendo papa debido al reforzamiento de las zonas cristalinas y a la formación de complejos amilosa-amilosa que son resistentes a la digestión enzimática. La disminución observada en T3 y T4 respecto a T2 podría indicar que a mayores concentraciones de almidón modificado, se producen interacciones entre el almidón y las proteínas residuales del gluten que facilitan parcialmente la digestión de las fracciones resistentes, reduciendo así el valor de fibra cruda cuantificable por el método empleado (Tong et al., 2023).

4.2.1.7. Contenido de gluten

El contenido de gluten, cuantificado mediante el método inmunoquímico ELISA según AOAC 2012.01 y expresado en mg/kg, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 54.64$; $p = 9.27 \times 10^{-7}$). La prueba de Tukey evidenció una reducción progresiva y estadísticamente diferenciada del contenido de gluten conforme aumentó el nivel de sustitución: T0 (37.83 mg/kg) se ubicó en el grupo 'a', T1 (34.73 mg/kg) en el grupo 'b', T2 (33.58 mg/kg) en el grupo 'bc', T3 (33.00 mg/kg) en el grupo 'cd' y T4 (32.12 mg/kg) en el grupo 'd' con el menor contenido.

La disminución del contenido de gluten es directamente proporcional al incremento del almidón modificado HMT en la formulación, lo que era fisiológicamente previsible dado que al sustituir harina de trigo única fuente de gliadinas y gluteninas en la formulación por almidón de papa, se reduce la cantidad total de proteínas formadoras de gluten disponibles en la masa. El almidón de papa, independientemente de su grado de modificación, no contiene prolaminas ni glutelinas y por lo tanto no contribuye a la red de gluten (Belitz et al., 2009b). Desde una perspectiva funcional, la reducción progresiva del gluten tiene implicaciones en la estructura de la masa y en las propiedades reológicas del producto, dado que el gluten es el principal responsable de la viscoelasticidad, la extensibilidad y la capacidad de retención de gases durante la fermentación. No obstante, como se analizará en la sección de parámetros reológicos, el almidón modificado HMT puede compensar parcialmente la función estructural del gluten mediante la formación de geles con mayor resistencia y la interacción con las proteínas residuales de la masa.

(Vuletić et al., 2022), señalaron que la reducción del contenido de gluten en productos de panadería puede representar una estrategia tecnológica viable para consumidores con sensibilidad al gluten no celíaca, quienes se benefician de niveles reducidos, aunque no necesariamente nulos de esta proteína. En este contexto, la reducción del 15 % en el contenido de gluten observada entre T0 y T4 en la presente investigación podría constituir un atributo funcional adicional del producto desarrollado.

4.2.1.8. Dureza

La dureza, definida como la fuerza máxima requerida durante el primer ciclo de compresión para deformar la miga del pan a un nivel preestablecido y expresada en gramos-fuerza (g), presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 15.35$; $p = 0.000286$). La prueba de Tukey identificó la formación de dos grupos homogéneos: T0 (2591.67 g) y T1 (2214.67 g) compartieron el grupo 'b' con los valores más bajos, mientras que T2 (5527.00 g), T3 (5617.33 g) y T4 (5970.33 g) se ubicaron en el grupo 'a' con los valores más altos.

El incremento significativo en la dureza de la miga a partir de T2 (10 % de sustitución) puede atribuirse a la mayor rigidez de la red de gel formada por el almidón de papa modificado HMT durante el horneado. Los parámetros del Mixolab mostraron que el almidón HMT presenta valores más altos de C3 (gelatinización) y C4 (estabilidad del gel en caliente), lo que genera una matriz de almidón gelatinizado más densa y resistente en la miga horneada (Tong et al., 2023). Esta mayor densidad de la red de almidón significa una mayor fuerza requerida para deformar la miga. Resultados similares fueron reportados por (Bolarinwa et al., 2021) observaron un incremento progresivo de la dureza de la miga en panes con sustitución creciente de harina de trigo por almidón de tubérculo modificado, relacionando este efecto con la mayor cohesión de la red de gel de almidón y con la reducción de la fracción proteica que actúa como agente plastificante de la miga. Por otro lado, la menor dureza observada en T1 respecto a T0 podría explicarse por una interacción sinérgica entre el almidón modificado a baja concentración (5 %) y las proteínas del gluten, que podría haber mejorado transitoriamente la extensibilidad de la red viscoelástica antes de que el efecto dominante del almidón rígido se impusiera a partir del 10 % de sustitución (Rosell et al., 2011).

4.2.1.9. Elasticidad

La elasticidad, que mide la capacidad de la miga de recuperar su forma original después del primer ciclo de compresión y se expresa como una relación adimensional entre 0 y 1, no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 0.581$; $p = 0.684$). Los valores medios obtenidos fueron muy similares entre sí: $T0 = 0.88$, $T1 = 0.90$, $T2 = 0.92$, $T3 = 0.88$ y $T4 = 0.90$, todos ellos indicativos de migas con alta capacidad de recuperación elástica.

La ausencia de diferencias significativas en la elasticidad sugiere que la incorporación de almidón de papa modificado HMT, en los niveles evaluados, no afectó la capacidad de recuperación viscoelástica de la miga. Debido a la red de gluten en la determinación de la elasticidad del pan es decir que mientras se mantenga una red de gluten funcional como en todos los tratamientos la elasticidad de la miga tiende a permanecer estable (Yazar, 2023). Por otra parte, el almidón de papa modificado HMT, al gelatinizarse a una temperatura más alta que el almidón de trigo nativo y generar una red de gel con mayor resistencia elástica, puede compensar la reducción en la contribución elástica del gluten, manteniendo la elasticidad global de la miga. Estudios como el de (Tong et al., 2023) reportaron que la elasticidad de panes con almidón de tubérculo modificado fue estadísticamente comparable a la de panes control de harina de trigo en rangos de sustitución de hasta 25 %, atribuyendo este comportamiento a la red de gluten residual y la red de gel de almidón modificado. Los valores obtenidos en todos los tratamientos (0.88–0.92) se encuentran dentro del rango óptimo reportado para panes de masa madre de alta calidad (0.85–0.95; Collar et al., 2015), lo que indica que la elasticidad de la miga no representó un factor limitante en ninguno de los tratamientos evaluados.

4.2.1.10. Cohesividad

La cohesividad, definida como la relación entre el área positiva del segundo ciclo de compresión y la del primero indicando la capacidad de la miga para mantenerse unida durante la deformación, no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 3.103$; $p = 0.0667$), aunque el valor de p fue marginal. Los valores medios registrados fueron: $T0 = 0.69$, $T1 = 0.71$, $T2 = 0.67$, $T3 = 0.56$ y $T4 = 0.73$.

Aunque las diferencias no alcanzaron el umbral de significancia estadística convencional ($\alpha = 0.05$), la tendencia observada muestra que $T3$ presentó el valor

más bajo de cohesividad (0.56), lo que sugiere una mayor fragmentación de la miga bajo compresión en este tratamiento. Este comportamiento podría relacionarse con una proporción subóptima entre la rigidez del gel de almidón y la plasticidad de la red proteica en T3 (15 % de sustitución), donde la dureza de la miga es elevada pero la red proteica ya se encuentra diluida como para reducir la cohesión interna. (Rosell et al., 2014) señalaron que la cohesividad de la miga en panes con almidones modificados depende del balance entre la resistencia del gel de almidón y la integridad de la red de gluten es decir cuando la dilución proteica avanza más rápido que el refuerzo estructural del almidón, la cohesividad tiende a disminuir. La recuperación observada en T4 (0.73) respecto a T3 podría indicar que a 20 % de sustitución el almidón modificado genera una red de gel suficientemente continua como para compensar la reducción de gluten y restaurar la cohesión de la miga. Los valores obtenidos en todos los tratamientos son consistentes con el rango reportado para panes de miga blanda (0.50–0.80;(Pourmohammadi et al., 2023)).

4.2.1.11. Masticabilidad

La masticabilidad, calculada como el producto de la dureza, la elasticidad y la cohesividad (expresada en gramos-fuerza), representa la energía requerida para masticar un alimento sólido hasta dejarlo en condiciones de ser deglutido. Este parámetro presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 9.662$; $p = 0.00182$). La prueba de Tukey identificó que T0 (1529.00 g) y T1 (1397.00 g) compartieron el grupo 'b' con los valores más bajos; T3 (2928.67 g) se ubicó en el grupo intermedio 'ab'; y T2 (3384.00 g) y T4 (4231.33 g) se ubicaron en el grupo 'a' con los valores más altos.

El patrón de masticabilidad observado sigue en líneas generales el de la dureza, dado que ambos parámetros están directamente relacionados. El incremento de la masticabilidad con el aumento del almidón modificado HMT refleja el mayor trabajo requerido para deformar y fragmentar una miga más firme. Sin embargo, la masticabilidad no sigue exactamente la misma jerarquía que la dureza, ya que también está modulada por la cohesividad. T3, que presentó la cohesividad más baja, mostró una masticabilidad menor a la de T2 a pesar de tener una dureza similar, lo que evidencia la influencia combinada de ambos parámetros. (Bolarinwa et al., 2021) reportaron que el incremento de la masticabilidad en panes con almidón de papa modificado era proporcional al incremento de la dureza, pero se veía disminuida en tratamientos donde la cohesividad era reducida, lo que es consistente

con los resultados obtenidos. Desde una perspectiva sensorial, valores de masticabilidad superiores a 4000 g pueden percibirse como excesiva resistencia al masticar, por lo que T4 podría presentar una textura menos aceptable para consumidores que prefieren pan de miga blanda; sin embargo, este aspecto deberá confirmarse con los resultados del análisis sensorial de textura (Yazar, 2023).

4.2.1.12. Resiliencia

La resiliencia, que cuantifica la capacidad de la miga de recuperar su forma y energía elástica durante la fase de retroceso del primer ciclo de compresión antes de que se inicie el segundo ciclo, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 5.701$; $p = 0.0118$). La prueba de Tukey identificó que T3 (0.28) y T0 (0.30) compartieron el grupo 'b' con los valores más bajos, mientras que T4 (0.46) se ubicó en el grupo 'a' con el valor más alto. T1 (0.42) y T2 (0.42) ocuparon posiciones intermedias en el grupo 'ab'.

La resiliencia refleja la instantaneidad de la recuperación elástica de la miga y está determinada por la naturaleza viscoelástica de la red de biopolímeros que la compone. El valor más alto de resiliencia observado en T4 indica que la miga elaborada con 20 % de almidón modificado HMT presenta una mayor capacidad de recuperación elástica inmediata, lo que puede atribuirse al mayor contenido de almidón modificado un polímero con comportamiento más elástico que viscoso a bajas deformaciones en relación con la fracción proteica del gluten, que tiende a aportar mayor viscosidad (Yazar, 2023). Por el contrario, el valor más bajo de T3 podría relacionarse con la menor cohesividad registrada en ese tratamiento, que sugiere una red estructural más heterogénea con menor capacidad de respuesta elástica uniforme. (Pourmohammadi et al., 2023) reportaron que la resiliencia de panes con almidón modificado de papa incrementaba de acuerdo con el nivel de sustitución, atribuyendo este efecto al mayor carácter elástico de la red de gel de almidón HMT en comparación con la red de gluten, cuyo componente viscoso es proporcionalmente mayor. En el contexto sensorial, una mayor resiliencia se percibe como una miga más esponjosa o que recupera mejor su forma al presionarla con los dedos, atributo generalmente valorado positivamente por los consumidores de pan blando (Yazar, 2023).

4.2.1.13. Par C1 Consistencia inicial de la masa

El par C1, representa la consistencia de la masa al inicio del proceso de amasado a temperatura controlada (30 °C), no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 6.700$; $p = 0.1526$). Los valores medios obtenidos fueron: T0 = 1.247 Nm, T1 = 1.166 Nm, T2 = 1.197 Nm, T3 = 1.126 Nm y T4 = 1.200 Nm, mostrando una variabilidad reducida entre tratamientos.

La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en C1 indica que la sustitución parcial de harina de trigo por almidón de papa modificado HMT, en los niveles evaluados (5 al 20 %), no afectó de manera relevante la consistencia inicial de la masa. Este resultado es vinculado con lo reportado por (Yazar, 2023) señalaron que el par C1 en masas panificables está determinado principalmente por la proporción de harina de trigo activa y el nivel de hidratación de la fórmula, y que sustituciones moderadas de harina por almidones modificados no alteran significativamente este parámetro mientras se mantenga constante el porcentaje de absorción de agua. El almidón de papa modificado HMT, al presentar mayor rigidez granular que el almidón nativo, podría compensar parcialmente la reducción en la fracción proteica de la masa, contribuyendo a mantener estable la consistencia inicial. En este sentido, (Kathuria et al., 2023) concluyeron que la resistencia granular incrementada por el tratamiento HMT permite que el almidón de papa actúe como un agente estructural que mantiene la cohesión inicial de la masa independientemente del nivel de sustitución.

4.2.1.14. Par C2 Debilitamiento proteico

El par C2 es el valor mínimo de torque registrado durante la fase de calentamiento, correspondiente al debilitamiento de la red de gluten cuando la temperatura supera los 50–55 °C. Este parámetro mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según el análisis de varianza (ANOVA; $F = 3.895$; $p = 0.0369$). La prueba de Tukey identificó diferencias entre T4 y T2, siendo T2 el valor más alto (0.528 Nm) y T4 el más bajo (0.497 Nm). Los valores de los demás tratamientos fueron: T0 = 0.518 Nm, T1 = 0.518 Nm y T3 = 0.526 Nm.

El par C2 refleja la resistencia de la red proteica frente al calor; valores más altos indican mayor estabilidad térmica de las proteínas del gluten. La tendencia observada, en la que T2 (10 % de sustitución) presentó el mayor valor de C2 y T4 (20

% de sustitución) el menor, puede interpretarse en función de la interacción entre el almidón modificado HMT y las proteínas residuales del gluten. Niveles moderados de almidón modificado podrían actuar como agentes de refuerzo de la red proteica al generar interacciones con las cadenas de glutenina durante el calentamiento, mientras que a niveles más altos la dilución de la fracción proteica domina y reduce la estabilidad del gel proteico (Ronda et al., 2022). Además, (Yazar, 2023) reportaron que el debilitamiento proteico medido por Mixolab en masas con almidones modificados de papa es menor que en masas con almidón nativo, debido a la rigidez granular que el HMT confiere al almidón, la cual retarda la disrupción de la red de gluten durante el calentamiento. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango típico reportado para masas de pan blanco (0.45–0.60 Nm), lo que sugiere que ninguno de los tratamientos evaluados comprometió de forma crítica la integridad de la red proteica.

4.2.1.15. Par C3 Gelatinización del almidón

El par C3 corresponde al pico máximo de torque registrado durante la fase de calentamiento, asociado a la gelatinización del almidón y la formación de la estructura de gel. Este parámetro presentó diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos (ANOVA; $F = 88.19$; $p = 9.33 \times 10^{-8}$), siendo la variable reológica con mayor significancia estadística del bloque. La prueba de Tukey mostró diferencias altamente significativas entre todos los pares de tratamientos, T0 registró el valor más bajo (1.635 Nm), mientras que los valores se incrementaron progresivamente con la adición de almidón modificado HMT, T1 = 1.718 Nm, T2 = 1.827 Nm, T3 = 1.901 Nm y T4 = 1.933 Nm.

El incremento del par C3 con el aumento del nivel de sustitución de almidón de papa modificado HMT constituye un análisis importante debido a que explica las propiedades de gelatinización, ya que presenta una mayor capacidad de formación de gel en comparación con el almidón de trigo nativo. El tratamiento HMT incrementa la temperatura de gelatinización del almidón de papa al reforzar las zonas cristalinas del gránulo, pero también genera, una vez gelatinizado, una mayor viscosidad de pasta y un gel más resistente, lo que se traduce en valores más altos de C3 (Subroto et al., 2022). Estos resultados concuerdan con los reportados por (Bolarinwa et al., 2021) observaron que la sustitución creciente de harina de trigo por almidón de papa modificado incrementó significativamente el pico de viscosidad medido en el Mixolab, relacionando este efecto con la mayor capacidad de hinchamiento y

absorción de agua de los gránulos modificados durante la gelatinización. En el contexto del pan de masa madre, un mayor valor de C3 implica una red de gel de almidón más firme en el producto horneado, lo que puede mejorar la estructura de la miga y contribuir a una mayor retención de humedad durante el almacenamiento (Yazar, 2023).

4.2.1.16. Par C4 Estabilidad del gel en caliente

El par C4 representa la estabilidad del gel de almidón durante la fase de mantenimiento a temperatura alta (90 °C), reflejando la resistencia de la estructura gelatinizada a la degradación amilásica. Este parámetro mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 48.61$; $p = 1.61 \times 10^{-6}$). La prueba de Tukey identificó diferencias significativas entre T0 y todos los demás tratamientos, así como entre T1 y T3, T4. El tratamiento T0 registró el valor más bajo (1.500 Nm), con incrementos progresivos hacia T1 (1.624 Nm), T2 (1.714 Nm), T3 (1.784 Nm) y T4 (1.783 Nm).

El par C4 está inversamente relacionado con la actividad amilásica endógena se reportó valores más altos de C4 indican mayor resistencia del gel de almidón a la hidrólisis enzimática durante el calentamiento. El incremento de C4 observado con el aumento de almidón modificado HMT se explica por la mayor resistencia a la digestión enzimática que confiere el tratamiento térmico de humedad al almidón de papa. Al reforzar las interacciones entre cadenas de amilosa y amilopectina y aumentar la temperatura de gelatinización, el HMT genera una red de gel más resistente a la acción de las α -amilasas presentes en la masa durante el horneado (Subroto et al., 2022). (Pourmohammadi et al., 2023) confirmaron que los almidones modificados por HMT presentan mayor resistencia amilásica que los almidones nativos equivalentes, lo que se refleja directamente en valores de C4 más elevados cuando son incorporados en formulaciones de pan. La estabilización del par C4 entre T3 y T4 sugiere que a partir del 15 % de sustitución se alcanza un umbral de resistencia enzimática máxima dentro de los niveles evaluados, posiblemente debido a la saturación de las interacciones protectoras entre las cadenas de almidón modificado.

4.2.1.17. Par C5 Retrogradación del almidón

El par C5 corresponde al torque registrado durante la fase de enfriamiento del Mixolab, reflejo del proceso de retrogradación del almidón gelatinizado. Este

parámetro presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 20.70$; $p = 7.93 \times 10^{-5}$). La prueba de Tukey identificó diferencias significativas entre T0 y T2, T3, T4, así como entre T1 y T3, T4. El tratamiento T0 registró el menor valor de C5 (2.216 Nm), con un incremento progresivo: T1 = 2.376 Nm, T2 = 2.534 Nm, T3 = 2.603 Nm y T4 = 2.584 Nm.

El incremento del par C5 evidencia una mayor tendencia a la retrogradación en los tratamientos con mayor nivel de sustitución. La retrogradación del almidón es el principal mecanismo responsable del endurecimiento del pan durante el almacenamiento (envejecimiento), por lo que valores más altos de C5 podrían asociarse con una vida útil más corta del producto. Sin embargo, es importante interpretar este resultado en el contexto específico del almidón de papa HMT, el tratamiento térmico de humedad promueve la formación de complejos amilosa-amilosa con mayor regularidad cristalina, lo que incrementa la velocidad e intensidad de retrogradación medida instrumentalmente, pero también puede generar una estructura cristalina más estable que no se manifiesta necesariamente como una dureza percibida equivalente en el producto final (Tong et al., 2023). En este sentido, (Tong et al., 2023) reportaron que los panes elaborados con almidón de papa modificado presentaban valores de C5 superiores a los controles de harina de trigo, pero mostraban texturas similares o incluso más blandas en los análisis instrumentales de perfil de textura, atribuyendo esta aparente contradicción a la interacción entre el almidón retro graduado y los polisacáridos de la masa madre, que modulan la percepción de firmeza en el producto. La estabilización de C5 entre T3 y T4 sugiere que, al igual que en C4, existe un nivel máximo de retrogradación accesible dentro del rango de sustitución evaluado.

4.2.1.18. Estabilidad de la masa

La estabilidad de la masa, medida como el tiempo (en minutos) durante el cual el par se mantiene dentro del rango de ± 0.1 Nm respecto al valor máximo de C1, no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA; $F = 0.668$; $p = 0.628$). Los valores medios fueron similares entre todos los tratamientos: T0 = 9.667 min, T1 = 9.700 min, T2 = 9.467 min, T3 = 9.700 min y T4 = 9.800 min.

La ausencia de diferencias significativas en la estabilidad de la masa indica que la sustitución de harina de trigo por almidón de papa modificado HMT, en los niveles evaluados, no afectó la tolerancia al amasado del sistema. Este resultado puede

explicarse por el papel secundario del almidón tanto nativo como modificado en la determinación de la estabilidad de la masa, parámetro que está controlado principalmente por la calidad y la cantidad de la red de gluten formada durante el amasado (Yazar, 2023). Dado que todos los tratamientos mantuvieron una fracción proteica suficiente para desarrollar una red de gluten funcional, la estabilidad no se vio comprometida. (Yazar, 2023) reportaron resultados similares al sustituir harina de trigo por almidones modificados de diferente origen botánico en proporciones de hasta 20 %, observando que la estabilidad Mixolab permaneció estadísticamente invariable siempre que el contenido de gluten funcional superara el umbral mínimo necesario para el desarrollo de la estructura de la masa. En el contexto de la producción industrial de pan de masa madre, la estabilidad uniforme observada en todos los tratamientos representa una ventaja tecnológica importante, ya que garantiza que la incorporación de almidón modificado HMT no afectará la tolerancia al proceso de amasado ni requerirá ajustes en los parámetros de producción.

4.2.1.19. Análisis sensorial color

El atributo de color evaluado por los panelistas presentó una tendencia creciente conforme aumentó el nivel de sustitución de almidón de papa modificado HMT. Las medias obtenidas en la escala hedónica fueron: T0 = 4.60, T1 = 4.84, T2 = 4.96, T3 = 4.74 y T4 = 5.34 puntos, siendo T4 el tratamiento con mayor aceptación en este atributo y T0 el de menor puntuación. Todos los valores se ubicaron en el rango de 'me es indiferente' a 'me gusta', con T4 acercándose al nivel de 'me gusta moderadamente'.

La mayor aceptación del color en T4 puede atribuirse a que el almidón de papa modificado HMT, al incorporarse en la formulación en mayor proporción, genera una corteza con una coloración dorada más uniforme y atractiva durante el horneado. Esto se relaciona con la reacción de Maillard, que ocurre entre los azúcares reductores liberados durante la gelatinización del almidón y los aminoácidos libres de la masa, produciendo compuestos coloreados (melanoidinas) responsables del dorado característico del pan (Kathuria et al., 2023). El almidón de papa, al gelatinizarse a temperaturas más altas y liberar mayor cantidad de dextrinas solubles durante el horneado, podría potenciar esta reacción en comparación con el almidón de trigo nativo. Resultados similares fueron reportados por (Bolarinwa et al., 2021), quienes observaron que la incorporación de almidón de tubérculo modificado en panes mejoró la aceptación del color por parte de los panelistas, relacionando este efecto con la intensificación del dorado superficial y la mayor uniformidad del

color de la miga. La puntuación más baja del tratamiento control T0 podría asociarse con un color de corteza menos intenso, resultado de una menor disponibilidad de sustratos para la reacción de Maillard en ausencia del almidón modificado.

4.2.1.20. Olor

El atributo de olor mostró una tendencia similar al color, con puntuaciones crecientes desde T0 hasta T4. Los valores medios registrados fueron: T0 = 4.70, T1 = 4.90, T2 = 4.96, T3 = 4.86 y T4 = 5.42 puntos. El tratamiento T4 obtuvo la mayor aceptación olfativa, mientras que T0 registró la puntuación más baja, aunque todos los tratamientos se ubicaron en el rango positivo de la escala hedónica, entre 'me es indiferente' y 'me gusta moderadamente'.

El olor del pan de masa madre es el resultado de una compleja mezcla de compuestos volátiles producidos durante la fermentación láctica y alcohólica, así como durante el horneado. Los principales compuestos responsables del aroma característico del pan de masa madre incluyen ácidos orgánicos, ésteres, aldehídos y compuestos de la reacción de Maillard (De Bondt et al., 2024). La mayor puntuación de olor observada en T4 podría relacionarse con una mayor producción de compuestos aromáticos volátiles derivados de la gelatinización del almidón modificado durante el horneado, así como con la posible sinergia entre el perfil aromático de la masa madre y los compuestos liberados por la hidrólisis parcial del almidón de papa HMT. (Kathuria et al., 2023), reportaron que la incorporación de almidones en masas fermentadas incrementó la producción de compuestos volátiles aromáticos durante el horneado, particularmente de aldehídos y furanos derivados de la degradación de azúcares, lo que se tradujo en una mayor intensidad y aceptación del aroma del producto final. La puntuación levemente más baja de T3 respecto a T2 podría indicar que existe un nivel óptimo de sustitución en términos de perfil aromático, más allá del cual la dilución de los sustratos proteicos de la masa madre limita la producción de compuestos aromáticos nitrogenados.

4.2.1.21. Sabor

El atributo de sabor presentó la misma tendencia ascendente observada en color y olor. Los valores medios registrados por los panelistas fueron: T0 = 4.48, T1 = 4.66, T2 = 4.82, T3 = 4.72 y T4 = 5.28 puntos. El tratamiento T4 obtuvo nuevamente la mayor puntuación, mientras que T0 registró el valor más bajo. Es importante destacar que T4 fue el único tratamiento que superó claramente el punto de indiferencia de la escala

(4.0) y se aproximó al nivel de 'me gusta moderadamente' (valor 5), lo que indica una aceptación positiva del sabor por parte de los consumidores.

El sabor del pan de masa madre es uno de sus atributos distintivos más valorados, caracterizado por una acidez suave y equilibrada que resulta de la producción de ácidos láctico y acético durante la fermentación (De Bondt et al., 2024). La mayor puntuación de sabor en T4 podría explicarse por un balance más favorable entre la acidez aportada por la masa madre y la dulzura residual proveniente de la mayor disponibilidad de dextrinas y azúcares liberados por la gelatinización del almidón de papa modificado HMT. Este efecto de modulación del sabor por parte de los almidones modificados ha sido documentado por (Mohammadi-Moghaddam et al., 2024), quienes señalaron que los almidones con mayor grado de modificación liberan mayor cantidad de maltosa y glucosa durante el horneado, contribuyendo a una percepción de mayor dulzura que complementa y suaviza la acidez característica del pan de masa madre, mejorando la aceptación global del sabor. Por otro lado, los valores más bajos observados en T0 y T1 podrían relacionarse con un perfil de sabor dominado por la acidez de la masa madre sin la modulación dulce que aporta el almidón modificado, lo que podría resultar en una percepción menos equilibrada y agradable para panelistas no habituados al pan de masa madre tradicional.

4.2.1.22. Textura

El atributo sensorial de textura, que evalúa la percepción táctil y bucal de la miga durante la masticación, mostró la siguiente distribución de medias, T0 = 4.50, T1 = 4.62, T2 = 4.64, T3 = 4.80 y T4 = 5.08 puntos. Al igual que en los demás atributos sensoriales, T4 obtuvo la mayor aceptación y T0 la menor, con una tendencia generalmente creciente a lo largo de los tratamientos. Destaca que T4 fue el único tratamiento que superó el umbral de 5 puntos, indicando una percepción de 'me gusta ligeramente'.

Este resultado contrasta aparentemente con los datos instrumentales del texturómetro, que mostraron que T4 presentó la mayor dureza (5970 g) y masticabilidad (4231 g) entre todos los tratamientos. Sin embargo, esta aparente contradicción puede explicarse por la diferencia entre la dureza instrumental y la textura percibida sensorialmente: los panelistas no solo evalúan la resistencia al primer mordisco que corresponde instrumentalmente a la dureza sino también la sensación global durante la masticación, incluyendo la jugosidad, la cohesión de la miga, la facilidad de deglución y la ausencia de residuos secos en el paladar (Bourne, 2002).

En este sentido, el mayor contenido de humedad retenida en T4 que, aunque fue el más bajo numéricamente entre tratamientos, corresponde a una miga más compacta pero no necesariamente seca combinado con la mayor resiliencia (0.46) y cohesividad (0.73), podría haber generado una percepción de textura más agradable y masticable. (Yazar, 2023) advirtieron que la correlación entre dureza instrumental y aceptación sensorial de textura no siempre es directa en panes con almidones modificados, ya que la percepción sensorial integra múltiples dimensiones que el TPA no captura completamente, incluyendo la lubricación salival y la formación del bolo alimenticio.

4.2.1.23. Aceptabilidad general

La aceptabilidad general, que sintetiza la valoración global del producto por parte del panel de consumidores, mostró los siguientes valores medios: T0 = 4.80, T1 = 4.80, T2 = 4.92, T3 = 4.88 y T4 = 5.32 puntos. El tratamiento T4 obtuvo la puntuación más alta y la única que superó claramente el nivel de 5.0 puntos en la escala hedónica, correspondiente a 'me gusta ligeramente', mientras que T0 y T1 compartieron la puntuación más baja, aunque todos los tratamientos se ubicaron en el rango de aceptación positiva de la escala.

La mayor aceptabilidad general de T4 es coherente con sus puntuaciones superiores en todos los atributos evaluados individualmente color 5.34, olor 5.42, sabor 5.28, textura (5.08) lo que indica que el conjunto de características sensoriales de este tratamiento resultó más agradable para los consumidores en su totalidad. Este resultado sugiere que la incorporación del 20 % de almidón de papa modificado HMT en la formulación del pan de masa madre genera un producto con una identidad sensorial diferenciada y aceptada por el consumidor, que se distingue positivamente del pan control. La tendencia ascendente en la aceptabilidad general a lo largo de los tratamientos es consistente con lo reportado por (Bolarinwa et al., 2021), quienes observaron que la aceptabilidad global de panes con almidón de tubérculo modificado fue significativamente superior a la del pan control en paneles de consumidores, atribuyendo este resultado al efecto combinado de la mejora en el color de la corteza, el aroma más intenso y la textura más cohesiva que aporta el almidón modificado. Sin embargo, es importante destacar que todos los tratamientos evaluados obtuvieron puntuaciones de aceptabilidad superiores al punto de indiferencia de la escala hedónica 4, lo que indica que ninguno de los niveles de sustitución evaluados generó un producto inaceptable para el consumidor. Esto

constituye un resultado relevante desde la perspectiva del desarrollo de productos, ya que confirma la viabilidad tecnológica y sensorial de la incorporación de almidón de papa modificado HMT como ingrediente funcional en pan de masa madre en todos los niveles evaluados (5–20 %).

4.2.1.24. Análisis microbiológico

Los análisis microbiológicos del pan de masa madre elaborado con diferentes niveles de sustitución de almidón de papa modificado HMT se realizaron conforme a los métodos AOAC 2014.05, AOAC 991.14 y AOAC 2015.13, tomando como referencia los límites establecidos en la norma NTE INEN 616. El recuento de coliformes totales fue inferior a 1×10^1 UFC/g en todos los tratamientos, valor muy por debajo del límite máximo permisible de 100 UFC/g, mientras que *Escherichia coli* resultó estimado en niveles menores a 1.0×10^1 UFC/g equivalente a ausencia práctica en todos los casos, cumpliendo con el criterio de 0 UFC/g establecido por la norma para este microorganismo indicador de contaminación fecal.

Los recuentos de mohos y levaduras y de aerobios mesófilos fueron de 1×10^2 UFC/g en todos los tratamientos, valores que se encuentran dentro de los límites permisibles de ≤ 500 UFC/g y $\leq 100\,000$ UFC/g respectivamente. Estos resultados demuestran que la incorporación de almidón de papa modificado HMT en ningún nivel de sustitución comprometió la inocuidad microbiológica del producto, y confirman que las condiciones de elaboración y el proceso de horneado fueron adecuados para garantizar un pan de masa madre microbiológicamente seguro y apto para el consumo humano.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que al adicionar almidón modificado mediante HMT no afectó de manera negativa dentro del proceso de producción y su incorporación de 5%, 10%, 15%, 20%, puesto que la estabilidad de la masa realizada mediante el equipo Mixolab no presentó diferencias significativas entre tratamientos mostrando un $p = 0,628$ en tiempos de 9,47 y 9,80 min; la consistencia inicial de la masa fue constante en todos los tratamientos con un $p = 0,1526$. Por lo tanto, el uso de almidones modificados es compatible con los procesos de panificación con masa madre.
- Se concluyó que el tratamiento T2 con un porcentaje del 10% de incorporación presentó balance en las variables planteadas, esto debido a que los análisis fisicoquímicos varió significativamente entre tratamientos, entonces el pH y la acidez titulable disminuyeron progresivamente con la incorporación de almidón, pero se mantuvieron dentro del rango establecido para pan de masa madre; la humedad disminuyó reflejando menor capacidad de retención hídrica en los gránulos modificados; proteína, cenizas y gluten indicaron reducciones progresivas por efecto de dilución, y para T2 la fibra aumentó relacionado con la generación de almidón resistente durante el proceso de HMT.
- La incorporación de almidón modificado genera efectos significativos para todas las variables evaluadas. Las propiedades reológicas incrementaron la gelatinización (Par C3), la estabilidad el gel en caliente y retrogradación (Par C4 y C5) mostraron mayor estructuración en la miga conforme el nivel de incorporación; en TPA la dureza y masticabilidad aumentó significativamente, por otra parte, la elasticidad no presentó diferencias significativas entre tratamientos demostrando que la red viscoelástica se preservó. Así mismo el análisis microbiológico evidenció inocuidad en todos los tratamientos conforme lo dice la norma NTE INEN 616. Sensorialmente la mayor aceptación la alcanzó el T4, es por eso por lo que la adición de almidón modificado mejora

las propiedades reológicas, fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre, siendo T2 el mejor tratamiento.

5.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar los niveles de sustitución mayores al 20% de almidón de papa modificado HMT, para determinar un umbral que permita identificar a partir del cual las propiedades fisicoquímicas, reológicas o sensoriales del pan se vean comprometidas, con el objetivo de establecer el rango máximo de sustitución.
- Realizar estudios con respecto a la vida útil del producto debido a que los valores más altos en el par C5 observados en T3 y T4 sugieren mayor tendencia al envejecimiento del producto.
- Explorar combinaciones del almidón modificado con hidrocoloides (goma xantana, HPMC), o harinas sin gluten como el arroz para niveles de sustitución mayores al 20%, con el fin de compensar la reducción de gluten, pero manteniendo las propiedades viscoelásticas de la masa y calidad del producto final.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015a). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, 35(2), 215-236. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6749>
- AOAC International. (2023). Official Methods of Analysis of AOAC International (22nd ed.). AOAC International.
- Aversano, R., et al. (2022). *Solanum tuberosum* (potato). Trends in Genetics, 38(9), 1000-1001. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2022.05.008>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009a). *Food Chemistry* (4.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7>
- Biney, E., Wang, M., & Cheong, K.-L. (2026). Starch-based functional ingredients in baking: A review of advances in starch derivatives, quality enhancement, and reduction of fermentable oligosaccharides, disaccharides, monosaccharides, and polyols. *Molecules*, 31(10), 1709. <https://doi.org/10.3390/molecules31101709>
- Bolarinwa, I. F., Lim, P. T., & Muhammad, K. (2021). Quality of bread partially substituted with modified banana starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15121. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15121>
- Chondrou, T., Adamidi, N., Lygouras, D., Hirota, S. A., Androutsos, O., & Svolos, V. (2024). Dietary phytic acid, dephytinization, and phytase supplementation alter trace element bioavailability: A narrative review of human interventions. *Nutrients*, 16(23), 4069. <https://doi.org/10.3390/nu16234069>
- Collar, C., & Armero, E. (2021). Sourdough fermentation of wheat: Effect on baking and nutritional quality. *Foods*, 10(1), 126. <https://doi.org/10.3390/foods10010126>
- Culetu, A., Duta, D. E., Papageorgiou, M., & Varzakas, T. (2021). The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta; rheology, characteristics, staling and glycemic index. *Foods*, 10(12), 3121. <https://doi.org/10.3390/foods10123121>
- De Bondt, Y., Verdonck, C., Brandt, M. J., De Vuyst, L., Gänzle, M. G., Gobetti, M., Zannini, E., & Courtin, C. M. (2024). Wheat Sourdough Breadmaking: A Scoping Review. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15(1), 265-282. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-110923-034834>
- Fang, G., Liu, K., & Gao, Q. (2022). Effects of Heat-Moisture Treatment on the Digestibility and Physicochemical Properties of Waxy and Normal Potato Starches. *Foods*, 12(1), 68. <https://doi.org/10.3390/foods12010068>

- FAO. (2020). *FAOSTAT: Crops and Livestock Products*. <https://www.fao.org/faostat>
- He, R., Li, S., Zhao, G., Zhai, L., Qin, P., & Yang, L. (2023). Starch modification with molecular transformation, physicochemical characteristics, and industrial usability: A state-of-the-art review. *Polymers*, 15(13), 2935. <https://doi.org/10.3390/polym15132935>
- Kathuria, D., Hamid, Gautam, S., & Thakur, A. (2023). Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies. *Food Control*, 153, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109911>
- Milkias, M., Emire, S. A., Abebe, W., & Wodajo, D. (2025). Effect of heat-moisture treatment (HMT) on the physico-chemical, structural, and functional properties of Ethiopian potato starch and flour. *Applied Food Research*, 5(2), 101565. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101565>
- Mohammadi-Moghaddam, T., Morshedi, M., Ansari, R. M., Morshedi, A., & Golmohamadi, A. (2024). Bread staling measurement techniques: A review. *Journal of Food Chemistry & Nanotechnology*, 10(2), 85-93. <https://doi.org/10.17756/jfcn.2024-178>
- Pourmohammadi, K., Abedi, E., & Hashemi, S. M. B. (2023). Gliadin and glutenin genomes and their effects on the technological aspect of wheat-based products. *Current Research in Food Science*, 7, 100622. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100622>
- Ronda, F., Villanueva, M., & Collar, C. (2022). Influence of acidification on dough viscoelasticity of gluten-free rice flour blends with hydrocolloids. *LWT – Food Science and Technology*, 154, 112765. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112765>
- Subroto, E., Mahani, Indiarito, R., Yarlina, V. P., & Izzati, A. N. (2022). A mini review of physicochemical properties of starch and flour by using hydrothermal treatment. *Polymers*, 14(24), 5447. <https://doi.org/10.3390/polym14245447>
- Tong, C., Ma, Z., Chen, H., & Gao, H. (2023). Toward an understanding of potato starch structure, function, biosynthesis, and applications. *Food Frontiers*, 4(3), 980-1000. <https://doi.org/10.1002/fft2.223>
- Vuletić, B., Kočović, A., Mladenović, M., Leković, Z., Radlović, V., Stojanović, B., Đonović, N., & Radlović, N. (2022). Gluten-related disorders. *Srpski Arhiv za Celokupno Lekarstvo*, 150(1-2), 108-112. <https://doi.org/10.2298/SARH200828100V>
- Yazar, G. (2023). Wheat flour quality assessment by fundamental non-linear rheological methods: A critical review. *Foods*, 12(18), 3353. <https://doi.org/10.3390/foods12183353>

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del ABSTRACT por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI
FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Cusangua Tupe Alejandra Deyaneira				
DATE: 12 de agosto de 2026				
Topic: Evaluación del efecto de almidón modificado de papa (Solanum tuberosum) aplicado en un pan de masa madre como alternativa baja en gluten.				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☒	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE 9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED TOTAL 9				

Anexo 2. Fotografías



Figura 3. Elaboración del pan de masa madre



Figura 4. Análisis de pH en el pan de masa madre



Figura 5. Muestras del pan en crisoles para análisis de humedad

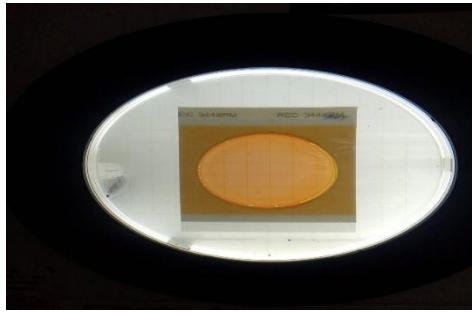


Figura 6. Análisis microbiológico del pan de masa madre con almidón



Figura 7. Análisis de fibra en el pan de masa madre



Figura 8. Análisis de proteína en el pan de masa madre



Figura 9. Análisis sensorial del producto

Anexo 3. Ficha sensorial

 UPEC Universidad Politécnica Estatal del Carchi	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES CARRERA DE ALIMENTOS FICHA DE EVALUACIÓN SENSORIAL	 POLITÉCNICA DEL CARCHI EDUCANDO PARA TRANSFORMAR EL MUNDO																																				
Producto: Pan de masa madre con sustitución de almidón de papa modificado mediante el método calor-humedad (HMT)																																						
Edad:	Sexo:	Fecha:																																				
Objetivo: Determinar el grado de aceptación en los atributos, color, olor, sabor, textura y aceptación de 5 muestras de pan de masa madre, con diferentes porcentajes de almidón de papa modificado.																																						
Definición: ▪ Color/Apariencia: Evaluar la uniformidad de color de la corteza y el aspecto atractivo. ▪ Aroma: Evaluar la intensidad y el agrado del aroma característico del pan. ▪ Sabor: Evaluar la intensidad y el agrado del pan, incluyendo equilibrio entre acidez y el sabor a cereal. ▪ Textura: Evaluar la sensación de suavidad, esponjosidad y estructura de la miga durante la masticación. ▪ Aceptabilidad: Evaluar todos los aspectos del producto considerando todas sus características sensoriales.																																						
Instrucciones: ▪ Frente a usted se presentan (5) cinco muestras de pan de masa madre. Deguste cada una de ellas de izquierda a derecha e indique su nivel de agrado según el puntaje de la escala indicada abajo, en el código correspondiente a cada una de las muestras. ▪ El rango para calificar es:																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Puntaje</th> <th style="width: 50%;">Categoría</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td>Me disgusta mucho</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td>Me disgusta ligeramente</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td>Me disgusta</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td>Ni me gusta ni me disgusta</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td>Me gusta</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td>Me gusta ligeramente</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">7</td><td>Me gusta mucho</td></tr> </tbody> </table>			Puntaje	Categoría	1	Me disgusta mucho	2	Me disgusta ligeramente	3	Me disgusta	4	Ni me gusta ni me disgusta	5	Me gusta	6	Me gusta ligeramente	7	Me gusta mucho																				
Puntaje	Categoría																																					
1	Me disgusta mucho																																					
2	Me disgusta ligeramente																																					
3	Me disgusta																																					
4	Ni me gusta ni me disgusta																																					
5	Me gusta																																					
6	Me gusta ligeramente																																					
7	Me gusta mucho																																					
A continuación, se presenta la tabla de calificación para cada tratamiento:																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Código</th> <th style="width: 15%;">Color</th> <th style="width: 15%;">Olor</th> <th style="width: 15%;">Sabor</th> <th style="width: 15%;">Textura</th> <th style="width: 15%;">Aceptabilidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">314</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">582</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">761</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">249</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">603</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Código	Color	Olor	Sabor	Textura	Aceptabilidad	314						582						761						249						603					
Código	Color	Olor	Sabor	Textura	Aceptabilidad																																	
314																																						
582																																						
761																																						
249																																						
603																																						
• Observaciones: 																																						