

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TÉCNICA YUDANE Y
REEMPLAZO DEL AGUA POR FERMENTO DE PIÑA
SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE PAN
DULCE**

Andrea Lissbeth Garzón Rivera

Ingeniería en Alimentos

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero en Alimentos

Quito, 09 de mayo de 2025

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN

DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Evaluación del efecto de la técnica Yudane y reemplazo del agua
por fermento de piña sobre las características tecnológicas de pan
dulce**

Andrea Lissbeth Garzón Rivera

Nombre del profesor, Título académico

María José Andrade Cuvi, Ph.D.

Quito, 09 de mayo de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Andrea Lissbeth Garzón Rivera

Código: 00321492

Cédula de identidad: 0550116024

Lugar y fecha: Quito, 09 de mayo de 2025

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme la fuerza para seguir adelante incluso en los momentos más retadores.

A mis papás, José Garzón y Patricia Rivera, por todo su amor, por confiar en mí, por enseñarme a trabajar duro y a no rendirme. A mi hermanita Samanta, por su apoyo incondicional y por siempre estar presente.

A mi familia —tíos, primos, primas y mi abuela— gracias por acompañarme con cariño en este camino. Y a Dani Arroyo, gracias por estar siempre, por tu compañía y por creer en mí.

A mis amigos de la universidad que hicieron de esta etapa una experiencia increíble. En especial a Andrés Cárdenas, Sebastián Garzón, Fernando Alejandro y María Villegas, gracias por ser parte de este proceso y por su apoyo constante.

A mis profesores, gracias por compartir su conocimiento y por motivarnos a ir más allá. A Lucía, por su guía y liderazgo. Y a mi tutora María José Cuvi, por tu apoyo en todo momento y por ayudarme a cerrar esta etapa.

Agradezco la valiosa colaboración y predisposición al trabajo de Ariel Castillo estudiante de Ingeniería en alimentos quién fue un gran apoyo en la fase experimental de este trabajo. Al igual que a Elenita y Mabe por permitirnos utilizar el Mixolab en los laboratorios de investigación y desarrollo del INIAP-Santa Catalina.

Dedico esta tesis a la memoria de mi abuelo Paco Garzón. Crecí con su ejemplo de trabajo y humildad, y su recuerdo me inspira a seguir adelante con gratitud y fuerza.

Andrea Lissbeth Garzón Rivera

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la técnica Yudane y el reemplazo del agua por un fermento natural de cáscara de piña sobre las características tecnológicas del pan dulce. Se aplicó un diseño factorial completamente al azar 2^2 , combinando dos factores: con y sin Yudane y uso de agua o fermento como líquido de formulación. Se analizaron parámetros fisicoquímicos (pH, humedad, color, volumen específico), microestructurales (microscopía SEM y alveolado), de textura (TPA) y sensoriales. Los resultados indicaron que la técnica Yudane mejoró la textura, en particular la gomosidad y masticabilidad, mientras que el fermento de piña redujo el pH e influyó en la porosidad y volumen. La combinación de ambas estrategias (YP) mostró efectos sinérgicos, generando una miga más suave, aunque con estructura menos cohesiva. En la evaluación sensorial, los tratamientos con Yudane (Y y YP) presentaron mayor aceptabilidad, especialmente en los atributos de suavidad y apariencia global. Se concluye que el uso combinado de técnicas artesanales como el Yudane y fermentos naturales representa una alternativa viable para innovar en productos de panificación más saludables y sostenibles, aunque su implementación industrial requiere ajustes tecnológicos y validación microbiológica del fermento.

Palabras clave: panificación, Yudane, fermento natural, cáscara de piña, textura, aceptabilidad sensorial.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of the Yudane technique and the replacement of water with a natural pineapple peel ferment on the technological characteristics of sweet bread. A 2² full factorial design was applied, combining the use or absence of the Yudane method and water or ferment as the liquid component in the formulation. Physicochemical (pH, moisture, color, specific volume), microstructural (SEM and crumb alveolation), texture profile (TPA), and sensory acceptability parameters were analyzed.

Results showed that the Yudane technique improved texture, especially gumminess and chewiness, while the pineapple ferment lowered pH and modified crumb porosity and volume. The combination of both treatments (YP) had synergistic effects, resulting in a softer but less cohesive crumb. Sensory analysis revealed higher acceptability for Yudane-based breads (Y and YP), particularly in softness and overall appearance.

It is concluded that combining artisanal techniques like Yudane with natural fermentations offers a promising approach for developing healthier and more sustainable baked goods. However, industrial application requires process adjustments and microbiological validation of the ferment.

Keywords: baking, Yudane, natural ferment, pineapple peel, texture, sensory acceptability.

Tabla de Contenido

1. Introducción	11
1.1. Objetivos	14
1.1.1 General.....	14
1.1.2 Específicos.....	14
2. Materiales y métodos	15
2.1. Materiales	15
2.2. Diseño Experimental	15
2.3. Proceso de Elaboración del Pan.....	15
2.4. Determinaciones analíticas	18
2.4.1. Comportamiento reológico de las masas.....	18
2.4.2. pH.....	18
2.4.3. Humedad	18
2.4.4. Color	18
2.4.5. Volumen específico	19
2.4.6. Alveolado de miga.....	19
2.4.7. Análisis microestructural	19
2.4.8. Análisis de perfil de textura.....	19
2.5. Análisis Sensorial	20
2.6. Análisis Estadístico	20
3. Resultados y discusiones.....	21
3.1 Comportamiento reológico de las masas	21
3.2 pH y humedad	24
3.3 Análisis de color	25
3.4 Volumen	28
3.5 Alveolado de miga	29
3.6 Análisis de perfil de textura (TPA)	31
3.7 Análisis microestructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	33
3.8 Análisis sensorial	34
4. Conclusiones	38
Referencias.....	40
ANEXOS.....	45
ANEXO A: Análisis reológico de masas - Mixolab	45
ANEXO B: Análisis de varianza (ANOVA)	48
Anexo B1: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de pH masa, leudo, pan y humedad de los tratamientos.	48

Anexo B2: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) colorimetría de la cortaza	48
Anexo B3: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) colorimetría de la miga	49
Anexo B4: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de volumen	49
Anexo B5: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de TPA.....	50
Anexo B5.1: Gráfica de interacción gomosidad y dureza(N).	50
Anexo B6: Medias y Tukey TPA.....	50
ANEXO C: Nivel de agrado de atributos sensoriales y percepción global de los tratamientos.....	51
Anexo C1: Consentimiento informado evaluación sensorial.....	51
Anexo C2: Prueba hedónica.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Codificación de los tratamientos.....	15
Tabla 2. Parámetros tecnológicos: pH durante la fermentación y humedad final del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP).....	24
Tabla 3. Parámetros de color de corteza y miga del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP).....	27
Tabla 4. Volumen y volumen específico del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP).....	28
Tabla 5. Alveolado de miga del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP).....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso del fermento, yudane y elaboración de pan	17
Figura 2. Reología de las masas.....	21
Figura 3. Perfil Mixolab de las masas.....	23
Figura 4. Apariencia externa de los panes elaborados.....	26
Figura 5. Apariencia interna de los panes elaborados	26
Figura 6. Análisis de perfil de textura del pan.....	31
Figura 7. Imágenes SEM del pan.....	33
Figura 8. Evaluación sensorial del pan	35
Figura 9. Evaluación sensorial de atributos descriptivos en panes con diferentes formulaciones.....	36

1. Introducción

El pan es uno de los alimentos más antiguos y ampliamente consumidos en el mundo. Su importancia en la dieta humana se remonta a las primeras civilizaciones, y su evolución ha estado marcada por innovaciones en técnicas de panificación y formulaciones mejoradas. Actualmente, el consumo de pan varía significativamente según la región; en Europa oscila entre 50 y 100 kg per cápita al año, con Turquía a la cabeza (104 kg/persona), seguido de Bulgaria (95 kg), Ucrania (89 kg), Grecia (68 kg) y los Países Bajos (62 kg) (AIBI, 2015). En América Latina, el consumo varía desde 31 kg en Brasil hasta 96 kg en Chile (González et al., 2015). En Ecuador, el consumo per cápita anual de pan es de 20 kg, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2019). Además, según la Encuesta Estructural Empresarial la industria panificadora del país produce aproximadamente 48 mil toneladas de pan al año (INEC, 2022). La popularidad del pan radica en su accesibilidad, bajo costo y aceptación generalizada, convirtiéndose en un pilar fundamental de la alimentación cotidiana (Świeca et al., 2014).

Dentro de las diversas categorías, el pan dulce destaca por su textura suave, miga uniforme y vida útil prolongada. Su elaboración implica una combinación de ingredientes clave que influyen en su estructura y calidad final. La harina de trigo es su principal componente, aportando almidones y proteínas esenciales para la formación del gluten, una red tridimensional responsable de la retención de gases y la elasticidad de la masa (Zain et al., 2022). El agua desempeña un papel fundamental en la hidratación de estos componentes, facilitando la formación de la matriz de gluten y la gelatinización del almidón (Krasnikova et al., 2020). La levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) genera los gases necesarios para la fermentación, aumentando el volumen del pan y contribuyendo a su textura aireada (Ahmed et al., 2021). Ingredientes como la sal fortalecen la red de gluten, mientras que los azúcares y las grasas mejoran la textura, el sabor y aumenta su vida de anaquel (Verbauwhede et al., 2019).

En la búsqueda de mejorar la calidad sensorial y la estabilidad del pan, se han desarrollado diversas técnicas de panificación. Entre ellas, el método Yudane, originario de Japón ha ganado popularidad por su capacidad para mejorar la suavidad y vida útil del pan. Este método consiste en escaldar una porción de harina con agua hirviendo antes de incorporarla a la masa, lo que

pregelatiniza el almidón y modifica la estructura del gluten. Como resultado, el pan elaborado con Yudane presenta una mayor absorción de agua y retención de humedad, reduciendo su endurecimiento en comparación con el pan convencional (Yamada et al., 2017). Se ha observado que este método incrementa la cantidad de azúcares reductores como la maltosa lo que podría influir en una percepción de mayor dulzura y en el retraso del envejecimiento del pan (Tsuboi et al., 2017). Actualmente, se investiga la viabilidad de este método en la producción industrial sin comprometer la calidad del producto final (Yano et al., 2023).

Paralelamente, el uso de fermentos ha cobrado relevancia en la panificación debido a sus efectos positivos en la calidad sensorial y estructural del pan. Dependiendo del tipo de fermentación utilizada se pueden desarrollar compuestos que impactan el aroma, el sabor y las propiedades fisicoquímicas del producto final. Skřivan et al. (2023) explican que los prefermentos y la masa madre pueden mejorar la estabilidad del pan al producir ácidos orgánicos, como el láctico y el acético, los cuales contribuyen a su conservación y perfil sensorial. Investigaciones recientes han demostrado que reemplazar total o parcialmente el agua por fermentos puede alterar la actividad enzimática y la formación de la red de gluten, modificando la textura y el volumen del pan (Guijarro-Fuertes et al., 2018).

El uso de cáscaras de piña para la elaboración de fermentos no solo representa una alternativa funcional en la panificación, sino también una solución sostenible para el aprovechamiento de subproductos agroindustriales. Se estima que la industria del procesamiento de piña genera grandes volúmenes de residuos, ya que aproximadamente el 60% del peso del fruto se convierte en desecho, incluyendo la cáscara, el tallo y el corazón (Sarangi et al., 2023). Estos residuos pueden aprovecharse como fuente de carbohidratos fermentables para favorecer la actividad de bacterias ácido-lácticas (BAL) como *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus fermentum* y *Enterococcus gallinarum*, conocidas por su capacidad de producir ácido láctico y mejorar las propiedades del pan (Yang et al., 2016). La cáscara de piña contiene compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas, lo que podría influir positivamente en la conservación del pan y en su perfil sensorial. Tradicionalmente se ha utilizado la cáscara de piña para elaborar una bebida fermentada conocida como ‘tepache’, descrita como una bebida alcohólica de aroma agradable y sabor característico con una alta aceptación por la población mexicana (López, Alcántar & García, 2023). El uso de este tipo de productos como ingredientes de alimentos es una alternativa innovadora con buen potencial de uso industrial.

La producción y consumo de pan están sujetos a múltiples desafíos y limitaciones a nivel global, cultural, social, ambiental, económico, de salud pública, seguridad y bienestar. A nivel global, la creciente demanda de alimentos con mejores propiedades nutricionales ha impulsado la investigación de técnicas innovadoras en panificación que permitan mejorar la calidad del producto sin comprometer su accesibilidad ni su impacto ambiental (Wandersleben et al., 2018). En el ámbito cultural y social, el pan es un alimento fundamental en diversas dietas alrededor del mundo, con preferencias específicas según cada región; sin embargo, las tendencias actuales apuntan hacia la reformulación de productos con ingredientes naturales y funcionales, con reducción en el uso de aditivos, que respondan a las expectativas de los consumidores modernos (Mitelut et al., 2021). Desde la perspectiva ambiental, la industria panificadora enfrenta desafíos relacionados con la huella de carbono de la producción de trigo, el consumo de agua y la generación de residuos agroindustriales, lo que ha incentivado la búsqueda de alternativas sostenibles (Ortega et al., 2021).

En términos económicos, el aumento en el costo de las materias primas ha generado la necesidad de optimizar los procesos productivos y explorar ingredientes alternativos que reduzcan costos sin afectar la calidad del producto (Wandersleben et al., 2018). En cuanto a la salud pública y bienestar, el consumo excesivo de pan refinado y con altos contenidos de azúcares y grasas ha sido relacionado con un mayor riesgo de enfermedades no transmisibles, como la obesidad y diabetes, por lo que la reformulación con ingredientes funcionales y procesos que mejoren el perfil nutricional es una estrategia clave para la industria panificadora (Marti & Martinez, 2021). En este contexto, la implementación de técnicas como el método Yudane y el uso de fermentos naturales derivados de la cáscara de piña representan una alternativa viable para abordar estos desafíos, ya que pueden mejorar la calidad sensorial, nutricional y estructural del pan, al mismo tiempo que contribuyen a la sostenibilidad y al aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria.

Si bien existen estudios previos sobre el uso de la técnica Yudane y el impacto de los fermentos naturales en la panificación, no se ha explorado su aplicación combinada en la reformulación de pan. Como se mencionó anteriormente, el Yudane mejora la retención de agua y la suavidad de la miga (Tsuboi et al., 2017), el fermento de cáscara de piña introduce microorganismos beneficiosos y compuestos bioactivos que favorecen la fermentación y aportan características sensoriales diferenciadas (Yang et al., 2016; Andrade-Cuvi et al., 2021). Esta investigación busca evaluar el efecto sinérgico de la técnica Yudane y el reemplazo del agua por fermento

de piña sobre la calidad del pan. Esta reformulación responde a la creciente demanda del consumidor moderno por productos naturales y de larga duración, lo que la convierte en una estrategia clave para la innovación en la industria panificadora.

1.1. Objetivos

1.1.1 General

Evaluar el efecto de la técnica Yudane y el reemplazo del agua por un fermento de cáscaras de piña sobre las características tecnológicas de pan dulce.

1.1.2 Específicos

- Analizar la interacción entre la técnica Yudane y el fermento de piña sobre las características tecnológicas de pan dulce.
- Establecer el efecto de la técnica Yudane y del fermento de piña sobre la microestructura del pan dulce.
- Determinar la influencia de la técnica de elaboración de pan sobre la aceptabilidad del consumidor.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Para la elaboración del pan se utilizó harina de trigo fortificada para panificación con un contenido de proteína del 13%, cuyas especificaciones técnicas fueron: 13.6% de humedad, 0.72% de cenizas, 36.5% de gluten húmedo, 12.1% de gluten seco, 94% de gluten index y 345s de Falling Number. Además, se empleó margarina de repostería, azúcar, levadura fresca, sal y piña hawaiana en madurez comercial, adquiridos en el mercado local.

2.2. Diseño Experimental

Se aplicó un diseño factorial completamente al azar 2^2 , con dos factores principales:

1. Técnica de elaboración de pan:
 - a. sin técnica Yudane
 - b. con técnica Yudane
2. Líquido utilizado en la formulación:
 - a. Agua
 - b. Fermento de cáscara de piña

Cada combinación de factores se realizó por triplicado, resultando un total de 12 unidades experimentales. La codificación de los tratamientos se muestra en la Tabla 1. La asignación de tratamientos se realizó de forma aleatoria mediante el software Minitab versión 2019.

Tabla 1. Codificación de los tratamientos

Codificación	Descripción
C	Pan sin yudane, con agua (control)
P	Pan sin yudane, con fermento de cáscara de piña
Y	Pan con yudane, con agua
YP	Pan con yudane, con fermento de cáscara de piña

2.3. Proceso de Elaboración del Pan

Se preparó una formulación en base panadera de: 100% harina, 61% agua, 20% azúcar, 6% margarina, 8% levadura fresca y 1% sal. Según el diseño experimental se reemplazó por un lado el agua por fermento de piña, y por otro la harina por Yudane.

La elaboración del pan se dividió en cinco etapas, según se describe a continuación:

Preparación del Yudane: Se utilizó el 40% del total de la harina de la formulación, con una proporción 1:1 (harina:agua en ebullición). Esta mezcla se homogenizó y almacenó 24 horas a 4°C antes de su incorporación en la masa. Para preparar el pan con yudane se agregó hasta el 37% de agua que contiene la formulación control. De igual manera para el pan con Yudane y fermento de piña se incorporó el 37% del líquido.

Elaboración del fermento de piña: Se utilizó una proporción 1:1 cáscara de piña y agua purificada, dejándose fermentar a temperatura ambiente, en un recipiente estéril y protegido de la luz, con cierre hermético, durante 48 horas. Para preparar el pan con el fermento de piña se agregó máximo el 62% del fermento como reemplazo del agua del control.

Amasado y mezclado: Se colocaron los ingredientes en la amasadora en el siguiente orden: agua o fermento, harina (con o sin Yudane), levadura fresca, azúcar y sal por separado, y margarina. Se mezcló a baja velocidad por 1 minuto y luego a velocidad media de 5 a 10 minutos hasta la formación de la red de gluten.

División y fermentación: La masa se dividió en porciones de 70 g, se boleó y se colocó en moldes previamente engrasados. Se llevó a fermentación controlada a 38°C y 80% de humedad relativa por 50 minutos. Se midió el pH de la masa antes y después de la fermentación.

Horneado: Los panes fueron horneados a 165°C por 16 minutos.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de elaboración del pan con la técnica Yudane y con reemplazo del agua por fermento de piña.

Inicialmente, se analizó el comportamiento reológico de las masas elaboradas mediante el equipo Mixolab. Posteriormente, los panes elaborados fueron enfriados a temperatura ambiente y se realizó su caracterización fisicoquímica (color, volumen, pH, humedad, TPA). Además, se realizó evaluación sensorial mediante una prueba de aceptabilidad.

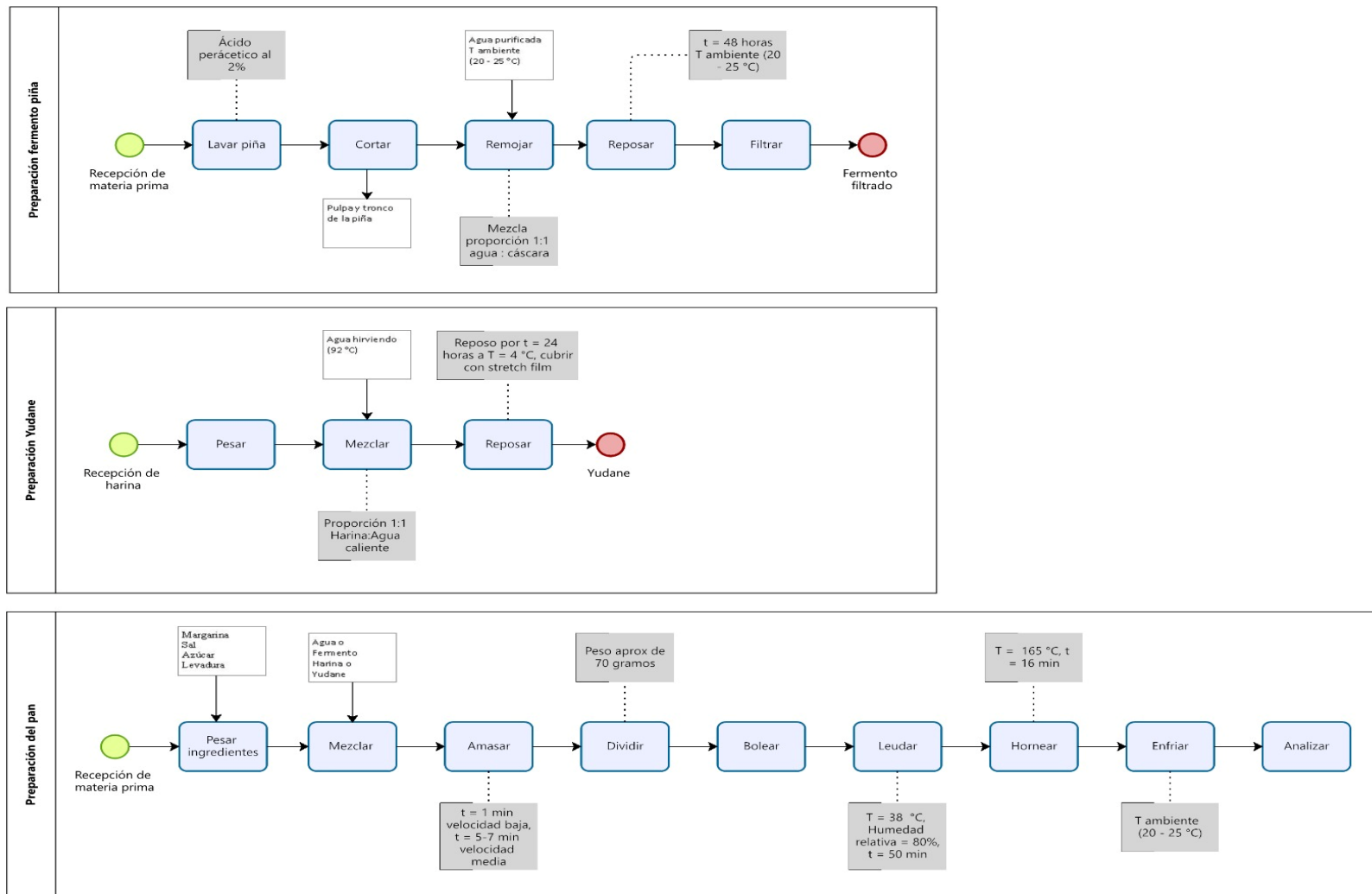


Figura 1.Diagrama de flujo del proceso de elaboración del fermento, yudane y elaboración del pan dulce

2.4. Determinaciones analíticas

2.4.1. Comportamiento reológico de las masas

El comportamiento reológico de las masas de pan fue evaluado mediante un equipo Mixolab (Chopin Technologies, Francia), utilizando el protocolo 54-60.01 descrito por la AACCI (2010). Para analizar la interacción de proteínas y almidones durante las etapas de amasado, calentamiento y enfriamiento. El ensayo se realizó utilizando 75 g de masa con una hidratación estandarizada al 62,5% y velocidad de amasado de 80 rpm. Se analizaron cuatro tratamientos: pan control (C), pan con fermento de piña (P), pan con técnica Yudane (Y) y pan con técnica Yudane y fermento de piña (YP).

Las variables obtenidas fueron los torques característicos C1, C2, C3, C4 y C5, que permiten identificar el desarrollo de gluten, la estabilidad de proteínas, la gelatinización del almidón, la estabilidad de la fase gelatinizada y la retrogradación del almidón, respectivamente. Esta información permitió comparar el comportamiento reológico de las masas en función de las modificaciones tecnológicas aplicadas, evaluando el efecto individual y combinado del uso del fermento de piña y la técnica Yudane sobre la calidad reológica de las masas.

2.4.2. pH

Determinado conforme a la metodología descrita por la AOAC 973.41 (AOAC, 2017), utilizando un potenciómetro calibrado (modelo SevenDirect SD20, Mettler Toledo). Las mediciones se realizaron por triplicado, tanto en muestras de masa antes y después del leudado como en el pan horneado.

2.4.3. Humedad

Se pesaron 0,5 g de la miga del pan, y se determinó el contenido de humedad en triplicado mediante un analizador de humedad Rotronic HygroLab C1. El análisis se realizó por triplicado.

2.4.4. Color

El color de la corteza y la miga fue evaluado con un colorímetro Chroma Meter CR-400 (Konica Minolta), siguiendo la metodología propuesta por Guijarro-Fuertes et al. (2018). Se realizaron seis repeticiones para cada tipo de muestra (miga y corteza), registrando los valores L^* , a^* y b^* , Cr y Hue.

2.4.5. Volumen específico

El volumen específico del pan (cm^3/g) fue determinado conforme al método 10-05.05 de la AACCI (2010), utilizando un escáner 3D Revomini2. El peso fue registrado con una balanza analítica. El cálculo se realizó según la Ecuación 1. Los análisis se realizaron por triplicado.

$$\text{Volumen específico} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}{\text{Peso del pan (g)}} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

2.4.6. Alveolado de miga

La porosidad del pan fue evaluada a través del análisis de imágenes de secciones transversales de la miga, utilizando el software ImageJ. El procedimiento se realizó conforme a la metodología descrita por Guijarro-Fuertes et al. (2018). Las imágenes fueron procesadas para obtener los siguientes parámetros morfológicos de los alveolos: número total de alveolos, área media alveolar ($\bar{A}$), perímetro medio de los alveolos ($\bar{P}$) y la circularidad de los alveolos. La circularidad varía entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una forma más circular, y valores más bajos reflejan formas irregulares o alargadas.

2.4.7. Análisis microestructural

La microestructura de las muestras de pan fue analizada, según la metodología de Han et al. (2024) mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) modelo JEOL JXM-IT300 (JEOL, Japón). Las muestras de pan liofilizadas fueron cortadas en cuadrados de igual tamaño ($10 \times 10 \times 1$ mm, aproximadamente), recubiertas con oro y montadas en un soporte para microscopio. Las imágenes se obtuvieron a 2 kV, con aumentos de $50\times$ a $600\times$.

2.4.8. Análisis de perfil de textura

El perfil de textura fue evaluado mediante un texturómetro Lamy Rheology TX-700, aplicando el método TPA modificado descrito por AACC (1998, método 74-09). Se utilizaron rebanadas de 25 mm de espesor, comprimidas al 40% de su altura original. Se empleó una sonda cilíndrica de 25 mm de diámetro, a una velocidad de deformación de 2 mm/s. El análisis se realizó por triplicado. Los parámetros determinados fueron: dureza (N), consistencia (N), cohesividad, gomosidad (N), masticabilidad (N), elasticidad (N) y resiliencia. Los análisis se realizaron por triplicado.

2.5. Análisis Sensorial

Se realizó una prueba de aceptabilidad sensorial realizada el 27 de marzo del 2025 entre las 10:00 am – 12:30 am, en el laboratorio de evaluación sensorial de la Universidad San Francisco de Quito, con la participación de 61 consumidores no entrenados ($n = 61$), con edades comprendidas entre 18 y 58 años de edad (35 mujeres y 26 hombres). Se utilizó una escala hedónica de 9 puntos (1 = “me disgusta extremadamente”, 9 = “me gusta extremadamente”). Los atributos evaluados fueron: color, olor, suavidad y aceptación global (ANEXO A). Cada consumidor recibió las cuatro formulaciones en orden aleatorio, cada rebanada tenía 1 cm de espesor y fueron identificadas con códigos aleatorios de tres cifras: 415 (Y), 320 (YP), 211 (C) y 356 (P). Se presentaron las 4 muestras simultáneamente a cada juez en un orden aleatorio equilibrado. Para mayor detalle sobre los formatos utilizados, el procedimiento aplicado y las gráficas complementarias de la evaluación sensorial, se sugiere consultar el Anexo C.

2.6. Análisis Estadístico

Se realizó un análisis preliminar con los datos obtenidos en los ensayos experimentales la prueba de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk), homocedasticidad (prueba de Levene) y linealidad, una vez comprobados que los datos cumplieran con los tres supuestos se procedió a realizar el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias con el test de Tukey ($p < 0.05$) usando el software Minitab 19. Para todos los análisis fisicoquímicos realizados, se empleó un diseño factorial completo 2^2 con dos factores (uso de técnica Yudane y uso de fermento de piña), evaluando también su posible interacción. Los datos fueron analizados mediante ANOVA de dos vías, previa verificación de los supuestos estadísticos fundamentales. Todos los resultados estadísticos detallados incluyendo tablas de ANOVA y agrupaciones por letras para las variables que presentaron diferencias se encuentran disponibles en el Anexo B.

3. Resultados y discusión

3.1 Comportamiento reológico de las masas

El análisis reológico realizado mediante Mixolab permitió evaluar la respuesta de las masas a condiciones controladas de amasado y calentamiento, proporcionando información clave sobre la fuerza inicial, la estabilidad, la gelatinización, la ruptura y la retrogradación del almidón. Para facilitar la interpretación de los resultados, en la Figura 2 se presentan los diagramas tipo radar generados por el software Mixolab para cada tratamiento. Los valores específicos de torque (C1–C5), estabilidad y pendientes α , β y γ se encuentran disponibles en el Anexo A.

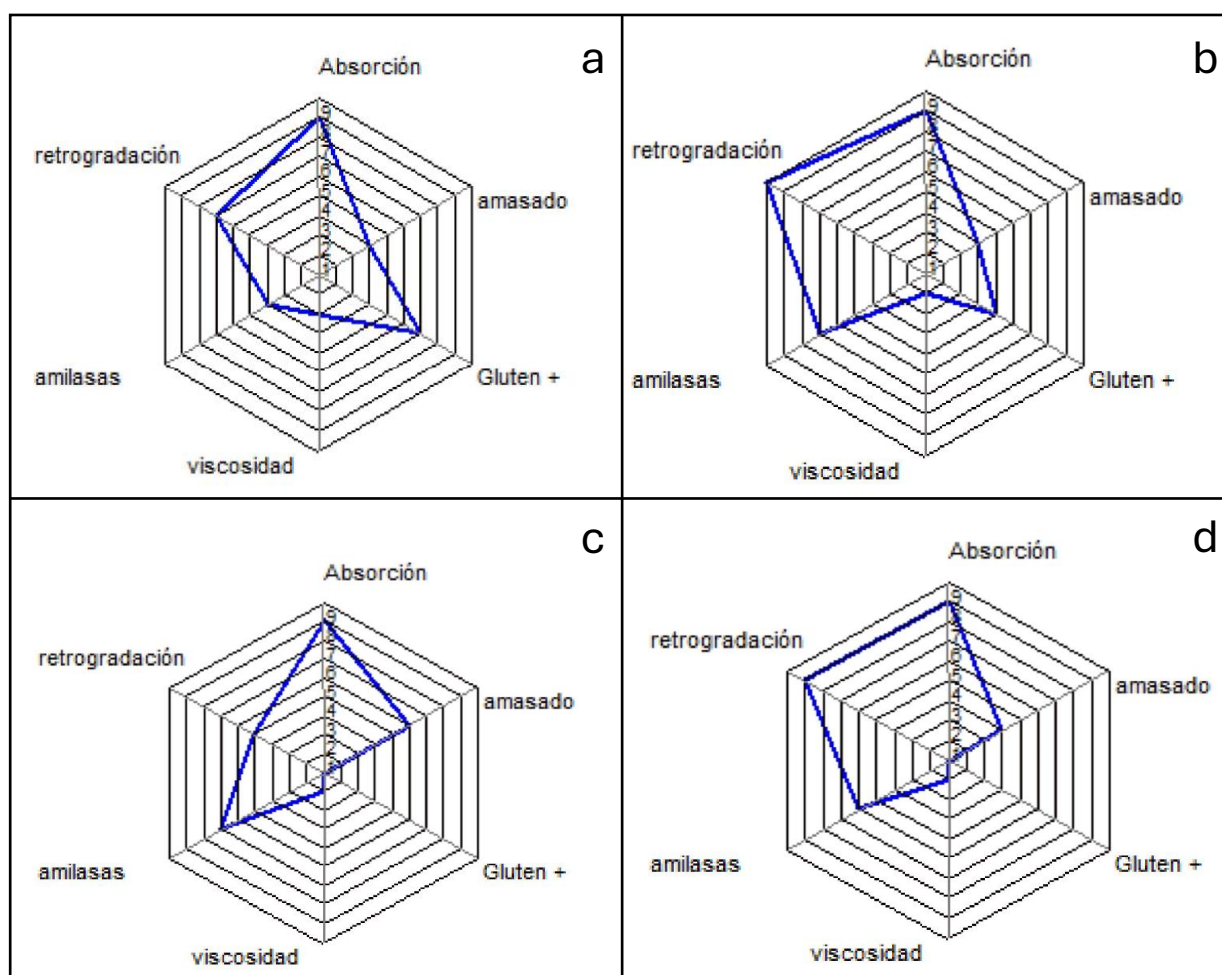


Figura 2. Reología de las masas: a) control, b) técnica yudane, c) reemplazo de agua por fermento de piña y d) combinación de la técnica yudane y fermento de piña.

El tratamiento control (Figura 2a) presentó un perfil equilibrado, destacando en estabilidad y viscosidad, con una absorción de agua moderada. Este comportamiento es típico de una formulación convencional sin pretratamientos ni fermentos, con una red de gluten desarrollada

adecuadamente y una gelatinización controlada. El tratamiento P (fermento de cáscara de piña) mostró una disminución marcada en los atributos de estabilidad y desarrollo del gluten, lo que podría explicarse por la acción acidificante del fermento, que contiene metabolitos de bacterias ácido-lácticas tras 48 horas de fermentación natural. Este tipo de microorganismos y sus compuestos derivados (como ácidos orgánicos y enzimas) pueden modificar la estructura de las proteínas, reduciendo la cohesión de la masa (Zaidiyah et al., 2020).

El tratamiento Y presentó una mayor absorción de agua y una destacada retrogradación. Esto concuerda con lo reportado por Yano et al. (2023), quienes indicaron que la técnica Yudane, al utilizar almidón pregelatinizado, aumenta la capacidad de retención de agua y favorece una mayor alineación de las cadenas de amilosa durante el enfriamiento. La mayor absorción observada se explica por la presencia de almidón ya hinchado que demanda más agua en la formulación. Finalmente, el tratamiento YP, que combinó los dos tratamientos, mostró el perfil más modificado, con baja estabilidad, baja viscosidad y alta retrogradación. Esta combinación sugiere un efecto aditivo entre la gelatinización previa del almidón (Yudane) y la desestabilización proteica inducida por el fermento ácido, lo cual modifica profundamente la estructura funcional de la masa.

El análisis detallado de los parámetros reológicos incluidos en la Figura 3 evidencian que tanto la técnica Yudane como el fermento de cáscara de piña alteraron significativamente el comportamiento funcional de las masas. El tratamiento Yudane (Y) mostró la menor fuerza inicial de amasado ($C1 = 0,90 \text{ Nm}$) y un marcado descenso en la gelatinización del almidón ($C3 = 0,62 \text{ Nm}$), comparado con el control ($C1 = 1,10 \text{ Nm}$; $C3 = 1,51 \text{ Nm}$), lo que refleja el efecto de la pregelatinización del almidón sobre la capacidad de la masa para desarrollar estructura bajo calentamiento (Yano et al., 2023). A su vez, la retrogradación ($C5$) en Yudane fue la más alta ($3,82 \text{ Nm}$), en contraste con el control ($1,86 \text{ Nm}$), indicando una mayor tendencia de las cadenas de almidón a reorganizarse durante el enfriamiento (Yamauchi et al., 2014). En cuanto al tratamiento con fermento (P), si bien $C1$ fue comparable al control ($1,09 \text{ Nm}$), la estabilidad se redujo notablemente ($5,27 \text{ min}$ vs. $10,93 \text{ min}$), y $C2$ disminuyó ($0,25 \text{ Nm}$), lo cual sugiere un debilitamiento de la red proteica asociado al efecto acidificante del fermento (Zaidiyah et al., 2020).

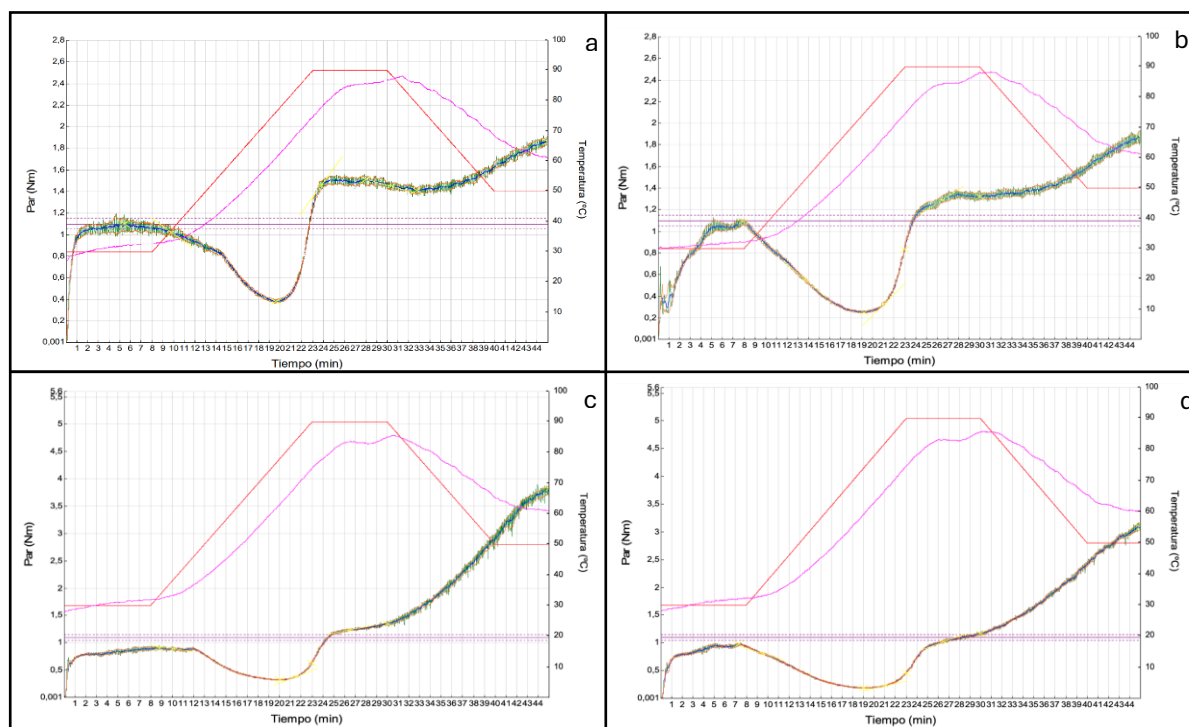


Figura 3. Perfil Mixolab de las masas: a) control, b) técnica yudane -Y-, c) reemplazo de agua por fermento de piña y d) combinación de la técnica yudane y fermento de piña, registradas según el protocolo Chopin+

La combinación de ambas técnicas (YP) produjo el perfil más alterado: C2 fue el valor más bajo (0,19 Nm), reflejando una alta susceptibilidad térmica; C3 también se redujo (0,46 Nm), y la viscosidad máxima durante cocci3n (C4) fue la más baja (1,17 Nm), en comparación con el control (C4 = 1,41 Nm). Esto indica una menor capacidad de las masas YP para formar una matriz gelatinizada consistente. La estabilidad también fue baja (5,63 min), y aunque C1 (0,98 Nm) fue superior al de Y, no alcanzó los valores del control. Las pendientes β y γ respaldaron estas observaciones: β fue la más baja en YP (0,044 Nm/min), señalando una gelatinización lenta, mientras que γ fue la más positiva (0,072 Nm/min), asociada a una mayor retrogradación. Estos resultados sugieren que el uso simultáneo de Yudane y fermento produce efectos sinérgicos que alteran de forma marcada la funcionalidad reológica de la masa, lo cual debe ser considerado al momento de formular productos que requieran estabilidad estructural y conservación.

3.2 pH y humedad

Con el fin de evaluar el efecto del uso del fermento de piña y la técnica yudane sobre las características de la masa, se midió el pH antes y después del leudado (Tabla 2). Únicamente se encontraron diferencias significativas en el pH de la masa después del leudado. La incorporación del fermento de piña redujo ligeramente el pH inicial de la masa en comparación con los tratamientos que utilizaron agua, lo cual coincide con lo reportado en sistemas de fermentación donde jugos frutales como el de manzana y limón que se utilizan como fuentes de ácido málico y cítrico para promover una acidificación controlada (Comasio, Van Kerrebroeck, & De Vuyst, 2021). La técnica Yudane, por su parte, no mostró influencia significativa sobre la acidez inicial.

Tabla 2. Parámetros tecnológicos: pH durante la fermentación y humedad final del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP)

Tratamiento	*pH de la masa		Pan	
	Inicial	Leudo	*pH	*Humedad
C	5.39 ± 0.08	5.13 ± 0.04 ^a	5.36 ± 0.13	32.87 ± 1.98
P	5.20 ± 0.24	4.99 ± 0.20 ^{ab}	5.24 ± 0.14	33.87 ± 0.98
Y	5.36 ± 0.08	5.12 ± 0.06 ^{ab}	5.35 ± 0.04	32.16 ± 0.77
YP	5.15 ± 0.02	4.84 ± 0.02 ^b	5.16 ± 0.03	31.31 ± 1.03

* Medias ± std seguidas por al menos una letra no difieren entre sí al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey.

Después del leudado se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El tratamiento YP, que combinó fermento de piña y la técnica Yudane presentó el pH más bajo ($4,84 \pm 0,02$), en contraste con el control ($5,13 \pm 0,04$). Esta mayor acidificación puede atribuirse a la actividad de bacterias ácido-lácticas y levaduras presentes en el fermento, que incrementan la producción de ácidos como el láctico y el acético durante la fermentación. Este comportamiento también ha sido observado en fermentos basados en jugos de frutas (Manshur et al., 2023; Zaidiyah et al., 2020). Además, el uso de fermento de piña favorece selectivamente el crecimiento de bacterias ácido-lácticas como *Lactobacillus spp.* e inhibe bacterias competidoras como *Leuconostoc spp.*, gracias a la acidificación temprana del medio (Zaidiyah et al., 2020).

Tras el horneado, no se identificaron diferencias estadísticamente significativas en el pH entre los tratamientos evaluados ($p > 0.05$). No obstante, se observó una ligera tendencia a valores

más bajos en los tratamientos que incluyeron fermento de cáscara de piña, lo cual podría estar relacionado con la acidificación natural generada durante la fermentación espontánea del líquido. Si bien en este estudio no se caracterizó microbiológicamente el fermento, sería interesante su análisis en futuras investigaciones para determinar su potencial como fuente de microorganismos funcionales y acidificantes naturales (probióticos y prebióticos) en panificación.

Respecto a la humedad del pan, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), y todos los valores se mantuvieron dentro del rango normativo establecido por la NTE INEN 2945 (humedad = 20–40 %). Aun así, se evidenció una tendencia decreciente en los tratamientos que incluyeron fermento, particularmente en YP (31,31 %), mientras que el tratamiento P presentó el valor más alto (33,87 %). Esta variación puede explicarse por la migración acelerada de agua libre durante el horneado en condiciones de acidez, fenómeno previamente reportado en productos enriquecidos con jugos de frutas ácidos (Sabanis et al., 2009). Aunque no se incorporó fibra insoluble como tal, es posible que el agua fermentada haya contenido compuestos solubles derivados de la cáscara, como oligosacáridos o pectinas hidrosolubles, con capacidad de interactuar con el sistema de almidón y proteína. Estudios realizados por Wu y Shiau (2014) han demostrado que la cáscara de piña posee una fracción de fibra dietaria soluble que puede migrar al medio acuoso, modificando la retención de agua de las masas. Este aspecto abre una línea de investigación relevante para evaluar la composición química del fermento líquido, en particular su contenido de compuestos prebióticos o funcionales, y su influencia en la hidratación, estructura y vida útil del pan.

3.3 Análisis de color

La apariencia externa e interna de los panes elaborados se muestra en las Figuras 3 y 4, respectivamente. El análisis de color de la corteza mostró que el tratamiento con fermento de cáscara de piña y técnica Yudane (YP) presentó la menor luminosidad (L^*) con un valor de 49.35 ± 3.49 , lo que indica una corteza más oscura en comparación con los demás tratamientos, como se observa en la Figura 3. Aunque estadísticamente no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) según se puede observar en la Tabla 3, esta tendencia visual sugiere un mayor grado de pardeamiento superficial. A diferencia de lo planteado inicialmente, esta reducción en la luminosidad podría estar relacionada con una mayor disponibilidad de azúcares reductores o compuestos fenólicos presentes en el fermento de cáscara de piña, los cuales

podrían haber intensificado las reacciones de Maillard y caramelización durante el horneado, especialmente en presencia de temperaturas elevadas (Purlis, 2010; Michalska et al., 2008).

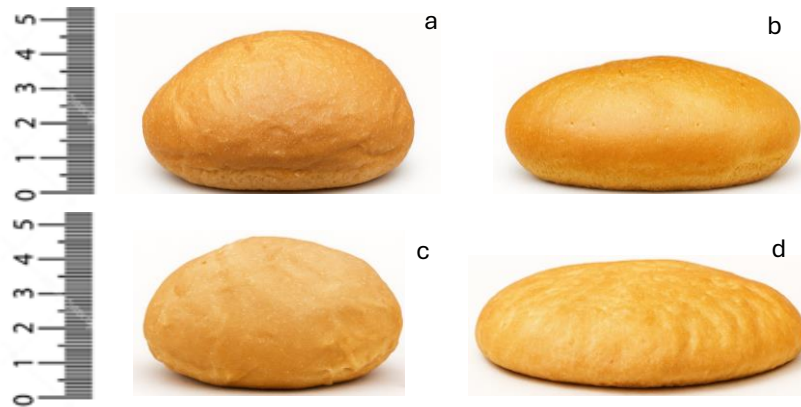


Figura 4. Apariencia externa de los panes elaborados: a) control -C-, b) reemplazo de agua por fermento de piña -P-, c) técnica yudane -Y-, y d) combinación de la técnica yudane y fermento de piña -YP-

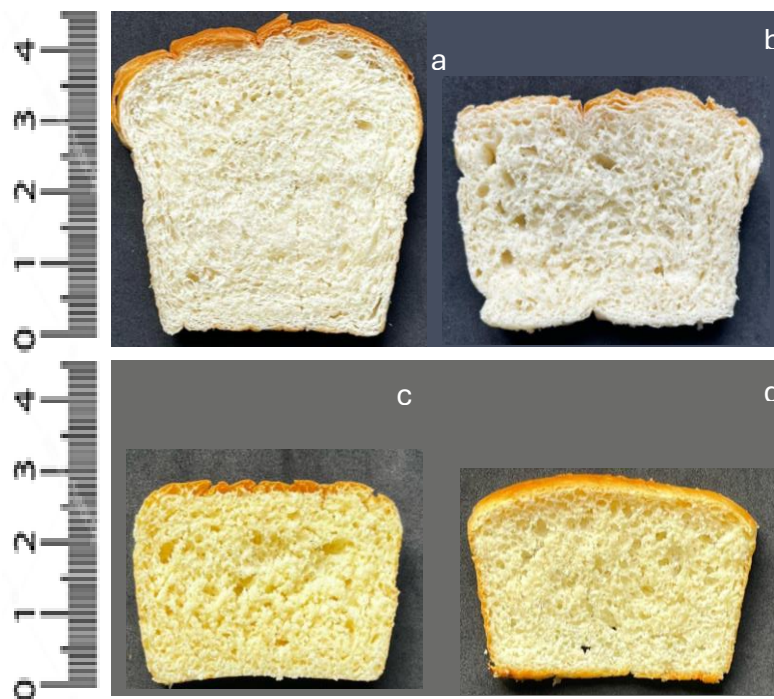


Figura 5. Apariencia interna de los panes elaborados: a) control -C-, b) reemplazo de agua por fermento de piña -P-, c) técnica yudane -Y-, y d) combinación de la técnica yudane y fermento de piña -YP-

Asimismo, el valor más alto del parámetro a^* (rojo) también fue registrado en el tratamiento YP (15.99 ± 0.09), lo cual refuerza la hipótesis de un pardeamiento más intenso. Este efecto puede haber sido potenciado por el aporte de fibra y compuestos antioxidantes derivados de la cáscara, los cuales modifican la distribución de humedad y aceleran los procesos térmicos en la superficie del pan (Wu & Shiau, 2014; López-Nuñez et al., 2018). En general, aunque no se alcanzó significancia estadística, la combinación del fermento y la técnica Yudane pareció alterar la formación del color en la corteza, posiblemente debido a la interacción entre pH, composición del fermento y dinámica térmica durante el horneado.

Tabla 3. Parámetros de color de corteza y miga del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP)

Tratamiento		L^*	a^*	b^*	Cr^*	Hue
Corteza	C	52.59 ± 7.50	13.16 ± 3.92	33.59 ± 1.59	36.25 ± 1.29	68.66 ± 6.51
	P	50.38 ± 9.08	13.10 ± 3.92	32.56 ± 2.42	37.0 ± 2.21	65.61 ± 4.66
	Y	50.70 ± 9.31	13.58 ± 4.32	30.90 ± 3.98	33.61 ± 2.37	65.43 ± 9.51
	YP	49.35 ± 3.49	15.99 ± 0.09	33.03 ± 2.01	35.74 ± 2.58	62.81 ± 2.86
Miga	C	73.79 ± 1.08^a	-1.72 ± 0.16	16.34 ± 0.07^{ab}	16.43 ± 0.07^{ab}	96.00 ± 0.57
	P	67.60 ± 0.15^b	-1.69 ± 0.05	17.28 ± 0.16^a	17.35 ± 0.16^a	95.58 ± 0.23
	Y	71.54 ± 0.47^a	-1.50 ± 0.06	15.73 ± 0.75^b	15.80 ± 0.75^b	95.47 ± 0.48
	YP	66.75 ± 2.04^b	-1.49 ± 0.09	16.41 ± 0.47^{ab}	16.47 ± 0.46^{ab}	95.24 ± 0.42

*Medias $\pm$ std seguidas por al menos una letra no difieren entre sí al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey.

En la miga, se observó un comportamiento similar, donde los tratamientos que emplearon fermento de piña mostraron mayor luminosidad. El tratamiento YP presentó la miga más clara (66.75 ± 2.04), seguido por Y (71.54 ± 0.47), como se observa en la figura 3. Esta mayor claridad podría explicarse por el hecho de que un ambiente ácido puede afectar la gelatinización del almidón y limitar parcialmente las reacciones de pardeamiento internas durante el horneado (Purlis, 2010). Además, la presencia de fibra podría alterar las propiedades ópticas de la miga, aumentando la dispersión de la luz y generando una percepción visual de mayor claridad.

El hecho de que no se observaran diferencias significativas en los parámetros de color a^* , b^* , C^* y Hue sugiere que la adición de fermento de piña no afectó perceptiblemente el matiz del color, sino únicamente su luminosidad. Esto implica que las variaciones de color observadas entre tratamientos fueron atribuibles principalmente a diferencias en la intensidad de los tonos claros y oscuros, sin que se alteraran las tonalidades rojizas o amarillas características del pan.

Estos resultados son coherentes con estudios que han señalado que el desarrollo del color en productos horneados depende críticamente del pH, la actividad de agua y la temperatura alcanzada en la superficie de la masa (Purlis, 2010; Shen et al., 2018). En particular, condiciones más ácidas y mayor contenido de agua libre tienden a limitar el pardeamiento superficial, favoreciendo la obtención de productos más claros.

3.4 Volumen

El análisis de varianza mostró que únicamente el tipo de líquido utilizado (agua o fermento) tuvo un efecto significativo sobre el volumen del pan ($p < 0,05$), mientras que no se observaron diferencias significativas en el volumen específico ni en la interacción entre técnica y líquido. No obstante, al analizar los promedios, se observa una tendencia general a la reducción del volumen y del volumen específico en los tratamientos que incluyeron fermento o técnica Yudane, según se muestra en la Tabla 4.

El mayor volumen se registró en el tratamiento control ($222,0 \pm 52,7 \text{ cm}^3$), mientras que el menor se observó en el tratamiento YP ($166,0 \pm 61,1 \text{ cm}^3$), que combinó el uso de fermento de cáscara de piña con la técnica Yudane. Esta disminución podría estar relacionada con el efecto de la acidificación inducida por el fermento, ya que un pH más bajo afecta la estabilidad de la red de gluten, disminuyendo su capacidad para retener gas durante el leudado (Garg et al., 2019). Adicionalmente, la técnica Yudane, aunque ha sido asociada con mejoras en la textura y conservación del pan, también puede reducir el volumen del producto final cuando se emplea en proporciones elevadas. En particular, Yano et al. (2023) reportaron que el uso de Yudane al 40% provocó una disminución del volumen del pan debido a un exceso de gelatinización del almidón, que interfiere con la formación de una estructura adecuada para la expansión.

Tabla 4. Volumen y volumen específico del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP)

Tratamientos	Volumen (cm^3)*	Volumen específico (cm^3/g)*
C	$222. \pm 52.7$	3.70 ± 0.87
P	$201. \pm 17.5$	3.36 ± 0.29
Y	$180. \pm 18.2$	2.98 ± 0.27
YP	$166. \pm 61.1$	2.78 ± 1.01

En este estudio se utilizó una proporción de Yudane del 40%, lo cual podría explicar la reducción observada en los tratamientos Y y YP, debido a una mayor densidad de la masa y menor capacidad de expansión. A pesar de estas diferencias numéricas, la prueba de Tukey no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, lo que puede atribuirse a la variabilidad experimental o al tamaño de muestra limitado. No obstante, la prueba de normalidad de Anderson-Darling para el volumen reportó un valor p de 0.937, lo que confirma que los datos siguen una distribución normal y valida el uso del ANOVA para este análisis.

En cuanto al volumen específico, se observó la misma tendencia decreciente, con valores entre $3.70 \pm 0.87 \text{ cm}^3/\text{g}$ (control) y $2.78 \pm 1.01 \text{ cm}^3/\text{g}$ (YP). Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, los resultados sugieren que tanto el fermento como la técnica Yudane podrían haber contribuido a la compactación de la miga y a una menor expansión de la masa durante el horneado.

Estos resultados concuerdan con estudios previos que indican que tanto la acidificación de la masa como el uso excesivo de masas pregelatinizadas pueden reducir el volumen del pan al interferir con la formación y expansión de la red de gluten (Garg et al., 2019; Yano et al., 2023). Por tanto, aunque el uso de fermentos y técnicas como Yudane puede mejorar otras propiedades como la textura o la vida útil, su impacto sobre el volumen final debe considerarse cuidadosamente en función del tipo de formulación y el nivel de incorporación. El volumen del pan está relacionado con la estructura de la miga (alveolado) e influirá directamente con las características texturales del pan.

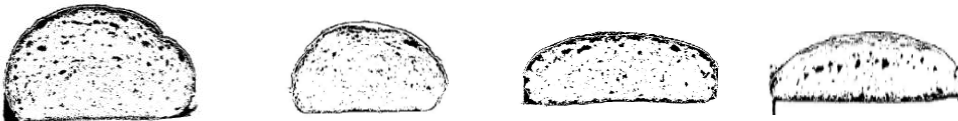
3.5 Alveolado de miga

La porosidad y morfología de los alveolos en la miga del pan son indicadores clave de la eficacia del proceso de fermentación, así como de la capacidad de la red de gluten para retener el CO_2 producido por la levadura. Según se observa en la Tabla 5, el tratamiento YP (fermento de cáscara de piña combinado con técnica Yudane) presentó el menor número de alveolos (58), el mayor valor de perímetro promedio (0,464 cm) y la menor circularidad (0,547). Estos resultados sugieren la formación de una estructura menos uniforme y potencialmente más inestable, que podría estar asociada a una debilitación de la red proteica. A pesar de que no se utilizó fibra sólida de cáscara de piña, el fermento líquido empleado pudo contener compuestos solubles como pectinas, oligosacáridos o ácidos orgánicos, que han sido descritos como

moduladores de la formación de miga y de la retención gaseosa en sistemas panarios (Wu & Shiau, 2014; Zaidiyah et al., 2020).

Adicionalmente, la combinación con la técnica Yudane —que implica la pregelatinización parcial del almidón— podría haber incrementado la viscosidad de la masa, reduciendo la movilidad del gas y alterando la distribución de los poros. Esta hipótesis es coherente con lo reportado por Yano et al. (2023), quienes observaron una reducción en el volumen y la expansión del pan al utilizar Yudane en niveles elevados, atribuida a una mayor densidad de la malla amilácea. Aunque en otros estudios se ha relacionado el uso de fibras solubles con una disminución en la cohesión del gas y una mayor dispersión de alveolos (Kurek et al., 2017), en este caso se sugiere que los efectos observados podrían estar más ligados a la sinergia entre el contenido de compuestos funcionales del fermento y las propiedades térmicas inducidas por el Yudane. Se recomienda caracterizar en futuras investigaciones el perfil de metabolitos solubles presentes en el fermento líquido, así como su interacción con la red de gluten y la distribución de gases durante el leudado y horneado.

Tabla 5. Alveolado de miga del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP)

Análisis de imagen de la miga de pan				
	C	P	Y	YP
Número de alveolos	174	165	107	58
Área media alveolada (cm ²)	0.007	0.009	0.006	0.01
Perímetro (cm ²)	0.377	0.413	0.37	0.464
Circularidad*	0.579	0.605	0.574	0.547

*Valor adimensional

Por otro lado, los tratamientos C (control) y P (piña) mostraron estructuras de miga más uniformes y compactas, con una mayor cantidad de alveolos (174 y 165, respectivamente), menor área promedio por alveolo y mayor circularidad. Esto puede deberse a una mejor retención del CO₂ gracias a una red de gluten más estable. De hecho, según Kurek et al. (2017), el tamaño y la uniformidad de los alveolos son afectados negativamente por la competencia de la fibra con el agua disponible, lo cual limita la gelatinización del almidón y la formación

adecuada del gluten. En particular, la presencia de fibra soluble o polisacáridos fermentables puede interferir con este proceso.

3.6 Análisis de perfil de textura (TPA)

El análisis de perfil de textura reveló que los tratamientos aplicados influyeron significativamente en gomosidad, dureza y masticabilidad, mientras que no se observaron diferencias en cohesión, elasticidad ni resiliencia, según se observa en la Figura 5. El tipo de líquido utilizado (agua o fermento de cáscara de piña) afectó significativamente la elasticidad y la masticabilidad de las muestras.

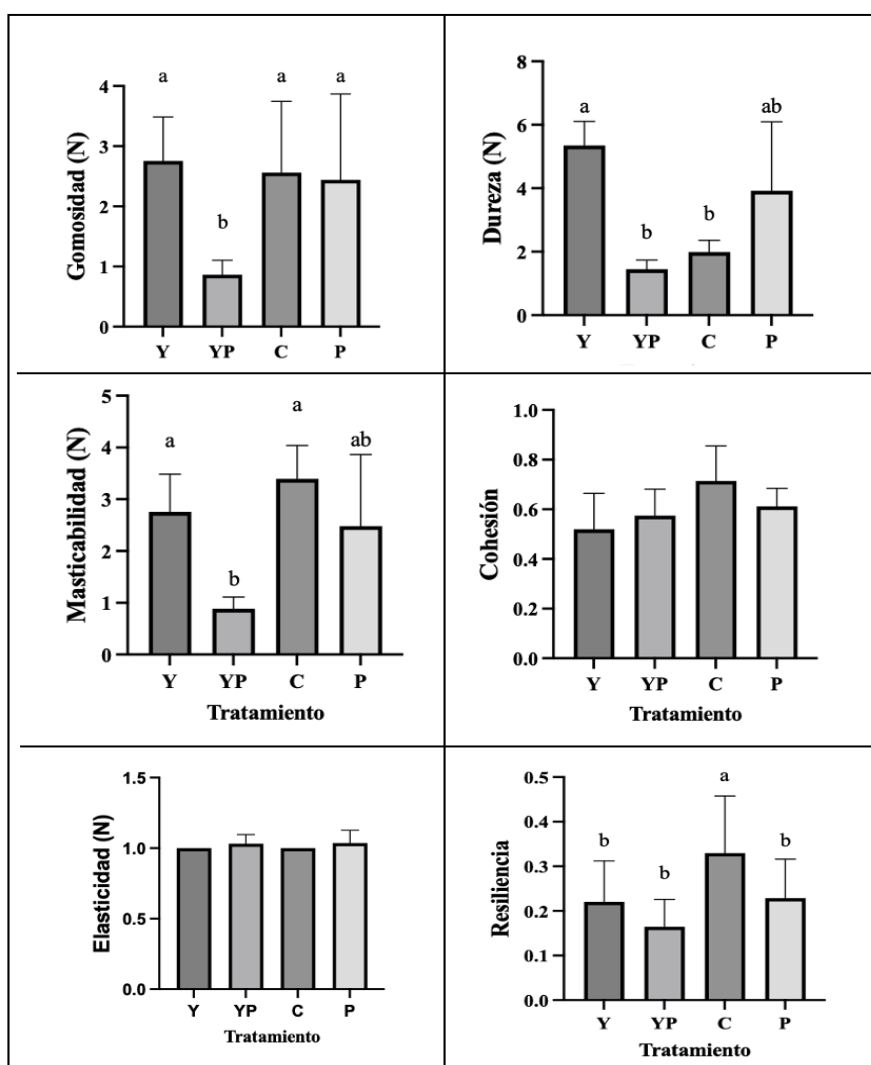


Figura 6. Análisis de perfil de textura del pan control (C), reemplazo de agua por fermento de piña (P), técnica yudane (Y), y combinación de la técnica yudane y fermento de piña (YP)

Medias seguidas por al menos una letra no difieren entre sí al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey. control (C), yudane (Y), yudane piña (YP) y piña (P).

Respecto a la gomosidad, el tratamiento YP presentó el valor más alto ($3,57 \pm 0,17$ N), lo que indica una estructura más densa y resistente a la deformación durante la masticación. Este comportamiento podría atribuirse a la acción sinérgica entre la pregelatinización del almidón inducida por la técnica Yudane y la acidificación del medio generado por el fermento, factores que pueden promover una red de gluten más estructurada, con mayor formación de enlaces cruzados y modificaciones en las estructuras secundarias de las proteínas (Garg et al., 2019). Esta hipótesis es respaldada por la gráfica de interacción presentada en el Anexo B5.1, donde se observa un efecto conjunto significativo entre técnica y tipo de líquido en la gomosidad, con una marcada diferencia entre el uso de fermento y agua en presencia de Yudane.

En cuanto a la dureza, el tratamiento Y mostró el mayor valor ($5,35 \pm 0,19$ N), en tanto que el tratamiento P fue el que presentó la miga más blanda ($3,92 \pm 2,01$ N). Esto confirma que el pretratamiento térmico del almidón en la técnica Yudane promueve una mayor capacidad de retención de agua y rigidez en la matriz panaria, efecto que se ha descrito previamente en estudios relacionados con técnicas de pregelatinización (Yano et al., 2023; Yamauchi et al., 2014). Por su parte, el efecto acidificante del fermento de cáscara de piña puede debilitar la red de gluten, comprometiendo la firmeza del producto final (Garg et al., 2019). Este patrón también se evidencia en la interacción significativa mostrada en el Anexo B5.1, donde la técnica Yudane, en combinación con agua, maximiza la dureza, mientras que su uso con fermento reduce considerablemente este parámetro.

La masticabilidad también reflejó diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento YP fue el menos masticable ($0,88 \pm 0,09$ N), lo que implica que se requería menor energía para desintegrar la miga durante la masticación. Este comportamiento puede explicarse por una estructura interna más abierta y menos densa, resultado del efecto combinado del pH ácido del fermento y la alteración de la matriz de gluten durante la preparación con Yudane.

Respecto a la resiliencia, se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el pan control (C) el que presentó el mayor valor ($\approx 0,35$), significativamente superior a los tratamientos con fermento (YP y P). Esto sugiere que el uso del fermento puede reducir la capacidad del pan para recuperar su forma tras una deformación, posiblemente por un debilitamiento de la red de gluten inducido por la acidificación. En contraste, no se encontraron diferencias significativas en cohesión ni elasticidad, lo que indica que la capacidad de las muestras para resistir fuerzas internas o mantener su integridad estructural no fue alterada drásticamente por los tratamientos aplicados.

En conjunto, estos resultados son coherentes con lo reportado numerosos estudios, que señalan que la fermentación con ácidos orgánicos tiende a reducir la firmeza, resiliencia y cohesión, mientras que técnicas como Yudane favorecen una textura más compacta, con mayor gomosidad y resistencia mecánica, debido a la gelatinización parcial del almidón antes del horneado (Yano et al., 2023; Yamauchi et al., 2014; Garg et al., 2019).

3.7 Análisis microestructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El análisis microestructural mediante SEM permitió observar las diferencias en la organización de la miga entre los tratamientos. Las imágenes revelan cambios en la red porosa y la continuidad de la matriz (Figura 6), que pueden estar relacionados con los efectos de la técnica Yudane, la incorporación del fermento de piña o la combinación de ambos.

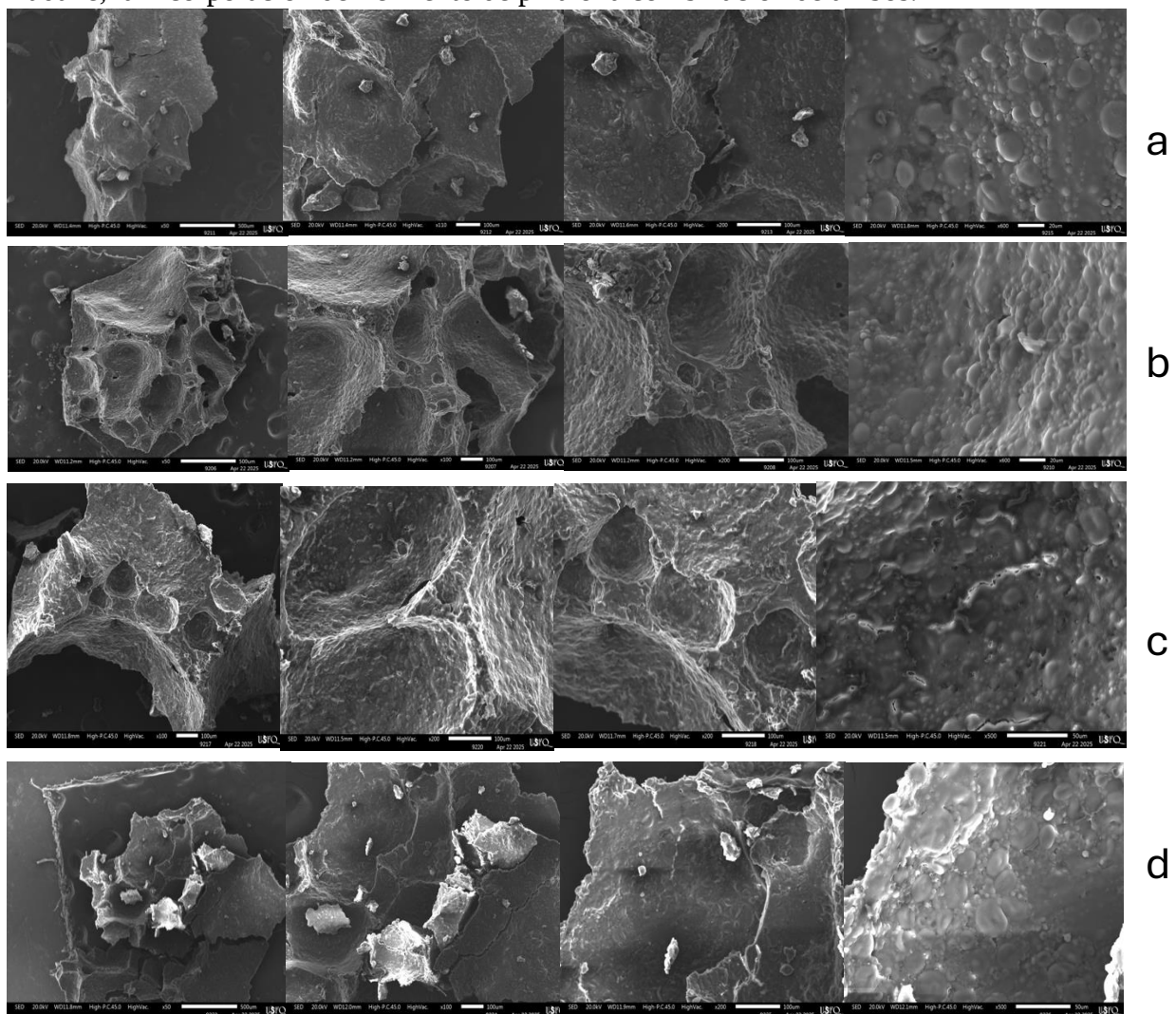


Figura 7. Imágenes SEM del pan: a) control, b) yudane-piña, c) piña y d) yudane (Y) con magnificación de 50X a 600X.

En el tratamiento control (C), se observa una estructura con alvéolos de tamaño relativamente uniforme y paredes continuas, lo que indica una red de gluten bien desarrollada. La matriz es más densa, con menor presencia de fracturas, lo que concuerda con los valores más altos de volumen y textura más firme observados en los análisis anteriores.

En el tratamiento Piña (P), la microestructura muestra una red más abierta, con alvéolos irregulares y paredes más delgadas. Esta pérdida de uniformidad puede atribuirse a la acción acidificante del fermento, que altera la reticulación de las proteínas del gluten y reduce su capacidad para retener gas de manera homogénea (Garg et al., 2019). Estas observaciones coinciden con la disminución de la fuerza de la masa observada en Mixolab (menor C1) y con los valores reducidos de dureza y masticabilidad.

La muestra correspondiente al tratamiento Yudane (Y) muestra una estructura más compacta y homogénea, con alvéolos pequeños y paredes más continuas. Este comportamiento puede relacionarse con la pregelatinización del almidón promovida por la técnica Yudane, que mejora la retención de humedad y favorece una red más estable y uniforme durante la cocción (Yamauchi et al., 2014). La menor degradación observada en Mixolab (mayor C2 y C5) también respalda esta estructura más integrada.

Por último, en el tratamiento Yudane-Piña (YP) se observa una matriz menos organizada, con zonas colapsadas y paredes discontinuas. Esta combinación de alteraciones puede deberse al efecto simultáneo de la acidificación del fermento y la pregelatinización del almidón, lo que produce una red menos cohesiva y más susceptible a deformaciones durante el horneado. Esta desorganización estructural se refleja también en los bajos valores de volumen y en los parámetros reológicos más alterados en el ensayo Mixolab.

Estas observaciones confirman que los tratamientos aplicados influyen de manera clara en la arquitectura interna del pan. El tratamiento Yudane generó estructuras más cohesivas y densas, mientras que el fermento de piña provocó estructuras más frágiles y porosas. La combinación de ambas técnicas produjo la mayor disrupción microestructural, lo cual justifica los resultados sensoriales y texturales observados.

3.8 Análisis sensorial

El análisis de varianza (ANOVA) realizado mostró que existieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los tratamientos de pan evaluados en los atributos de olor, apariencia global y suavidad, lo cual indica que las distintas formulaciones influyeron en la percepción sensorial de estos atributos por parte de los consumidores (Figura 7). Por el contrario, en el atributo color

no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$), evidenciando que el uso de fermento de piña, la técnica Yudane o su combinación no afectaron la percepción visual del pan. Adicionalmente, se observaron diferencias significativas ($p\leq 0,05$) entre los jueces en todos los atributos evaluados, resultado esperable considerando la naturaleza subjetiva y variable de las preferencias de los consumidores. Los resultados detallados de este análisis se presentan en el Anexo B.

Como se observa en la Figura 7, los resultados de la evaluación sensorial evidencian diferencias claras en la percepción de los consumidores según el tratamiento aplicado. Con base en los resultados obtenidos en la prueba hedónica de nueve puntos (1 = me disgusta muchísimo, 9 = me gusta muchísimo), se puede afirmar que existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en los atributos de olor, suavidad y aceptación global, pero no en color.

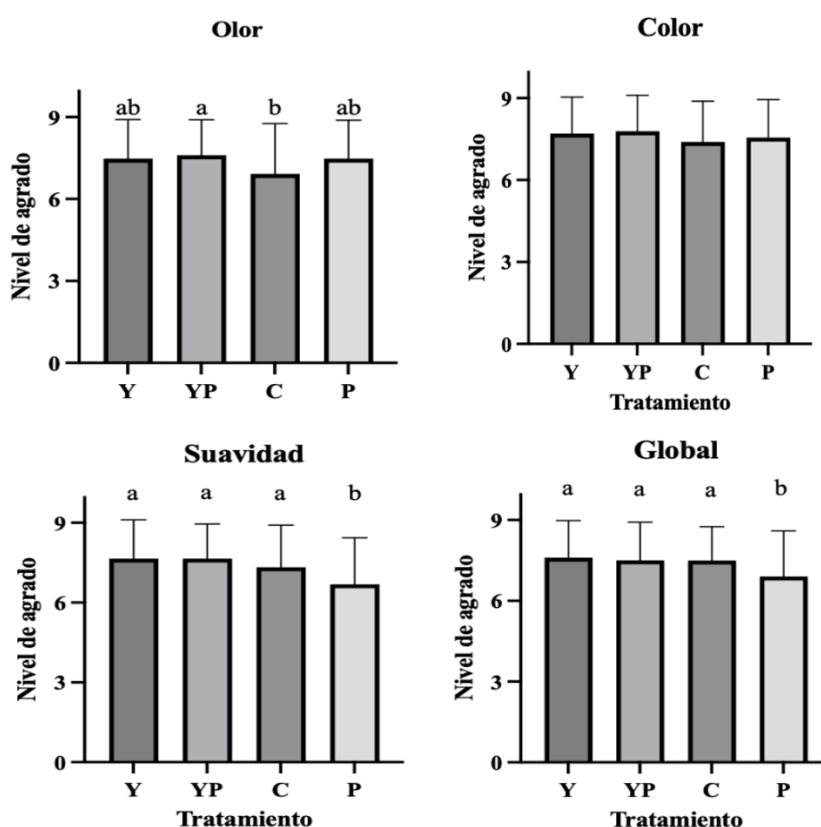


Figura 8. Evaluación sensorial del pan control (C), yudane (Y), yudane piña (YP) y piña (P). Medias seguidas por al menos una letra no difieren entre sí al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey,

En el atributo olor, el tratamiento YP obtuvo el puntaje promedio más alto (7.60 ± 1.29), significativamente superior al del tratamiento C, que presentó el menor nivel de agrado (6.91 ± 1.85 ; $p = 0.013$). Esta diferencia sugiere que la inclusión del fermento pudo haber contribuido a una mayor complejidad aromática, posiblemente por la presencia de compuestos volátiles agradables derivados de bacterias ácido-lácticas que se desarrollaron durante la fermentación de la cáscara de piña como el ácido cítrico o málico (Zaidiyah et al., 2020).

En cuanto a la suavidad, según se observa en la Figura 7, el tratamiento P fue el menos valorado sensorialmente (6.68 ± 1.75), difiriendo significativamente de los otros tratamientos, todos por encima de 7.3. Esto sugiere que la combinación del fermento con la técnica Yudane favorece una estructura interna más blanda y agradable al tacto. Finalmente, para la apariencia global, el tratamiento P volvió a presentar la puntuación más baja (6.90 ± 1.69 ; $p = 0.008$), mientras que los tratamientos que incluyeron Yudane (Y y YP) mantuvieron niveles de agrado superiores a 7.5, sin diferencias significativas entre sí. Esto respalda la hipótesis de que la técnica Yudane aporta beneficios sensoriales consistentes. En contraste, no se observaron diferencias significativas en el atributo color ($p = 0.196$), lo que concuerda con los análisis instrumentales previos que no mostraron variaciones significativas en este parámetro. Complementariamente, la Figura 8 presenta una gráfica de araña que resume visualmente el comportamiento promedio de cada tratamiento en los atributos evaluados.

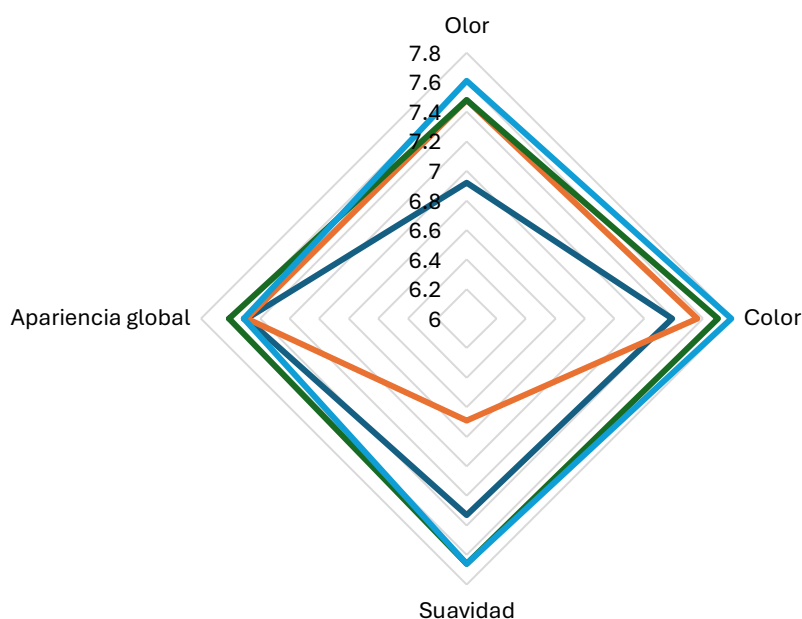


Figura 9. Evaluación sensorial de atributos descriptivos en panes con diferentes formulaciones: control (línea azul), yudane (línea verde), yudane piña (línea celeste) y piña (línea naranja).

Se puede apreciar que los tratamientos Y y YP presentan las áreas más amplias y balanceadas, reflejando los niveles más altos de agrado sensorial en todos los atributos. En contraste, los tratamientos C y P muestran perfiles más reducidos, especialmente en suavidad y aceptación global. Esta representación gráfica refuerza los resultados estadísticos e indica que la técnica Yudane, sola o en combinación con el fermento, tiene un efecto positivo en la percepción sensorial del pan.

4. Conclusiones

Las características tecnológicas del pan dulce se ven significativamente influenciadas por la incorporación del fermento de cáscara de piña y la aplicación de la técnica Yudane. Si bien no se encontraron efectos estadísticamente significativos en parámetros como el pH final del pan, la humedad o el color instrumental, se evidenciaron cambios relevantes en la gomosidad, dureza y comportamiento reológico. La técnica Yudane favoreció una mayor absorción de agua y retrogradación del almidón, estabilizando la red interna de gluten y mejorando la textura. Por su parte, el fermento redujo el pH luego del leudado y habría alterado la red proteica, lo que explicaría la disminución del volumen y las modificaciones observadas en el perfil textural. En conjunto, ambos tratamientos generaron sinergias que alteraron la funcionalidad de la masa y las características del pan, permitiendo obtener un producto aceptable y conforme con los requisitos establecidos por la legislación nacional vigente.

A nivel microestructural, la combinación del fermento y la técnica Yudane (YP) provocó el mayor impacto, observándose una red de gluten más débil con alveolos irregulares y colapsados, de acuerdo con las imágenes SEM y los análisis del alveolado de miga. Esto contrasta con la estructura más compacta del tratamiento con solo Yudane (Y), y la red más porosa generada por el fermento de cáscara de piña (P). Estos resultados respaldan que la técnica Yudane por sí sola aporta estabilidad estructural, mientras que el fermento, aunque contribuye con compuestos funcionales y acidificación, puede debilitar la red si no se acompaña de un método compensatorio que mejore el comportamiento reológico. Asimismo, se sugiere que el tipo de fruta empleada y su microbiota asociada afectan no solo la acidez del fermento, sino también características como el color de la miga, debido a la producción de metabolitos secundarios y pigmentos naturales cuya expresión varía según la variedad de la piña y las condiciones de fermentación.

Finalmente, la aceptabilidad sensorial se vio favorecida principalmente por la técnica Yudane, especialmente en los atributos de suavidad, olor y apariencia global. La combinación YP, a pesar de su impacto sobre la estructura del pan, alcanzó altos niveles de agrado, posiblemente relacionados con el aroma y color conferidos por los compuestos generados durante la fermentación de la cáscara de piña. Estos resultados abren nuevas oportunidades para la innovación en panificación, destacando el valor de técnicas artesanales y subproductos agroindustriales en la elaboración de productos funcionales. No obstante, se recomienda evaluar el fermento desde una perspectiva microbiológica y funcional, así como explorar su

escalabilidad industrial en combinación con técnicas que garanticen la estabilidad de la matriz panaria.

Para fortalecer los resultados obtenidos, se recomienda probar el reemplazo del agua por leche en la preparación del Yudane. Esta modificación podría influir positivamente en la textura y sabor del pan al aportar proteínas, grasas y lactosa, componentes que pueden contribuir a una miga más suave y de mejor color. Además, para facilitar la escalabilidad industrial de este proceso, es esencial optimizar las condiciones de fermentación y amasado, así como explorar alternativas de automatización para mantener la calidad tecnológica en producciones a gran escala. Por último, se sugiere realizar una caracterización microbiológica de las bacterias ácido-lácticas (BAL) presentes en el fermento de cáscara de piña, identificando las cepas predominantes y su capacidad para producir compuestos funcionales como ácidos orgánicos y enzimas que podrían mejorar la estabilidad y conservación del producto final.

Referencias

- AACC Method 74e09.01. (1995). Measurement of bread firmness by universal testing machine. AACC International Approved Methods.
- AACCI. (2010) Approved Methods of Analysis. American Association of cereal chemist international, 11th Edition.
- Ahmed, J.; Thomas, L.; Al-Hazza, A. Effects of frozen storage on texture, microstructure, water mobility and baking quality of brown wheat flour/ β -glucan concentrate Arabic bread dough. *Journal of Food Measurement and Characterization* 2021, 15, 1258-1269,
- AIBI. (2015) Annual Report and list of members 2015. The Federation of Bakers, London, p. 28.
- Andrade-Cuvi, M. J., Guijarro-Fuertes, M., Concellón, A., Vernaza, M. G., & Bravo-Vásquez, J. (2021). Quality and bioaccessibility of antioxidants of bread enriched with naranjilla (*Solanum quitoense*) fruit. *Nutrition & Food Science*, 51(8), 1282-1298.
- AOAC International. (2012). Official methods of AOAC International.
- AOAC. (1998) Official methods of analysis. Washington D.C: Association of Analytical Chemists.
- Ávila, J. G., Carrillo, M. L., & Reyes, A. (2018). Modificación de la técnica volumétrica de mohr para cuantificar sodio en queso fresco Modification of the mohr volumetric technique to quantify sodium in fresh cheese. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 5(16), 1-4.
- Ávila, J. G., Carrillo, M. L., & Reyes, A. (2018). Modificación de la técnica volumétrica de mohr para cuantificar sodio en queso fresco Modification of the mohr volumetric technique to quantify sodium in fresh cheese. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 5(16), 1-4.
- Comasio, A., Van Kerrebroeck, S., & De Vuyst, L. (2021). Lemon juice and apple juice used as source of citrate and malate, respectively, enhance the formation of buttery aroma compounds and/or organic acids during Type 2 and Type 3 sourdough productions performed with *Companilactobacillus crustorum* LMG 23699. *International Journal of Food Microbiology*, 339, 109020.

- Garg, P., Sharma, R., & Shukla, A. (2019). Effect of pH on the structure and functionality of gluten proteins. *Journal of Cereal Science*, 89, 102796.
- Gonzalez-Anton, C., Artacho, R., Ruiz-Lopez, M. D., Gil, A., & Mesa, M. D. (2015). *Modification of appetite by bread consumption: A systematic review of randomized controlled trials. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(14), 3035–3050.
- Guijarro-Fuertes, M., Andrade-Cuvi, M. J., Bravo-Vasquez, J., Ramos-Guerrero, L., & Vernaza, M. G. (2018). Andean blueberry (*Vaccinium floribundum*) bread: physicochemical properties and bioaccessibility of antioxidants. *Food Science and Technology*, 39(Suppl. 1), 56-62.
- Guijarro-Fuertes, M., Andrade-Cuvi, M.J., Bravo-Vasquez, J., Ramos-Guerrero, L. and Vernaza, M.G. (2018), “Andean blueberry (*vaccinium floribundum*) bread: physicochemical properties and bioaccessibility of antioxidants”, *Food Science and Technology*, Vol. 39 No. suppl 1.
- Han, S., Liu, X., Chen, S., Li, P., Bai, Z., Yue, C., ... & Li, X. (2024). Quality and staling characteristics of wheat bread improved by adding *Eucommia ulmoides* olive leaf micropowder. *LWT*, 198, 116008.
- Hernández, Á. G. (2015). *Libro blanco del pan*. Ed. Médica Panamericana.
- INEC (2019), Índice de precios al consumidor.
- INEC (2022), Boletín Técnico N°01-2024-ENESEM Encuesta Estructural Empresarial (ENESEM).
- Krasnikova, E.S.; Krasnikov, A.V.; Babushkin, V.A. The influence of composite flour mixtures on *saccharomyces cerevisiae* biotechnological properties and bread quality. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020, 421, 022008.
- Kurek, M. A., Wyrwicz, J., Karp, S., Niu, Y., & Wierzbicka, A. (2017). Comparative analysis of dough rheology and quality of bread baked from fortified and high-in-fiber flours. *Journal of Food Engineering*, 206, 101–108.
- Lammers, K.M.; Herrera, M.G.; Dodero, V.I. Translational Chemistry Meets Gluten-Related Disorders. *ChemistryOpen* 2018, 7, 217-232.

- Lasekan, O., Bakar, F. A., & Hashim, D. (2011). Pineapple waste utilization: A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9(3&4), 68–74.
- López, J. A., Alcántar, O. R., & García, J. A. A. (2023). Identificación de levaduras aisladas del Tepache tradicional de Guerrero, México: Identification of yeasts isolated of the traditional Tepache of Guerrero, Mexico. *e-CUCBA*, (20), 132-140.
- López-Nuñez, J. S., Salcedo-Mendoza, J. G., Arteaga-Marquez, M. R., & Perez-Sierra, O. A. (2018). *Effect of drying on the physicochemical and techno-functional properties of pineapple peel flour*. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(46), 1–8. DOI: [10.17485/ijst/2018/v11i46/137450](https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i46/137450)
- Manshur, H. A., Putri, D. N., Pakpahan, O. P., Akalentera, Q. W., & Harini, N. (2023). The application of various fermented Malang apple water as a source of natural yeast for sourdough bread processing. *Indonesian Food and Nutrition Progress*, 20(2), 52–59.
- Marti, A., Calvo, C., & Martínez, A. (2021). Consumo de alimentos ultraprocesados y obesidad: una revisión sistemática. *Nutrición Hospitalaria*, 38(1), 177-185
- Michalska, A., Ceglinska, A., Amarowicz, R., Piskula, M. K., Szawara-Nowak, D., & Zielinski, H. (2008). Antioxidant contents and antioxidative properties of traditional rye bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(7), 2800–2805.
- Mitelut, A. C., Popa, E. E., Popescu, P. A., & Popa, M. E. (2021). Trends of innovation in bread and bakery production. *Trends in wheat and bread making*, 199-226.
- Nawrocka, A.; Szymańska-Chargot, M.; Miś, A.; Wilczewska, A.Z.; Markiewicz, K.H. Effect of dietary fibre polysaccharides on structure and thermal properties of gluten proteins—A study on gluten dough with application of FT-Raman spectroscopy, TGA and DSC. *Food Hydrocolloids* 2017, 69, 410-421.
- Nissen, S. (1998). *Food Analysis Second Edition*. An Aspen Publication. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Ortega Ramírez, G. O., Cruz Vicente, M. Á., & Jerónimo Velázquez, M. (2021). Importancia de la responsabilidad ambiental y social de las empresas en México: caso Grupo Bimbo.

- Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products – A review. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 239–249.
- Ramírez, J. S. (2012). *Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor*. Revista ReCiTeIA
- Sabanis, D., Lebesi, D., & Tzia, C. (2009). Quality characteristics of bread produced from frozen dough containing different fruit juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 559–564.
- Sarangi, P. K., Singh, A. K., Srivastava, R. K., & Gupta, V. K. (2023). Recent progress and future perspectives for zero agriculture waste technologies: Pineapple waste as a case study. *Sustainability*, 15(4), 3575.
- Shen, Y., Jin, Y., & Li, Y. (2018). Effects of bread baking on the antioxidant activities of Maillard reaction products derived from sugars and amino acids. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(9), 2141–2148.
- Świeca, M., Sęczyk, Ł., Gawlik-Dziki, U., & Dziki, D. (2014). Bread enriched with quinoa leaves—The influence of protein–phenolics interactions on the nutritional and antioxidant quality. *Food Chemistry*, 162, 54–62.
- Thiranusornkij, L., Thamnarathip, P., Chandrachai, A., Kuakpetoon, D., & Adisakwattana, S. (2019). Comparative studies on physicochemical properties, starch hydrolysis, predicted glycemic index of Hom Mali rice and Riceberry rice flour and their applications in bread. *Food Chemistry*, 283, 224–231.
- Tsuboi, K., Ohara, A., Matsushita, K., Yamada, D., Santiago, D. M., Kawakami, S., ... Yamauchi, H. (2017). The Kinetic Analysis and Simulation of Hardening in Bread Made by the Yudane Dough Method. *Food Science and Technology Research*, 23(2), 229–236.
- Verbauwhede, A.E.; Lambrecht, M.A.; Fierens, E.; Shegay, O.; Brijs, K.; Delcour, J.A. Impact of aqualysin 1 peptidase from *Thermus aquaticus* on molecular scale changes in the wheat gluten network during bread baking. *Food chemistry* 2019, 295, 599-606,

- Wandersleben, T., Morales, E., Burgos-Díaz, C., Barahona, T., Labra, E., Rubilar, M., & Salvo-Garrido, H. (2018). Enhancement of functional and nutritional properties of bread using a mix of natural ingredients from novel varieties of flaxseed and lupine. *LWT*, 91, 48-54.
- Wu, Y. C., & Shiau, S. Y. (2014). Effect of pineapple peel fiber on dough rheology and steamed bread quality. *Food Science and Technology Research*, 20(5), 1021–1028.
- Xiong, X., Cao, X., Zeng, Q., Yang, X., Wang, Y., Zhang, R., Huang, F., Dong, L., Zhang, M., & Su, D. (2021). Effects of heat pump drying and superfine grinding on the composition of bound phenolics, morphology and microstructure of lychee juice by-products. *LWT - Food Science and Technology*, 144, Article 111206.
- Yamada, D., Inoue, S., Yoshino, S., Tsuboi, K., Koaze, H., & Yamauchi, H. (2017). *Effect of Heated Gluten on Bread-making Qualities of Yudane Dough*. *NIPPON SHOKUHO KAGAKU KOGAKU KAISHI*, 64(2), 90–97.
- Yamauchi, H., Yamada, D., Murayama, D., Santiago, D. M., Orikasa, Y., Koaze, H., ... & Noda, T. (2014). The staling and texture of bread made using the Yudane dough method. *Food Science and Technology Research*, 20(5), 1071-1078.
- Yang, J., Tan, H., & Cai, Y. (2016). Characteristics of lactic acid bacteria isolates and their effect on silage fermentation of fruit residues. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5325-5334.
- Yano, H., Aoki, M., & Matsumoto, A. (2023). Yudane bread produced using amorphous wheat flour processed in a shear and heat milling machine. *Food Research International*, 165, 112553.
- Zaidiyah, Z., Salamah, A. A., & Kartika, I. A. P. (2020). Physicochemical properties of sourdough bread made from sweet potato with pineapple juice starter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1), 012016.
- Zain, M. Z. M., Shori, A. B., & Baba, A. S. (2022). Potential functional food ingredients in bread and their health benefits. *Biointerface Res. Appl. Chem*, 12(5), 6533-6542.

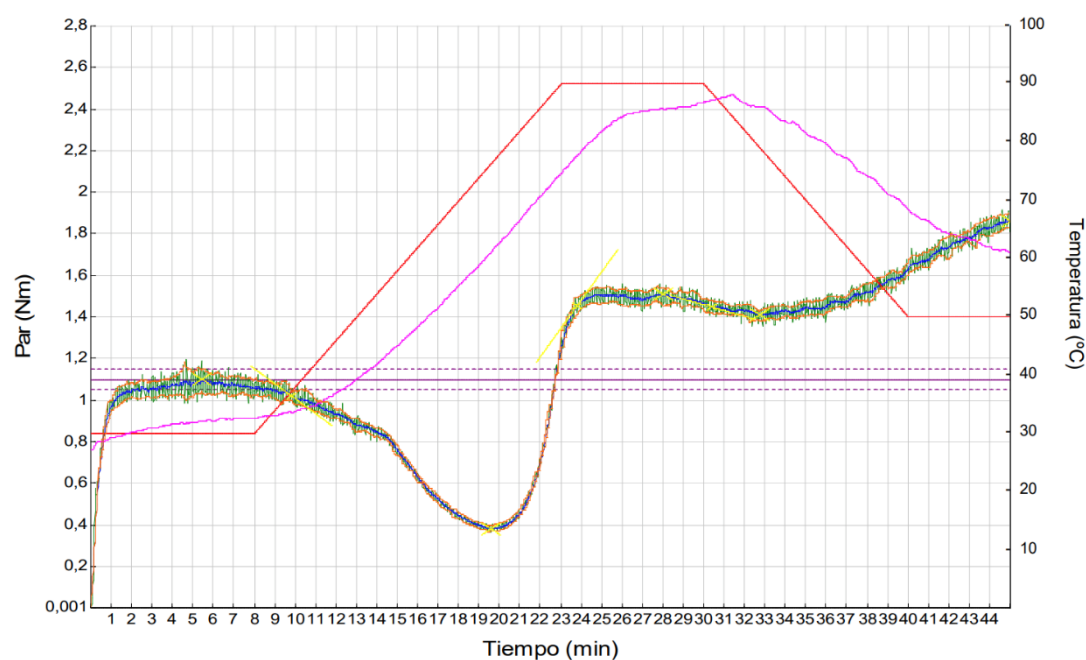
ANEXOS

ANEXO A: Análisis reológico de masas - Mixolab

Control

	Tiempo (min)	Par (Nm)	Temp. Masa (°C)	Amplitud (Nm)	Estabilidad (min)
C1	5,43	1,10	32,0	0,11	10,93
C2	19,58	0,38	61,1		
C3	28,02	1,51	85,7		
C4	32,75	1,41	86,1		
C5	45,03	1,86	61,0		

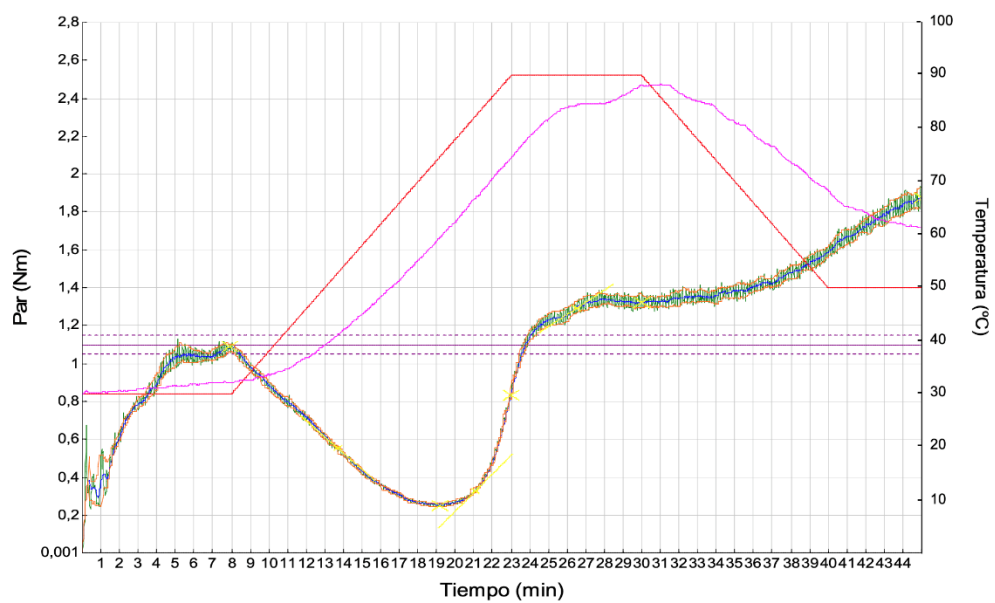
α :	-0,072	Nm/min
β :	0,136	Nm/min
γ :	-0,028	Nm/min



Piña

	Tiempo (min)	Par (Nm)	Temp. Masa (°C)	Amplitud (Nm)	Estabilidad (min)
C1	7,92	1,09	32,2	0,04	5,27
C2	19,17	0,25	59,4		
C3	23,00	0,83	74,4		
C4	30,00	1,32	88,1		
C5	45,03	1,87	61,3		

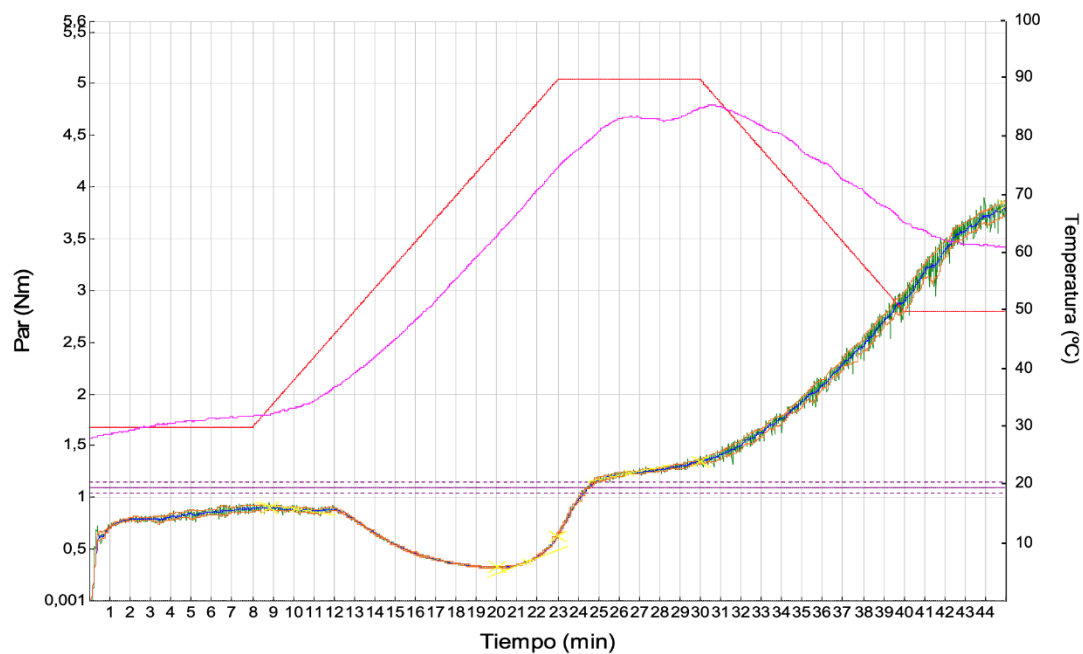
α :	-0,086	Nm/min
β :	0,098	Nm/min
γ :	0,064	Nm/min



Yudane

	Tiempo (min)	Par (Nm)	Temp. Masa (°C)	Amplitud (Nm)	Estabilidad (min)
C1	8,83	0,90	32,2	0,04	10,93
C2	20,02	0,33	63,1		
C3	23,00	0,62	74,9		
C4	30,00	1,35	85,1		
C5	45,05	3,82	60,9		

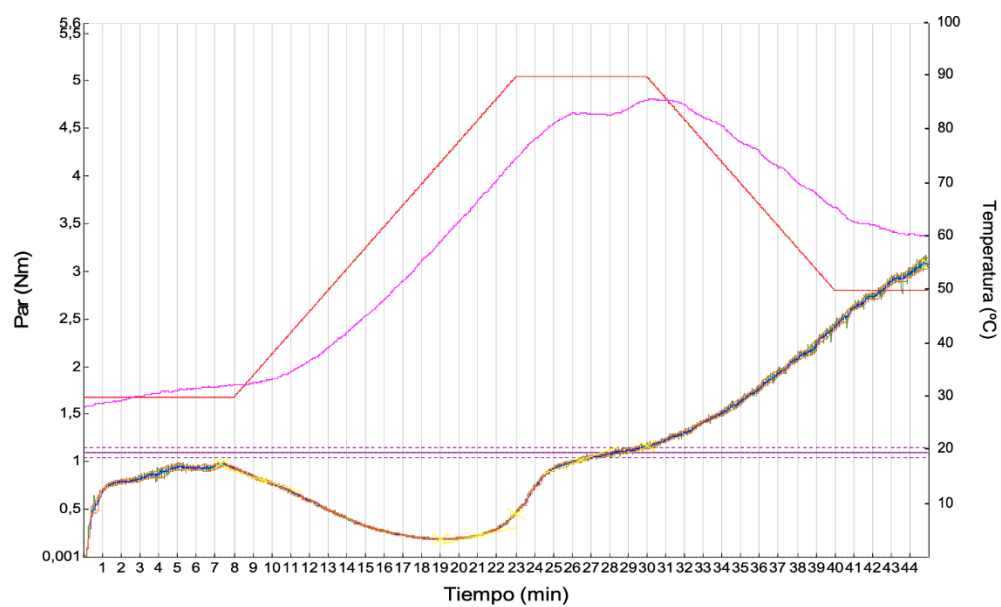
α :	-0,030	Nm/min
β :	0,076	Nm/min
γ :	0,040	Nm/min



Yudane Piña

	Tiempo (min)	Par (Nm)	Temp. Masa (°C)	Amplitud (Nm)	Estabilidad (min)
C1	7,32	0,98	32,0	0,04	5,63
C2	19,02	0,19	59,2		
C3	23,00	0,46	74,7		
C4	30,00	1,17	85,6		
C5	45,03	3,08	60,3		

α :	-0,060	Nm/min
β :	0,044	Nm/min
γ :	0,072	Nm/min



ANEXO B: Análisis de varianza (ANOVA)

Anexo B1: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de pH masa, leudo, pan y humedad de los tratamientos.

Fuente de variación	GL	Cuadrados Medios			
		pH masa	pH leudo	pH pan	Humedad
Tratamientos	3	0.042364 ^{N.S.}	0.05488*	0.027622 ^{N.S.}	3.54896 ^{N.S.}
Técnica (T)	1	0.006400 ^{N.S.}	0.01763 ^{N.S.}	0.0006533 ^{N.S.}	8.03603 ^{N.S.}
Líquido (l)	1	0.321111*	0.13230*	0.073633*	0.01613 ^{N.S.}
Interacción Txl	1	0.000675 ^{N.S.}	0.01470 ^{N.S.}	0.002700 ^{N.S.}	2.59470 ^{N.S.}
Error experimental	8	0.018317	0.01179	0.010017	1.63995

* Significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

^{N.S.} No significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

Anexo B2: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) colorimetría de la cortaza

Fuente de variación	GL	Cuadrados Medios				
		L*	a*	b*	Cr*	Hue*
Tratamientos	3	5.4608 ^{N.S.}	5.667 ^{N.S.}	4.0276 ^{N.S.}	9.215 ^{N.S.}	6.538 ^{N.S.}
Técnica (T)	1	6.3802 ^{N.S.}	8.283 ^{N.S.}	3.7074 ^{N.S.}	18.675 ^{N.S.}	11.860 ^{N.S.}
Líquido (l)	1	9.4519 ^{N.S.}	4.142 ^{N.S.}	0.9020 ^{N.S.}	5.083 ^{N.S.}	6.468 ^{N.S.}
Interacción Txl	1	0.5504 ^{N.S.}	4.576 ^{N.S.}	7.4734 ^{N.S.}	3.887 ^{N.S.}	1.287 ^{N.S.}
Error experimental	8	59.3986	12.346	7.0712	4.665	4.716

* Significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

^{N.S.} No significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

Anexo B3: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) colorimetría de la miga

Fuente de variación	GL	Cuadrados Medios				
		L*	a*	b*	Cr*	Hue*
Tratamientos	3	85.47 ^{N.S.}	25.943 ^{N.S.}	16.4697 ^{N.S.}	9.215 ^{N.S.}	84.91 ^{N.S.}
Técnica (T)	1	60.71 ^{N.S.}	12.669 ^{N.S.}	39.2047 ^{N.S.}	18.675 ^{N.S.}	88.67 ^{N.S.}
Líquido (l)	1	154.44*	58.212*	0.0660 ^{N.S.}	5.083 ^{N.S.}	130.15 ^{N.S.}
Interacción Txl	1	41.26 ^{N.S.}	6.946 ^{N.S.}	10.1384 ^{N.S.}	3.887 ^{N.S.}	35.91 ^{N.S.}
Error experimental	8	35.08	7.321	7.9207	4.665	29.89

* Significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

^{N.S.} No significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

Anexo B4: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de volumen

Fuente de variación	GL	Cuadrados Medios	
		Volumen (cm ³)*	Volumen específico*
Tratamientos	3	1778.98 ^{N.S.}	0.50314 ^{N.S.}
Técnica (T)	1	4444.83 ^{N.S.}	1.27401 ^{N.S.}
Líquido (l)	1	858.7*	0.22141 ^{N.S.}
Interacción Txl	1	33.43 ^{N.S.}	0.01401 ^{N.S.}
Error experimental	8	1788.36	0.49203

* Significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

^{N.S.} No significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

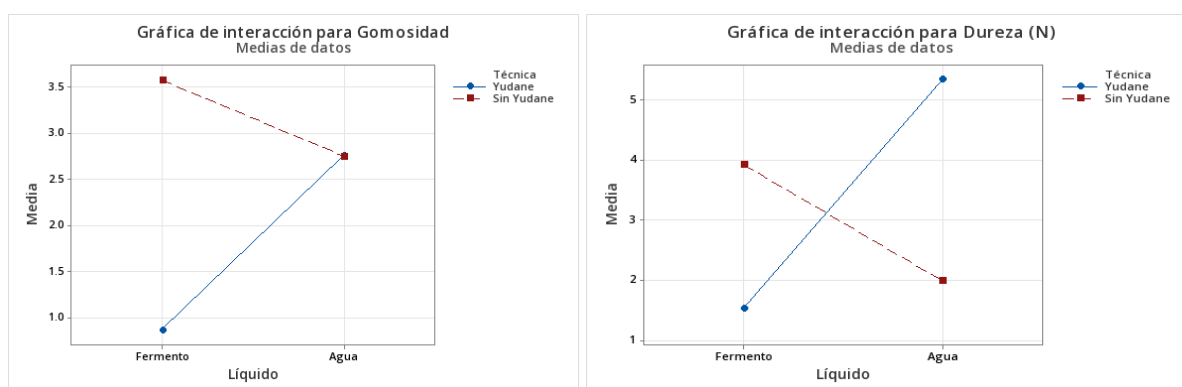
Anexo B5: Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de TPA

Fuente de variación	GL	Cuadrados Medios					
		Cohesión*	Elasticidad* (N)	Resiliencia	Gomosidad (N)	Dureza (N)	Masticabilidad (N)
Tratamientos	3	0.015475 ^{N.S.}	0.007497 N.S.	0.021631*	3.9565*	9.3765*	3.4340*
Técnica (T)	1	0.033075 ^{N.S.}	0.000408 N.S.	0.039675*	5.4945*	0.17105 ^{N.S.}	3.7744*
Líquido (l)	1	0.000675 N.S.	0.021675 N.S.	0.020008*	0.8533 ^{N.S.}	2.6508 ^{N.S.}	5.8381*
Interacción Txl	1	0.012675 N.S.	0.000408 N.S.	0.005208 N.S.	5.5216*	24.7681*	0.6864 ^{N.S.}
Error experimental	8	0.007783	0.005842	0.001942	0.3214	1.0547	0.4412

* Significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

N.S. No significativo al 5% de probabilidad por el valor p.

Anexo B5.1: Gráfica de interacción gomosidad y dureza(N).



Anexo B6: Medias y Tukey TPA

Tratamiento	Cohesión*	Elasticidad* (N)	Resiliencia*	Gomosidad* (N)	Dureza (N)	Masticabilidad (N)
C	0.69 ± 0.05	1.00 ± 0	0.37 ± 0.03	2.75 ± 1.05	1.99 ± 0.37	3.4 ± 0.17

P	0.61 ± 0.03	1.07 ± 0.12	0.25 ± 0.04	b	3.57 ± 0.17	a	3.92 ± 2.01	ab	2.48 ± 1.26	ab
Y	0.52 ± 0.16	1.00 ± 0	0.22 ± 0.06	b	2.75 ± 0.37	a	5.35 ± 0.19	a	2.75 ± 0.37	a
YP	0.57 ± 0.02	1.09 ± 0.08	0.18 ± 0.03	b	0.86 ± 0.08	b	1.53 ± 0.11	b	0.88 ± 0.09	b

*Medias seguidas por las mismas letras no difieren entre sí al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey.

ANEXO C: Nivel de agrado de atributos sensoriales y percepción global de los tratamientos

Tratamientos	Apariencia Global Medi ± Desv	Suavidad Medi ± Desv	Color Medi ± Desv	Olor Medi ± Desv
Yudane-Agua	7.60 ± 1.37 ^a	7.65 ± 1.46 ^a	7.70 ± 1.33	7.60 ± 1.29 ^a
Yudane-Fermento	7.50 ± 1.41 ^a	7.65 ± 1.3 ^a	7.79 ± 1.32	7.47 ± 1.41 ^{ab}
Sin Yudane-Agua	7.49 ± 1.26 ^a	7.32 ± 1.59 ^a	7.39 ± 1.5	7.47 ± 1.43 ^{ab}
Sin Yudane-Fermento	6.90 ± 1.69 ^b	6.68 ± 1.75 ^b	7.56 ± 1.38	6.91 ± 1.85 ^b

Anexo C1: Consentimiento informado evaluación sensorial

Consentimiento Informado Evaluación Sensorial de Pan con Fermento de Piña

Yo, _____, con número de identificación (CI), _____, acepto participar voluntariamente en la evaluación sensorial del pan elaborado con fermento de cáscara de piña, declarando conocer que este producto contiene alérgenos como gluten (harina de trigo) y piña, además de un contenido relativamente alto de azúcar. Reconozco los riesgos para personas con enfermedad celiaca o sensibilidad al gluten, alergia o intolerancia a la piña y aquellas que deben moderar su consumo de azúcar (diabetes o resistencia a la insulina). Entiendo que mi participación es voluntaria, puedo retirarme en cualquier momento y mis datos serán confidenciales.

Fecha: _____ Firma: _____

Anexo C2: Prueba hedónica

Nombre:

Fecha:

Instrucciones

Frente a usted hay cuatro muestras de pan. Por favor, obsérvelas y pruébelas en orden, de izquierda a derecha. Evalúe cada muestra indicando el grado en que le gusta o le disgusta cada atributo. Antes de responder, verifique el número de la muestra. Tome agua y espere 30 segundos entre cada muestra.

Puntaje	Calificación
9	Me gusta extremadamente
8	Me gusta mucho
7	Me gusta moderadamente
6	Me gusta levemente
5	No me gusta ni me disgusta
4	Me disgusta levemente
3	Me disgusta moderadamente
2	Me disgusta mucho
1	Me disgusta extremadamente

Código	Calificación para cada atributo			
	Olor	Color	Suavidad	Apariencia global
415				
320				
211				
356				

