



**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Industrias

**Pan libre de gluten en base a arroz: obtención y determinación  
de propiedades de harinas nativas y modificadas, diseño de  
mezclas, elaboración y caracterización del producto final**

Tesis presentada para optar por el título de Magister de la Universidad de  
Buenos Aires en el área de Bromatología y Tecnología de la  
Industrialización de Alimentos

**Jennifer Elizabeth Cajas Locke**

Directora: **Dra. Marcela Patricia Tolaba**

Codirectora: **Dra. Maria Ana Loubes**

Lugar de trabajo: Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y  
Naturales.

Buenos Aires, 2018

# PAN LIBRE DE GLUTEN EN BASE A ARROZ: OBTENCIÓN Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE HARINAS NATIVAS Y MODIFICADAS, DISEÑO DE MEZCLAS, ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO FINAL

## RESUMEN

La elaboración de panificados a base de arroz, a diferencia del trigo, presenta una considerable dificultad tecnológica, ya que la falta de proteínas formadoras del gluten requiere la incorporación de ingredientes poliméricos que sean capaces de aportar propiedades viscoelásticas a la masa emulando la funcionalidad del gluten. El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto de diferentes harinas de arroz (nativas, modificada y gelatinizada) y de diversos sustitutos del gluten (goma xántica, GX; goma guar, GG; hidroxipropilmetilcelulosa; alginato de sodio, AL; y goma espina corona), sobre la calidad del pan de molde, evaluada en términos del volumen del pan y del alveolado de la miga. Se determinó que una amplia distribución de tamaño de partícula de la harina mejora la calidad del pan, a su vez el reemplazo parcial de la harina nativa por la harina gelatinizada permite la obtención de un producto óptimo. Por otra parte, los sustitutos que mostraron mejor desempeño (GX, GG y AL) fueron seleccionados para explorar dos diseños de mezclas. El primero involucró formulaciones a base de harina de arroz nativa, mientras que en el segundo parte de la harina nativa se reemplazó por harina gelatinizada y se redujo a la mitad la cantidad de sustituto del gluten. Los ensayos reológicos revelaron un comportamiento viscoelástico diferenciado para las masas de las diferentes formulaciones y se encontró una relación cuadrática entre la viscosidad de la masa y el volumen del pan. Finalmente, la formulación óptima de cada diseño fue obtenida y evaluada. El pan óptimo del segundo diseño presentó, en relación con el primero, una corteza más clara y una miga con mayor humedad y menor dureza, aunque con tendencia a desmigajarse. Los resultados mostraron el rol significativo de la granulometría de la harina en la calidad del pan y el uso efectivo de la harina gelatinizada como un ingrediente que mejora la funcionalidad de los sustitutos tradicionales del gluten.

**Palabras claves:** distribución de tamaño de partícula, sustituto del gluten, porcentaje alveolar, goma xántica, goma guar, harina de arroz gelatinizada, reología.

# GLUTEN-FREE RICE BREAD: PRODUCTION AND DETERMINATION OF PROPERTIES OF NATIVE AND MODIFIED FLOURS, MIXTURE DESIGN, PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF THE FINAL PRODUCT

## ABSTRACT

The preparation of rice-based bread, unlike wheat, presents a considerable technological challenge due to the lack of gluten-forming proteins makes the addition of polymeric ingredients necessary to provide the dough with viscoelastic properties to emulate the gluten functionality. The aim of this work was to study the effect of different rice flours (native flour, modified flour and gelatinized flour) and of several gluten substitutes (xanthan gum, *GX*; guar gum, *GG*; hydroxypropylmethylcellulose, sodium alginate, *AL*; and espina corona gum) on pan bread quality which was evaluated in terms of bread volume and alveolar area of the bread crumb. As a result, it was found that flours with a wide distribution of particle size improve the bread quality, and in turn, that the partial replacement of native flour by gelatinized flour allows to obtain a top-quality product. Also, the gluten substitutes that had the best performance (*GX*, *GG* and *AL*) were selected to study two mixture designs. The first design involved formulations based on native rice flour, whereas in the second design, a portion of native flour was replaced by gelatinized flour and the amount of gluten substitute was reduced by half. The rheological tests showed a significant effect of dough formulation on viscoelastic behavior. In addition, a quadratic relationship between dough viscosity and bread volume was found. Finally, the optimum formulation of each mixture design was achieved and then evaluated. The optimum bread of the second design presented, in comparison with that of the first design, a crust with a lighter color, and a softer crumb with a higher percentage of moisture, although it was fairly crumbly. The results showed that flour granulometry has a significant effect on the quality of the bread and that gelatinized flour is an ingredient that improves the functionality of the traditional gluten substitutes.

**Keywords:** particle size distribution, gluten substitute, alveolar percentage, xanthan gum, guar gum, gelatinized rice flour, rheology.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Directora, Dra. Marcela Tolaba, por darme la oportunidad y el privilegio de trabajar en su laboratorio, por sus aportes de conocimientos y técnicas, y por su predisposición y tiempo en el desarrollo de la investigación.

A mi Codirectora, Dra. María Ana Loubes, por su apoyo incondicional, por la dedicación en la investigación experimental y escritura de la tesis, por su experiencia, por su constante motivación para culminar la tesis y por su amistad.

Al Comité Asesor de la Maestría en Bromatología y Tecnología de la Industrialización de Alimentos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, por admitirme a la maestría.

A los docentes de la maestría, por todos los conocimientos impartidos en las aulas de clases.

A la Dra. Analía García Loredo, por su guía en la medición de las propiedades reológicas de los panes de arroz del diseño I y II.

Al Sr. Julio, por realizar el cortador de rodajas de panes y arreglar el horno de pan.

A mis compañeros de laboratorio, por compartir momentos agradables.

A mis amigos de la maestría, por brindarme su amistad y hacer que mi estadía en Argentina sea muy agradable, a pesar de estar lejos de mi familia.

## DEDICATORIA

A Dios por acompañarme todos los días, bendiciendo cada paso que doy y por permitirme disfrutar este momento con mi familia.

A mi papi Dr. Gerry Cajas Hurtado y a mi mami Lcda. Jenny Locke Salazar, por ser el pilar fundamental en mi vida, por todo su amor, sacrificio y dedicación para convertirme en la persona y profesional que soy hoy en día y por todos sus sabios consejos.

A mi abuelita Carmen, por estar siempre pendiente de mí pese a la distancia.

A mis abuelitos Carlos, Jorge y Nelly, a pesar de que ya no están conmigo, sé que desde el cielo están orgullosos de mí.

A mis hermanos Nelly, Gerry y Carlos, por ser un ejemplo de vida y apoyo.

A mi cuñado José, por sus consejos.

A mis sobrinos Valeria, Nicolás, Khloé y Scarllet, por dar alegría a mis días.

A mi familia en general y a mis amigos, por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A mi novio, por compartir este momento muy importante en mi vida y por su amor.

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Arroz.....	2
1.1.1. Origen y cultivo del arroz .....	2
1.1.2. Características del grano de arroz.....	4
1.1.3. Morfología del grano .....	5
1.1.4. Obtención del arroz pulido.....	6
1.1.5. Obtención de la harina de arroz.....	6
1.2. Harinas de arroz.....	7
1.2.1. Usos de la harina de arroz .....	7
1.2.2. Propiedades de las harinas nativas.....	9
1.2.3. Propiedades de las harinas gelatinizadas.....	9
1.2.4. Propiedades térmicas y de hidratación .....	10
1.3. Pan.....	12
1.4. Panes elaborados a base de arroz.....	13
1.4.1. Pan de molde a base de arroz .....	13
1.4.2. Sustitutos del gluten.....	14
1.4.3. Método de elaboración del pan a base de arroz .....	16
1.4.3.1. Mezclado .....	16
1.4.3.2. Formación de la masa.....	17
1.4.3.3. Fermentación.....	17
1.4.3.4. Cocción .....	18
1.4.3.5. Almacenamiento.....	20
1.5. Calidad de la masa .....	21
1.6. Calidad del pan .....	22

1.6.1. Volumen .....	23
1.6.2. Alveolado .....	23
1.6.3. Textura.....	24
1.6.4. Color.....	24
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>25</b>
2.1. Objetivos generales .....	26
2.2. Objetivos específicos .....	26
<b>3. Materiales y Métodos .....</b>	<b>27</b>
3.1. Harinas de arroz.....	28
3.2. Propiedades de las harinas .....	29
3.2.1. Contenido de humedad .....	29
3.2.2. Distribución de tamaño de partícula.....	29
3.2.2.1. Método de Tamizado.....	29
3.2.2.2. Método de Difracción láser .....	31
3.2.3. Propiedades térmicas (DSC).....	31
3.2.4. Propiedades de hidratación .....	32
3.3. Formulaciones para pan libre de gluten .....	33
3.3.1. Formulación básica .....	33
3.3.2. Formulaciones con mezclas de harina nativa y gelatinizada .....	34
3.3.3. Formulaciones con diferentes sustitutos del gluten.....	35
3.4. Elaboración de pan libre de gluten .....	35
3.4.1. Horno eléctrico programable .....	35
3.4.2. Preparación de la mezcla .....	36
3.4.3. Proceso en el horno .....	36
3.5. Determinación del volumen del pan de molde.....	37

3.6. Medición del alveolado .....	37
3.6.1. Procesamiento digital de imágenes .....	38
3.7. Análisis estadístico .....	42
3.8. Diseño de mezclas .....	42
3.8.1. Diseño I .....	42
3.8.2. Diseño II .....	43
3.8.3. Análisis del diseño de mezclas .....	44
3.9. Reología de la masa .....	45
3.9.1. Preparación de la masa.....	45
3.9.2. Ensayo de barrido de deformación.....	46
3.9.3. Barridos dinámicos oscilatorios de frecuencia (método dinámico) .....	46
3.9.4. Prueba deformación - relajación (ensayo de Creep-Recovery).....	46
3.10. Análisis adicionales de los panes óptimos.....	47
3.10.1. Determinación del color de la corteza .....	47
3.10.2. Contenido de humedad de la miga .....	48
3.10.3. Análisis del perfil de textura (TPA) de la miga.....	48
<b>4. Resultados y Discusión.....</b>	<b>51</b>
4.1. Caracterización de las harinas de arroz .....	52
4.1.1. Contenido de humedad.....	52
4.1.2. Distribución de tamaño de partícula.....	53
4.1.2.1. Tamizado .....	53
4.1.2.2. Difracción láser .....	55
4.1.2.3. Tamizado <i>versus</i> Difracción láser .....	57
4.1.3. Propiedades térmicas (DSC) .....	58
4.1.4. Propiedades de hidratación.....	61



4.2. Efecto de la granulometría en la calidad del pan de molde .....	64
4.2.1. Volumen del pan de molde .....	64
4.2.2. Medición del alveolado del pan.....	65
4.2.3. Correlaciones entre la granulometría de la harina y los atributos del pan .	67
4.3. Efecto de la sustitución de la harina nativa por gelatinizada en la calidad del pan.....	69
4.3.1. Volumen del pan.....	69
4.3.2. Medición del alveolado del pan.....	71
4.4. Selección de los sustitutos del gluten para el diseño de mezclas .....	74
4.4.1. Volumen del pan.....	74
4.4.2. Medición del alveolado del pan.....	75
4.5. Diseño de mezclas .....	79
4.5.1. Diseño I .....	79
4.5.1.1. Propiedades reológicas de las masas .....	79
4.5.1.1.a Barrido de deformación del Diseño I.....	79
4.5.1.1.b Barrido de frecuencia del Diseño I (método oscilatorio dinámico)..	80
4.5.1.1.c Prueba de deformación-relajación (ensayo de Creep-Recovery) del Diseño I .....	84
4.5.1.2. Volumen del pan del Diseño I .....	92
4.5.1.2.a Relación entre el volumen del pan y la viscosidad de la masa del Diseño I .....	94
4.5.1.3. Medición del alveolado del pan del Diseño I.....	95
4.5.1.4. Optimización de la formulación del pan correspondiente al Diseño I ...	97
4.5.2. Diseño II .....	101
4.5.2.1. Propiedades reológicas de las masas del Diseño II .....	101

4.5.2.1.a Barrido de deformación del Diseño II.....	102
4.5.2.1.b Barrido de frecuencia del Diseño II (método oscilatorio dinámico) .....	103
4.5.2.1.c Prueba deformación-relajación (ensayo de Creep-Recovery) del Diseño II.....	106
4.5.2.2. Volumen del pan del Diseño II .....	110
4.5.2.2.a Relación entre el volumen del pan y la viscosidad de la masa del Diseño II.....	112
4.5.2.3. Medición del alveolado del pan del Diseño II.....	114
4.5.2.4. Optimización de la formulación del pan correspondiente al Diseño II	116
4.5.3. Caracterización de los panes óptimos obtenidos en los Diseños I y II .....	119
4.5.3.1. Color de la corteza .....	120
4.5.3.2. Contenido de humedad de la miga .....	121
4.5.3.3. Perfil de textura de la miga.....	121
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>124</b>
5.1. Caracterización de las harinas de arroz estudiadas .....	125
5.2. Efecto de la granulometría sobre el alveolado y el volumen del pan de molde	125
5.3. Efecto de la sustitución parcial de la harina nativa con harina gelatinizada sobre el volumen y el alveolado del pan de molde.....	126
5.4. Selección de los sustitutos del gluten y su efecto sobre la calidad de los panes .....	126
5.5. Optimización de las formulaciones de acuerdo con la reología de la masa y la calidad del pan.....	126
5.5.1. Diseño I .....	126
5.5.2. Diseño II .....	127
<b>6. Bibliografía .....</b>	<b>129</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Producción mundial de arroz.....	3
<b>Figura 1.2.</b> Estructuras interna y externa del grano de arroz.....	5
<b>Figura 1.3.</b> Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de harinas de arroz obtenidas por a) molienda seca, b) molienda húmeda.....	7
<b>Figura 1.4.</b> Enfermedad celíaca.....	8
<b>Figura 1.5.</b> Enfermedad celíaca. Esquema del daño del revestimiento intestinal.....	8
<b>Figura 1.6.</b> Representación esquemática de la microestructura y la transición estructural del almidón durante la gelatinización. Fuente: Gatto (2016).....	10
<b>Figura 1.7.</b> Efecto de la adición de enzimas proteolíticas en la elaboración de pan de arroz a) Control, b) 0,32 g Proteasa fúngica/300 g de harina, c) 0,63 g Proteasa fúngica/300 g de harina, d) 0,44 g Proteasa bacteriana/300 g de harina.....	15
<b>Figura 1.8.</b> Esquema del proceso de elaboración del pan de molde libre de gluten.....	16
<b>Figura 1.9.</b> Estructura del pan libre de gluten.....	19
<b>Figura 1.10. a)</b> Diferentes tipos de fabricadoras hogareñas de pan. 1. Panasonic SD-YD250, 2. Zojirushi Mini BB-HAC10 3. Breadman Cool Touch TR555LC 4. Oster 2 lb. b) Proceso de elaboración. 1. mezclado, 2. Amasado, 3. Fermentación, 4. Cocción.....	20
<b>Figura 1.11.</b> Estimación de la porosidad mediante análisis de imágenes (el negro denota la abertura de los poros o alvéolos).....	23
<b>Figura 3.1.</b> Agitador mecánico Zonytest y tamices ASTM.....	30
<b>Figura 3.2.</b> Representación esquemática del termograma.....	32
<b>Figura 3.3.</b> Horno eléctrico y detalle del panel de control.....	35
<b>Figura 3.4.</b> A) Molde del pan con recubrimiento de teflón. B) Partes del molde. C) Amasador. D) Gancho. Fuente: ATMA (n.d.).....	36
<b>Figura 3.5.</b> Selección de la imagen.....	38
<b>Figura 3.6.</b> Selección de la escala (píxeles/mm).....	39
<b>Figura 3.7.</b> Calibración para el recuento de alvéolos (píxeles/mm).....	39
<b>Figura 3.8.</b> Conversión de la rodaja de pan a escala de gris (8 bit).....	40
<b>Figura 3.9.</b> Selección del contraste.....	40
<b>Figura 3.10.</b> Imagen de la rodaja de pan binarizada.....	41

<b>Figura 3.11.</b> Análisis exploratorio del recuento de los alvéolos.....	41
<b>Figura 3.12.</b> Diseño centroide simplex de los sustitutos de gluten empleados en la elaboración de panes con la formulación básica.....	43
<b>Figura 3.13.</b> Diseño centroide simplex de los sustitutos de gluten empleados en la elaboración de panes, con mezclas de harina nativa y harina gelatinizada.....	44
<b>Figura 3.14.</b> Diagrama del espacio de color CIELAB. Fuente: LaCIE (n.d.). .....	47
<b>Figura 3.15.</b> Diagrama de cromático CIE. ....	48
<b>Figura 3.16.</b> Compresión de la miga del pan en texturómetro Instron. ....	49
<b>Figura 3.17.</b> Perfil de textura obtenido con el texturómetro Instron.....	49
<b>Figura 4.1.</b> Distribución de tamaño de partícula en masa de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE). .....	53
<b>Figura 4.2.</b> Distribución acumulada del tamaño de partícula acumulativa en masa de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE). ....	54
<b>Figura 4.3.</b> Distribución de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE). .....	56
<b>Figura 4.4.</b> Relación entre los diámetros característicos de las distribuciones de tamaño de partícula obtenidas por tamizado (D) y por difracción láser (Dv). .....	57
<b>Figura 4.5.</b> Relación entre los índices de dispersión de las distribuciones de tamaño de partícula obtenidas por tamizado (ID) y por difracción láser (IDv).....	58
<b>Figura 4.6.</b> Termogramas de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE). .....	59
<b>Figura 4.7.</b> Panes elaborados con harinas de arroz de diferente granulometría. ....	64
<b>Figura 4.8.</b> Rodajas de pan seleccionadas para el análisis de imágenes. A) Santa María, B) Kapac, C) Señor de Sipan, D) Harina molida 550 rpm-40 min. ....	65
<b>Figura 4.9.</b> Rodajas de pan binarizadas para el análisis de imágenes. A) Santa María, B) Kapac, C) Señor de Sipan, D) Harina molida 550 rpm-40 min.....	66

<b>Figura 4.10.</b> Relaciones entre: a) el área alveolar ( <i>A</i> ) y la mediana de la distribución de tamaño de partícula ( <i>D</i> <sub>50</sub> ), b) el volumen del pan ( <i>VP</i> ) y el índice de dispersión de la distribución de tamaño de partícula ( <i>ID</i> ). .....	67
<b>Figura 4.11.</b> Panes de molde: Kapac (100 %) y mezcla de harinas Kapac-gelatinizada (50-50 %), sin variar el volumen del agua en la formulación (400 ml). .....	69
<b>Figura 4.12.</b> Panes elaborados con diferente porcentaje de harina gelatinizada: .....	70
<b>Figura 4.13.</b> Imágenes escaneadas de las rodajas de pan en función del porcentaje de harina gelatinizada en la mezcla. a) 0 %, b) 12,5 %, c) 25 %, d) 37,5 % y e) 50 %. .....	72
<b>Figura 4.14.</b> Imágenes binarias de las rodajas de pan en función del porcentaje de harina gelatinizada en la mezcla. a) 0 %, b) 12,5 %, c) 25 %, d) 37,5 % y e) 50 %.....	72
<b>Figura 4.15.</b> Efecto de diferentes sustitutos del gluten en la apariencia del pan. a) goma xántica, b) goma guar, c) alginato de sodio, d) goma espina corona, e) hidroxipropilmetilcelulosa, f) harina de arroz gelatinizada (12,5 %). .....	74
<b>Figura 4.16.</b> Sección transversal de panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten: a) goma xántica, <i>GX</i> ; b) goma guar, <i>GG</i> ; c) alginato de sodio, <i>AL</i> ; d) goma espina corona, <i>EC</i> ; e) hidroxipropilmetilcelulosa, <i>HPMC</i> ; f) harina de arroz gelatinizada 12,5 %, <i>GE</i> . .....	76
<b>Figura 4.17.</b> Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos del gluten: a) goma xántica, <i>GX</i> ; b) goma guar, <i>GG</i> ; c) alginato de sodio, <i>AL</i> ; d) goma espina corona, <i>EC</i> ; e) hidroxipropilmetilcelulosa, <i>HPMC</i> ; f) harina de arroz gelatinizada 12,5 %, <i>GE</i> . .....	77
<b>Figura 4.18.</b> Módulo de almacenamiento ( <i>G'</i> ) de las masas para pan del diseño I ( <i>GX</i> : goma xántica, <i>AL</i> : alginato de sodio, <i>GG</i> : goma guar) a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ). .....	81
<b>Figura 4.19.</b> Espectros mecánicos dinámicos de las masas de pan en función del diseño I, a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ). <i>GX</i> : goma xántica; <i>GG</i> : goma guar; <i>AL</i> : alginato de sodio. Valores de <i>G'</i> (•) y <i>G''</i> (○) en función de la frecuencia. ....	83
<b>Figura 4.20.</b> Esquema del cálculo de los parámetros del modelo de Burger.....	85

<b>Figura 4.21.</b> Curvas del ensayo de deformación-relajación de las masas del diseño I. Valores experimentales (en color) y predichos (—, ecs. 17 y 18). GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio.....	86
<b>Figura 4.22.</b> Curvas experimentales del ensayo de deformación-relajación de las masas del diseño I (GX: goma xántica, AL: alginato de sodio, GG: goma guar).....	87
<b>Figura 4.23.</b> Panes de molde elaborados según el diseño I. a) goma xántica, GX; b) goma guar, GG; c) alginato de sodio, AL; d) GX+GG; e) GX+AL; f) GG+AL; g) GX+GG+AL. ....	92
<b>Figura 4.24.</b> Colapso de la superficie del pan de molde elaborado con la mezcla (diseño I) de goma guar - alginato de sodio (GG+AL).....	92
<b>Figura 4.25.</b> Relación entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del diseño I. ....	94
<b>Figura 4.26.</b> Sección transversal de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten en función del diseño I. a) GX: goma xántica, b) AL: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+GG, e) GX+GG+AL, f) AL+GG, g) GX+AL...	95
<b>Figura 4.27.</b> Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten en función del diseño I. a) GX: goma xántica, b) AL: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+GG, e) GX+GG+AL, f) AL+GG, g) GX+AL. ....	96
<b>Figura 4.28.</b> Superficie de respuesta predicha del volumen del pan (VP) en función del diseño I de mezclas. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 8 %). ....	99
<b>Figura 4.29.</b> Superficie de respuesta predicha del porcentaje del área alveolar (A) en función del diseño I de mezclas. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 8 %). ....	99
<b>Figura 4.30.</b> Imágenes del pan obtenido con la formulación óptima del diseño I. a) Corte transversal del pan (rodaja); b) Imagen binarizada de la rodaja de pan; c) Pan de molde.....	101

<b>Figura 4.31.</b> Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) de las masas para pan del diseño II ( $GX$ : goma xántica, $GG$ : goma guar, $AL$ : alginato de sodio) a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ).....	103
<b>Figura 4.32.</b> Espectros mecánicos dinámicos de las masas de pan del diseño II, a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ). Valores de $G'$ ( $\blacktriangle$ ) y $G''$ ( $\triangle$ ) en función de la frecuencia. a) $GX$ : goma xántica, b) $GG$ : goma guar, c) $AL$ : alginato de sodio, d) $GX+GG$ ; e) $GX+AL$ , f) $GG+AL$ , g) $GX+GG+AL$ . .....	104
<b>Figura 4.33.</b> Curvas del ensayo de deformación-relajación de las masas del diseño II. Valores experimentales (en color) y predichos (—, ecs. 17 y 18): a) $GX$ : goma xántica, b) $GG$ : goma guar, c) $AL$ : alginato de sodio, d) $GX+GG$ , e) $GX+AL$ , f) $GG+AL$ , g) $GX+GG+AL$ . .....	107
<b>Figura 4.34.</b> Curvas experimentales del ensayo de deformación-relajación de las masas del diseño II: a) todas las mezclas, b) selección de mezclas en la región de baja deformación porcentual. ....	108
<b>Figura 4.35.</b> Panes de molde elaborados según el diseño II. a) $GX$ : goma xántica, b) $AL$ : alginato de sodio, c) $GG$ : goma guar, d) $GX+AL$ , e) $GX+GG+AL$ , f) $GG+AL$ , g) $GX+GG$ . .....	111
<b>Figura 4.36.</b> Relación entre el volumen del pan ( $VP$ ) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del diseño II.....	113
<b>Figura 4.37.</b> Relación entre el volumen del pan ( $VP$ ) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del diseño I y II combinados.....	113
<b>Figura 4.38.</b> Sección transversal de los panes elaborados con mezcla de harina nativa y gelatinizada y diferentes sustitutos de gluten en función del diseño II. a) $GX$ : goma xántica, b) $AL$ : alginato de sodio, c) $GG$ : goma guar, d) $GX+AL$ , e) $GX+GG+AL$ , f) $GG+AL$ , g) $GX+GG$ . .....	114
<b>Figura 4.39.</b> Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con mezcla de harina nativa y gelatinizada y diferentes sustitutos de gluten en función del diseño II. a) $GX$ : goma xántica, b) $AL$ : alginato de sodio, c) $GG$ : goma guar, d) $GX+AL$ , e) $GX+GG+AL$ , f) $GG+AL$ , g) $GX+GG$ .....	115

<b>Figura 4.40.</b> Superficie de respuesta predicha del volumen del pan (VP) en función de la composición de la mezcla para el diseño II. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 4 %). .....	117
<b>Figura 4.41.</b> Superficie de respuesta predicha del porcentaje del área alveolar (A) en función de la composición de la mezcla para el diseño II. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 4 %). .....	118
<b>Figura 4.42.</b> Imágenes del pan obtenido con la formulación óptima del diseño II. a) Corte transversal del pan (rodaja); b) Imagen binarizada de la rodaja de pan; c) Pan de molde. ....	119
<b>Figura 4.43.</b> Diagrama de cromático CIE. Diseño I (●) y diseño II (Δ) .....	120
<b>Figura 4.44.</b> Perfil de textura de la miga del pan de los óptimos correspondientes a cada diseño de mezclas. ....	122



# Índice de tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Composición centesimal de las harinas de arroz.....	28
<b>Tabla 3.2.</b> Tamices normalizados por la ASTM (American Society for Testing and Materials).....	29
<b>Tabla 3.3.</b> Formulaciones de mezclas de harina nativa y gelatinizada.....	34
<b>Tabla 3.4.</b> Etapas del proceso de elaboración del pan de molde en el horno eléctrico. .....	37
<b>Tabla 3.5.</b> Diseño de mezclas para la evaluación del efecto sinérgico/antagónico de tres componentes seleccionados ( $x_1$ , $x_2$ y $x_3$ ), en panes sin gluten elaborados a partir de la formulación básica.....	43
<b>Tabla 3.6.</b> Diseño de mezclas para la evaluación del efecto sinérgico/antagónico de tres componentes seleccionados ( $x_1$ , $x_2$ y $x_3$ ) en panes sin gluten elaborados con una mezcla de harina nativa y harina gelatinizada.....	44
<b>Tabla 4.1.</b> Humedad de las harinas de arroz: comerciales, modificada y gelatinizada determinada por el método de la AOAC (2000).....	52
<b>Tabla 4.2.</b> Parámetros característicos de la distribución de tamaño de partícula de las harinas de arroz determinados por tamizado.....	55
<b>Tabla 4.3.</b> Parámetros característicos de la distribución de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz. ....	56
<b>Tabla 4.4.</b> Parámetros característicos de las propiedades térmicas de las harinas de arroz.....	60
<b>Tabla 4.5.</b> Propiedades de hidratación de las harinas de arroz.....	62
<b>Tabla 4.6.</b> Volumen del pan de molde en función de la harina empleada.....	65
<b>Tabla 4.7.</b> Porcentaje del área alveolar de los panes, obtenido mediante análisis de imágenes.....	66
<b>Tabla 4.8.</b> Volumen del pan en función del grado de sustitución de la harina nativa en la mezcla.....	71
<b>Tabla 4.9.</b> Porcentaje del área alveolar de los panes, en función del grado de sustitución de la harina nativa, obtenido mediante análisis de imágenes. ....	73

<b>Tabla 4.10.</b> Efecto de diferentes sustitutos del gluten sobre el volumen del pan de molde.....	75
<b>Tabla 4.11.</b> Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde en función del sustituto de gluten usado.....	77
<b>Tabla 4.12.</b> Región viscoelástica lineal de las masas de pan del Diseño I en función del sustituto de gluten. ....	80
<b>Tabla 4.13.</b> Valores de la frecuencia correspondientes a $\text{Tan } \delta = 1$ en función del sustituto de gluten para el Diseño I. ....	84
<b>Tabla 4.14.</b> Parámetros del modelo de Burger (ecs. 15 y 16) para las masas de pan del Diseño I.....	89
<b>Tabla 4.15.</b> Volumen de los panes de molde del Diseño I.....	93
<b>Tabla 4.16.</b> Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde elaborados en función del Diseño I. ....	97
<b>Tabla 4.17.</b> Efecto de los sustitutos del gluten sobre los parámetros de calidad del pan del Diseño I, en términos de los factores sin codificar: goma xántica ( <i>GX</i> ), alginato de sodio ( <i>AL</i> ) y goma guar ( <i>GG</i> ). ....	98
<b>Tabla 4.18.</b> Valores máximos y mínimos predichos de los parámetros de calidad del pan de molde en función del Diseño I de mezclas.....	100
<b>Tabla 4.19.</b> Región viscoelástica lineal de las masas de pan del Diseño II y su comparación con el Diseño I en función del sustituto de gluten. ....	102
<b>Tabla 4.20.</b> Valores de la frecuencia correspondientes a $\text{Tan } \delta = 1$ , en función del sustituto de gluten para el Diseño II y su comparación con el Diseño I. ....	105
<b>Tabla 4.21.</b> Parámetros del modelo de Burger (ecs. 15 y 16) para las masas de pan del Diseño II. ....	109
<b>Tabla 4.22.</b> Volumen de los panes de molde del Diseño II.....	111
<b>Tabla 4.23.</b> Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde elaborados en función del Diseño II.....	116
<b>Tabla 4.24.</b> Efecto de los sustitutos del gluten sobre los parámetros de calidad del pan del Diseño II, en términos de los factores sin codificar: goma xántica ( <i>GX</i> ), alginato de sodio ( <i>AL</i> ) y goma guar ( <i>GG</i> ). ....	117

<b>Tabla 4.25.</b> Valores máximos y mínimos predichos de los parámetros de calidad del pan de molde en función del Diseño II de mezclas.....	118
<b>Tabla 4.26.</b> Propiedades del color de la corteza de los panes de molde de las formulaciones óptimas predichas del Diseño I y II.....	121
<b>Tabla 4.27.</b> Análisis del perfil de textura de la miga del pan de los óptimos de cada diseño de mezclas. ....	122

# 1. Introducción

*"Procura ser tan grande que todos quieran alcanzarte y tan humilde que todos quieran estar contigo."*

Paulo Coelho.

## 1.1. Arroz

### 1.1.1. Origen y cultivo del arroz

El arroz científicamente conocido como *Oryza sativa*, perteneciente a la familia de las *Poáceas* o *Gramíneas*, se ubica entre uno de los productos con mayor rendimiento a nivel mundial después del trigo. A su vez, provee a la tercera parte de la población mundial más de la mitad del alimento diario (Díaz y col., 2000).

El cultivo tiene su origen en Asia hace más de 10.000 años. Se conoce que las primeras plantas aparecieron en China, luego se extendieron hasta Tailandia, Camboya, India, Vietnam y el resto de los países asiáticos; dando lugar a subespecies tales como: *Oryza japónica*, cuyo grano es redondo y *Oryza índica*, con un grano más alargado. *Oryza glaberrima* es otra variedad de arroz, aunque esta surgió en el delta del Níger y luego se extendió por el resto del occidente de África, alrededor del año 1.500 a. C. Esta especie sufrió un declive en su cultivo cuando la *Oryza sativa* se propagó al resto del mundo, hacia el año 800 a. C., llegando primero al cercano oriente, posteriormente a España llevada por los moros y más tarde a Italia. A partir de mediados del siglo XV a Francia y tras la época de los grandes descubrimientos se implantó en todos los continentes. Otros especialistas del tema, como el botánico Vavílov, mencionan que el arroz cultivado tiene sus orígenes en la India, de donde pasó a la China y después al resto de mundo (SAG, 2003).

El arroz es el cereal más importante del mundo en desarrollo, además sus propiedades se ajustan a las exigencias de una dieta sana, rica en vitaminas y sales minerales, baja en grasa, colesterol y sodio.

Es la gramínea de mayor consumo a nivel mundial, con una superficie cultivada de 165,1 millones de hectáreas. La producción total de arroz en el mundo durante el año 2016 fue de 751,9 millones de toneladas, es decir 1,6 % por encima del valor del año 2015 (740,3 millones de toneladas); y se espera que para el año 2017 la producción alcance los 758,9 millones de toneladas (FAO, 2017).

Este cereal que se cultiva en numerosos países, se lo encuentra en todos los continentes, a excepción de la Antártida. En América Latina y el Caribe la producción alcanza los 25 millones de toneladas de arroz paddy, es decir arroz con cáscara, lo

cual constituye el 4 % del arroz que se produce en el mundo (Figura 1.1). Sanint (2010) menciona que en esta parte del continente anualmente surgen en el mercado aproximadamente diez variedades nuevas, lo que en el transcurso de los últimos 30 años contabilizan unas 300 variedades, todas obtenidas mediante cultivo con riego. Durante el siglo XX se ha producido una constante aclimatación de los cultivos de zonas inundadas a campos secos, denominándose a estas variedades arroz de secano, tanto las naturales como las modificadas genéticamente, llegando a cubrir un 40 % de toda el área cultivada. La producción de arroz ha aumentado sin tener necesidad de ampliar la frontera agrícola, esto se debe a las nuevas tecnologías con base en el riego, que han permitido abaratar los costos de producción. Sin embargo, el consumo actualmente sobrepasa el rendimiento agrícola, por lo que, algunos países deben importarlo para satisfacer la demanda interna (CIAT, 1981).



**Figura 1.1.** Producción mundial de arroz.

Fuente: Méndez del Villar (2008)

En Argentina, hasta la década de los 90' se cultivaban variedades de arroz importadas desde Brasil y Uruguay. Actualmente la situación ha cambiado ostensiblemente dado que al presente el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Fundación Proarroz, organismos argentinos, desarrollaron las variedades que hoy cubren el 70 % del área cultivada en Latinoamérica (INTA, 2016).

Casellas y colaboradores (2012) sostienen que Argentina es uno de los cuatro países de Sudamérica que exportan arroz, junto con Uruguay, Guyana y Surinam. Argentina

es el octavo exportador mundial de arroz elaborado, con 822.000 toneladas. La actividad se desarrolla en la región del Litoral, en las provincias de Entre Ríos, Corrientes, Santa Fe, Chaco y Formosa, pero con una gran concentración en el centro sur de Corrientes y norte de Entre Ríos. Las tres primeras provincias concentran el 93,5 % de la superficie cultivada de arroz en el país. En conclusión, la Argentina genera por año aproximadamente un 0,3 % de la producción mundial de arroz. Así mismo, los consumidores argentinos son muy exigente con relación a la calidad, tanto industrial como culinaria, es decir el arroz debe tener ciertas características como la translucidez, entereza del grano y que al cocinarlo no se pegue (Livore, 2015). Las investigaciones del INTA se han orientado a la obtención de variedades resistentes a los herbicidas, que eliminan plantas indeseadas como el arroz salvaje, gramíneo comestible que se comporta como una maleza, sin calidad industrial y afecta la producción a nivel mundial. El INTA logró desarrollar una variedad con estas características en el año 2000, obteniendo el reconocimiento internacional en el 2005 y en la actualidad es dueño de la patente del gen de resistencia, que permite al cultivo defenderse de herbicidas muy poderosos. Este arroz resistente, que se siembran comercialmente de manera creciente en los últimos años, no es transgénico sino producido por inducción de mutaciones y mejora genética convencional; lo que le da una característica adicional, ya que este tipo de modificación es rechazada por los consumidores (Casellas y col., 2012).

### **1.1.2. Características del grano de arroz**

El grano de arroz tiene forma ovoide un tanto aplanada, con un color que varía desde el amarillo hasta el blanco crema y dependiendo de la disposición del almidón puede ser opaco o traslúcido (Gómez Pallarés y col., 2007).

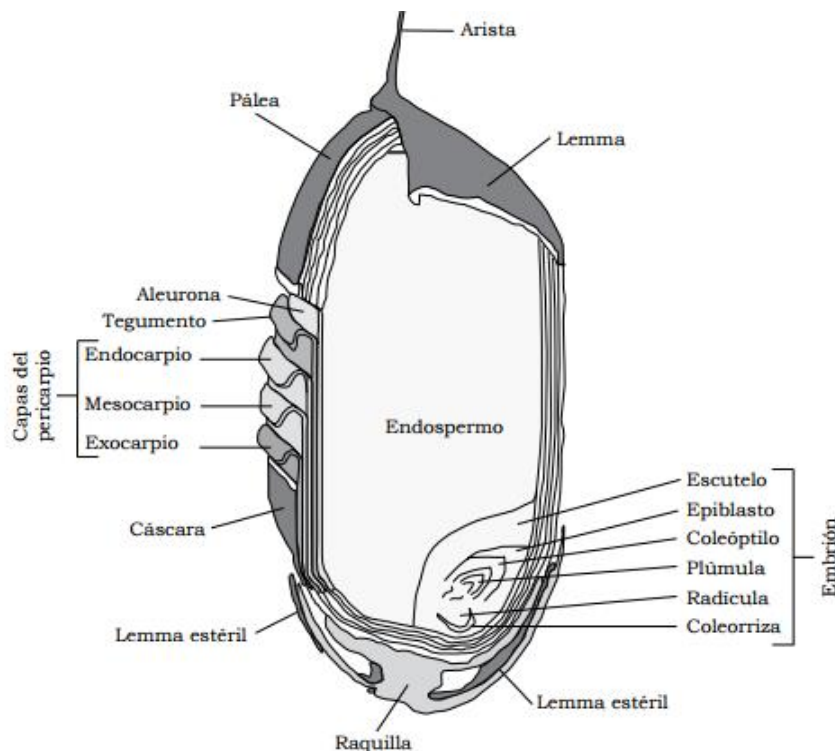
Según el artículo 649 del Código Alimentario Argentino, "el arroz se clasifica de acuerdo a sus características morfológicas en los siguientes tipos: a) tipo largo ancho (doble Carolina), corresponde a los granos de arroz cuya relación largo ancho es mayor a 2:1 y menor a 3:1 cuya longitud media es igual o mayor a 7 mm (similares a la variedad Fortuna); b) tipo largo fino, corresponde a los granos de arroz cuya relación largo ancho es mayor o igual a 3:1 y cuya longitud media es mayor o igual a 6,5 mm

(similares a la variedad Blue Bonnet); c) tipo mediano (mediano Carolina), corresponde a los granos de arroz cuya relación largo ancho es mayor a 2:1 y menor a 3:1 y cuya longitud media es igual o mayor a 6,0 mm y menor a 7,0 mm (similares a la variedad Blue Rose); d) tipo corto (Japonés), corresponde a los granos de arroz cuya relación largo ancho es igual o menor a 2:1 y cuya longitud media es menor a 6,9 mm (similares a la variedad Yamaní)".

Ramirez Ascheri y colaboradores (2010) sostienen que el principal indicador sensorial del arroz es la textura, la que varía en función del contenido de amilosa en el almidón y determina la viscosidad del arroz en sus diferentes tiempos de cocción.

### 1.1.3. Morfología del grano

Degiovanni y colaboradores (2010) describen la morfología del arroz como una carióspside, que consta del endospermo, del embrión y de varias capas exteriores: la aleurona, el tegumento y el pericarpio (Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Estructuras interna y externa del grano de arroz.  
Fuente: Degiovanni y col. (2010).

El embrión o germen de la semilla está adherido por un lado a la pared del ovario maduro o pericarpio y por el otro está rodeado por el endospermo (Degiovanni y col.,



2010). La capa de aleurona junto con el embrión contiene la mayor cantidad de compuestos proteínicos y grasos, además de fitatos (Juliano, 1994).

Las capas exteriores constituyen el salvado, donde se concentran la fibra dietética, las vitaminas del complejo B y algunos minerales como el hierro, cobre, zinc y magnesio. La pigmentación está determinada por el pericarpio, el cual se compone de tres capas finas: mesocarpio, endocarpio y exocarpio (Juliano, 1994).

El grano pulido es el resultado de la eliminación del salvado junto con el germen, los que concentran principalmente los lípidos y ponen rancio en muy poco tiempo el producto. El pulido garantiza la durabilidad del cereal y mejora la presentación del arroz, de tal manera que se vea blanco, traslúcido y sin ralladuras (Piedra, 2010).

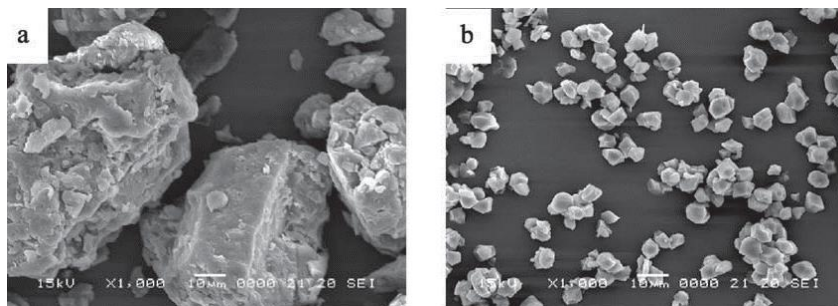
#### **1.1.4. Obtención del arroz pulido**

Para obtener el grano pulido se siguen diferentes pasos: el primero, consiste en la limpieza del arroz cáscara en tamices vibratorios; luego se procede al descascarillado mediante rodillos giratorios, de este modo se libera la cáscara; seguidamente se procede al cribado (que es una separación por aspiración de las partículas de basura más finas y la cascarilla), del descascarillado se obtiene el arroz integral rico en proteínas y vitaminas; posteriormente es enviado a la cámara pulidora donde se separa el salvado y el germen por abrasión mecánica (Mahapatra y Lan, 2007). El proceso puede repetirse varias veces, dependiendo de la blancura que se desee y de la cantidad de salvado que contenga el arroz. Finalmente, se separan los granos quebrados de los enteros.

#### **1.1.5. Obtención de la harina de arroz**

La molienda del grano de arroz implica un proceso más largo que el del trigo, ya que este último es directamente molturado, en cambio, el arroz debe ser pulido para posteriormente separar el grano entero del quebrado. Dependiendo de la calidad del arroz, el rendimiento de grano quebrado varía entre un 4 % y un 40 %. El grano entero es comercializado para su uso convencional, en tanto que el quebrado puede ser molturado hasta convertirlo en harina (Rosell y col., 2007).

Para la obtención de la harina se pueden utilizar tres métodos de molienda diferentes: húmeda, semiseca y seca (Rosell y col., 2007; Yeh, 2004). La molienda húmeda se realiza con el grano previamente remojado y en presencia de agua, el cual favorece la conservación del estado nativo del almidón (Figura 1.3). En cuanto a la molienda semiseca el arroz también se remoja previamente, pero al momento de molerlo debe estar totalmente escurrido. La harina obtenida por estos dos métodos se emplea preferentemente para la preparación de especialidades asiáticas, en cambio, en occidente es más frecuente la producción de harina por molienda seca (Rosell y col., 2007).



**Figura 1.3.** Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de harinas de arroz obtenidas por a) molienda seca, b) molienda húmeda.

Fuente: Suksomboon y Naivikul (2006).

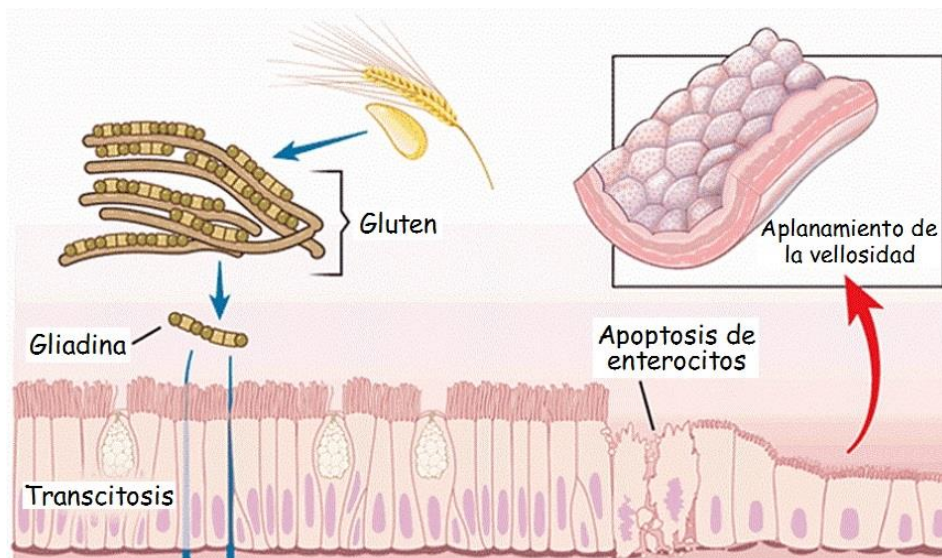
## 1.2. Harinas de arroz

Flores (2007) describe la harina de arroz como un polvo fino y ligero que se obtiene a través de la molienda. El tamaño reducido de sus partículas otorga a los productos alimenticios elaborados con ella una consistencia y textura muy suave. Su valor nutricional es importante, especialmente si se trata de harinas de granos integrales. Es un alimento versátil e hipoalergénico, no contiene grasas ni colesterol, posee un bajo porcentaje de sodio y de prolaminas, además de sabor insípido y un alto contenido de carbohidratos de fácil digestión (Gujral y Rosell, 2004).

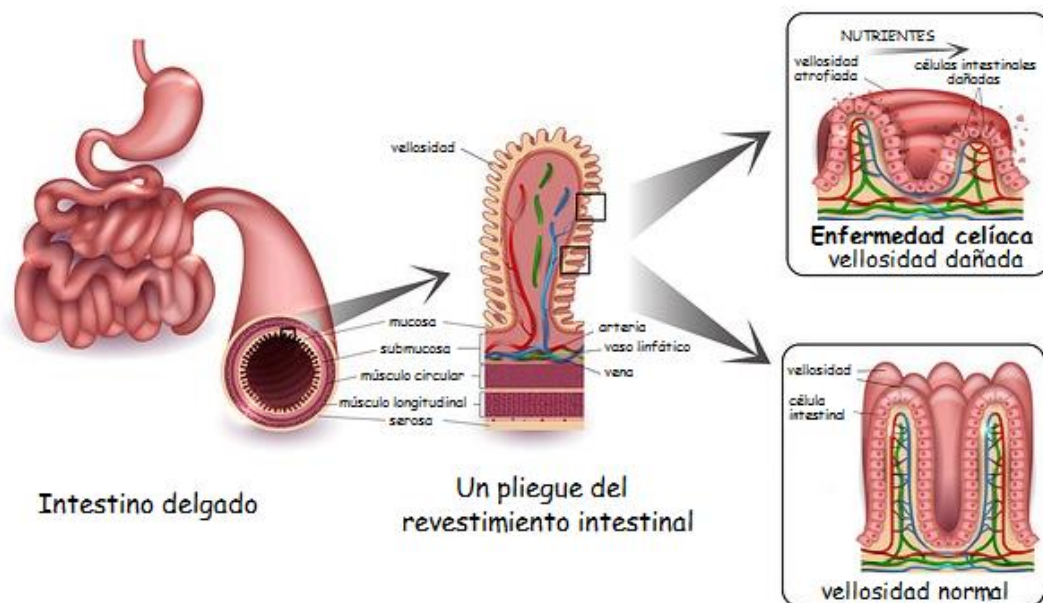
### 1.2.1. Usos de la harina de arroz

La harina de arroz se utiliza en una amplia gama de productos alimenticios como: agente estabilizante, cubiertas para tempuras (por su escasa absorción de grasas),

cereales para desayuno, papillas, alimentos infantiles, fideos, panificados y papel comestible (Yeh, 2004). Estos pueden ser consumidos por personas que padecen sensibilidad al gluten o celiacía (Figura 1.4 y Figura 1.5), debido a que el único tratamiento efectivo es el control de la dieta, la cual debe ser libre de TACC, esto es, sin **trigo**, *Triticum aestivum*; **avena**, *Avena sativa*; **cebada**, *Hordeum vulgare* o **centeno**, *Secale cereale* (Prandi y col., 2014).



**Figura 1.4.** Enfermedad celíaca.  
Fuente: adaptado de la FADE (2016).



**Figura 1.5.** Enfermedad celíaca. Esquema del daño del revestimiento intestinal.  
Fuente: adaptado de Naturen (2017).

En los últimos años, el creciente número de casos diagnosticados de celiaquía y la búsqueda de nuevos nichos comerciales por parte de las empresas, ha impulsado fuertemente el desarrollo de productos a base de harina de arroz, cuya comercialización ha aumentado recientemente (Calderón de la Barca y col., 2010). Sin embargo, estos presentan, en general, características organolépticas menos aceptadas por los consumidores (Gallagher y col., 2004) y mayor precio, debido al costo de los ingredientes y a la baja rotación de estos productos en góndola.

### **1.2.2. Propiedades de las harinas nativas**

La harina es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones, principalmente la de impartición de textura y de consistencia en los alimentos. Las propiedades más importantes para determinar su utilización, en diversas aplicaciones industriales, incluyen las fisicoquímicas: gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles (Wang y White, 1994).

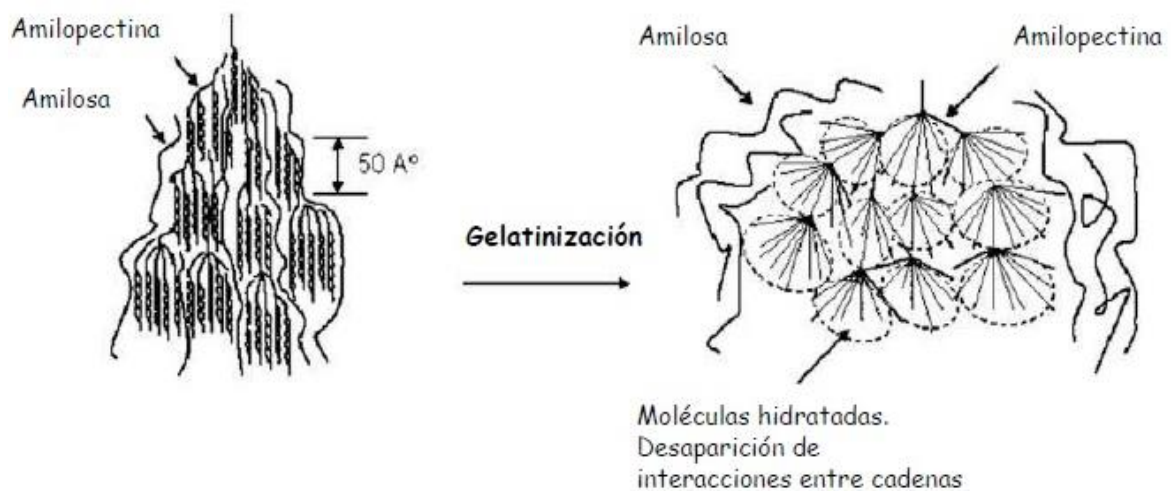
Las harinas nativas son aquellas que no han sido modificadas y poseen sus características naturales. El uso de las harinas o de los almidones nativos está limitado principalmente por la tendencia de los mismos a retrogradar y a presentar sinéresis. Debido a esto se han desarrollado procesos de modificación, tanto físicos como químicos y enzimáticos (o una combinación de estos), para mejorar las propiedades funcionales y ofrecer las posibilidades que no brindan las harinas o los almidones nativos, otorgándoles a los alimentos propiedades reológicas deseables y mayor estabilidad (Light, 1990).

### **1.2.3. Propiedades de las harinas gelatinizadas**

Las limitaciones que presentan las harinas nativas, como se ha mencionado, y especialmente las que carecen de gluten, hacen necesario someterlas a modificaciones que les confieran los atributos requeridos. Los métodos físicos gozan de gran aceptación por parte de la población, cada vez más exigente a la hora de consumir productos naturales. Entre las modificaciones físicas se encuentran los tratamientos

hidrotérmicos, que convierten la harina nativa en pregelatinizada o precocida, mediante extrusión o secado en rodillos (Parra y col., 2016).

Los tratamientos térmicos afectan la estructura del gránulo de almidón e influyen en los tiempos de cocción y la rapidez con que ocurre la hidratación. La gelatinización (Figura 1.6) es un proceso de hinchamiento y ruptura de los gránulos de almidón, a una determinada temperatura que suele fluctuar entre los 55 °C y los 75 °C según el contenido de amilosa del arroz. Las harinas de arroz glutinoso (bajo contenido de amilosa) gelatinizan a menor temperatura que las correspondientes a arroz no glutinoso (Bello, 2009).



**Figura 1.6.** Representación esquemática de la microestructura y la transición estructural del almidón durante la gelatinización. Fuente: Gatto (2016).

La aplicación de estas harinas en panificación busca mejorar las propiedades viscoelásticas de las masas, debido a que el incremento de sólidos solubles, cuanto mayor sea el grado de gelatinización, aportan mayor consistencia y viscosidad a la fase acuosa de la mezcla, lo que mejoraría la capacidad de retención gas y una mayor expansión durante la fermentación y el horneado (Sánchez y col., 2008).

#### 1.2.4. Propiedades térmicas y de hidratación

A diferencia del trigo, el arroz no es un cereal panificable bajo los estándares de preferencia de los consumidores. Sin embargo, la necesidad de buscar alternativas libres de gluten para una población cada vez más sensible a los alérgenos, ha hecho

que se considere a la harina de arroz como un buen sustituto, siempre que su capacidad de absorción de agua le permita formar una masa elástica y lisa, que se asemeje a la masa de trigo.

Es importante señalar que no todas las variedades de arroz poseen esta cualidad, ya que depende de la constitución química del grano y de la cantidad de amilosa. En lo referente a la composición química, Lumdubwong y Seib (2000) afirman que las proteínas del arroz son tecnológicamente inadecuadas para el procesamiento de alimentos, debido a que son extremadamente insolubles y muy hidrofóbicas. Estas características son responsables de que la harina de arroz sea incapaz de formar una red proteica cuando se mezcla con agua. Como consecuencia, el dióxido de carbono formado durante la fermentación no puede ser retenido en las masas, originando productos con un bajo volumen específico y migas duras (He y Hosene, 1991). Por otra parte, la amilosa del grano es el componente químico que determina la temperatura de gelatinización y tiene una gran influencia en los procesos de panificación. Cuanta más amilosa contiene el almidón, más temperatura, agua y tiempo requiere para su cocción (Rosell y col., 2007).

Asimismo, la hidratación es una de las propiedades más estudiadas al momento de seleccionar la harina de arroz, su capacidad para retener agua y aceite facilita la formación de la masa y mejora la presentación final del producto. Para Cedeño y Galarza (2013), la relación es inversamente proporcional entre la cantidad de amilosa y la capacidad de hinchamiento de las partículas; cuando el grano contiene mucha amilosa es menor su poder de hidratación. Según Rodríguez (2015), el almidón es insoluble en agua fría pero puede retenerla, esta se adhiere a la superficie de los gránulos de almidón y produce su hinchamiento. Este comportamiento se atribuye a la relación amilosa/amilopectina, ya que las moléculas de agua quedan atrapadas en la estructura de la amilopectina. Para determinar la capacidad de hidratación se utilizan varios métodos, entre los que pueden citarse: poder de hinchamiento e índice de solubilidad en agua. El poder de hinchamiento del gránulo de almidón es un indicador de la capacidad de la harina para hidratarse, bajo determinadas condiciones de

temperatura y de cantidad de agua. La relación entre el hinchamiento y la solubilidad están a su vez relacionadas con la temperatura (Cedeño y Galarza, 2013).

### 1.3. Pan

Los panes aparecieron hacia el 3000 a. C. La leyenda dice que una sirvienta olvidó cocer una masa y a la mañana siguiente vio que esta se había elevado durante la noche. En el antiguo Egipto el pan tenía tres funciones esenciales: comercial, gracias al desarrollo de técnicas de panificación; social, porque se utilizaba para pagar los salarios; y espiritual, al servir de ofrenda a los dioses. Por su parte, los hebreos, esclavos de los egipcios por entonces, atribuían al pan un gran valor religioso. Distinguían entre el pan fermentado y el pan no fermentado (ácimo). El primero considerado como impuro, se convirtió en el pan que se comía diariamente y el segundo, puro, servía de ofrenda a Dios.

En la antigua Grecia la panificación doméstica pasó a la colectiva, con la creación de las primeras panaderías. Los panes tuvieron un auge considerable y en el siglo III a. C. había más de 72 panes diferentes en Atenas.

Roma, un poco más tarde, en el siglo II a. C. otorgó a los panaderos el estatus de funcionarios. Los romanos refinaron las técnicas de panificación, fabricando panes de múltiples formas.

Para los cristianos, el pan tiene un valor simbólico. En la Biblia podemos encontrar numerosas referencias, como Juan 6:35 - "Yo soy el pan de la vida; el que a mí viene, nunca tendrá hambre" - en la que Cristo se identifica con el pan. También el nombre de la ciudad natal de Jesús, Belén, significa en arameo "la casa del pan".

En Europa, especialmente en Francia, entre los siglos V y principios del XV, el pan servía como herramienta de poder. En efecto, los señores, propietarios de los molinos y hornos, exigían a los campesinos que pagaran el derecho a utilizarlos. En esta época, los panes se asociaban con la clase social a la que estaban destinados, se fabricaba pan de criado, pan de corte o pan de escudero.

Desde el siglo XVI al XVIII, las hambrunas que devastaron Europa obligaron a los pobres a consumir panes de harina mezclados con paja, corteza de madera o incluso raíces. Si se sorprendía a un niño robando pan se lo condenaba a remar en una galera

de por vida. De hambruna en hambruna, el pueblo encolerizado empezó a manifestar su descontento. Luego de la revolución francesa (1799) los panes tenían un precio fijo y obligatorio, y los panaderos sólo podían preparar el pan igualitario, compuesto por trigo y centeno mezclado con salvado. Posteriormente, el pan blanco, considerado hasta entonces como exclusivo y reservado a la aristocracia, se convirtió oficialmente en el pan de todos los franceses.

El siglo XIX fue un período de transición marcado por la investigación y los descubrimientos técnicos de panificación, y las dos guerras mundiales. El pan se convirtió en el pan de guerra. El pan blanco no podía fabricarse, se reemplazó por panes grises, compuestos por harina de maíz, arroz y otros productos sustitutivos. Después de la guerra, comenzó el consumo de panes industriales, panes blancos que pasaban por un amasado intensivo. Pero estos nuevos panes eran insípidos, sin olor ni sabor. Entre 1970 y 1980 reaparece el pan campesino. La gente volvió a descubrir el valor del pan, convencidos de que éste era fuente de bienestar y de salud. El pan no sería tan solo un alimento de acompañamiento, sino fuente de sociabilidad, variedad y energía en la comida. En la actualidad los panaderos artesanales continúan fabricando nuevos panes, ya sean de trigo, escanda (trigo almidonero silvestre), centeno, entre otros (Fiset y Blais, 2007).

#### **1.4. Panes elaborados a base de arroz**

##### **1.4.1. Pan de molde a base de arroz**

Según los ingredientes utilizados y la forma de elaboración, los panes se dividen en dos categorías: pan común (tipo francés) y pan especial. Dentro de la categoría pan especial se encuentra el pan de molde, aquel que tiene una ligera corteza blanda y que para su cocción ha sido introducido en un molde (Mesas y Alegre, 2002).

El pan de molde también conocido en otros países como pan cuadrado, pan de caja, pan de barra, se ha caracterizado por ser un pan que puede conservarse mucho más tiempo con relación a los demás tipos de panes, presentando entre un 50 % a un 57 % de humedad (Mesas y Alegre, 2002; Callejo González, 2010). Físicamente tres características diferencian el pan de molde de los otros tipos de panes:



- **Volumen.** - se refiere a la capacidad de retención de gases en la masa. Previo a ser horneado, el volumen debe corresponder al doble de la masa inicial (Callejo González, 2010).
- **Color.** - varía según el tipo de harina que se use y el proceso de oxidación durante el amasado, este puede ser en tonalidades entre blanco a marrón claro. Por otro lado, el color de la corteza depende de los procesos de Maillard y de caramelización (Callejo González, 2010).
- **Textura.** - obedece a la cantidad de proteínas presentes en la harina y al contenido de agua empleada (Callejo González, 2010). La textura deseada debe ser suave con cierto nivel de firmeza.

Los sustitutos de la harina de trigo, como ingrediente principal para la elaboración del pan de molde, han sido objeto de estudios como alternativa al problema de la celiaquía que afecta a un considerable porcentaje de la población mundial, entre el 1-2 %. El pan a base de harina de arroz ha surgido desde hace un poco más de una década como la solución, debido a que la harina de arroz carece de gluten, y este componente puede ser fácilmente remplazado por hidrocoloides (gomas) y otros aditivos como: gasificantes, emulsionantes y espesantes, que confieren al pan de arroz características de viscoelasticidad exigidas por los consumidores (Molina-Rosell, 2013).

La composición general de este tipo de panes se basa principalmente en harina de arroz, almidón (puede ser de arroz, de maíz o mandioca), agua, azúcar, margarina vegetal o aceite, huevo, derivados lácteos, proteína de soja, acidulante, levadura, conservante, espesante, sal, gasificantes, antioxidantes, entre otros (Rosell y Marco, 2008). El grado de complejidad del proceso de elaboración varía considerablemente con relación al tipo de pan deseado y a la clase de harina utilizada (Figoni, 2008).

#### **1.4.2. Sustitutos del gluten**

El gluten es uno de los elementos clave en la panificación con trigo, avena, cebada y centeno, ya que el 80 % de las proteínas que se encuentran en estas gramíneas son derivados del gluten, siendo un componente que favorece las propiedades viscoelásticas, y la capacidad de la masa para la retención de líquidos y gases

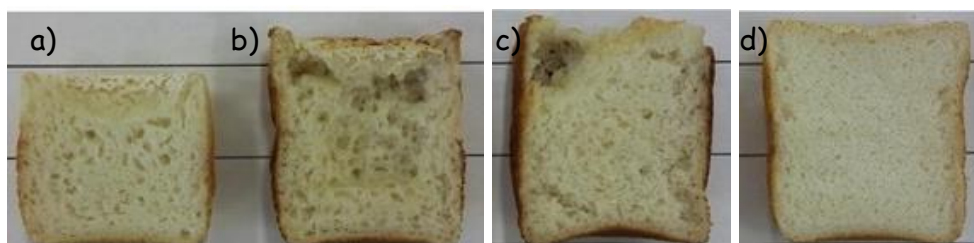
(Sánchez y col., 1996). Dos proteínas son esenciales y componen mayoritariamente el gluten: glutenina y prolamina. La prolamina confiere viscosidad, mientras que la glutenina es responsable de las propiedades elásticas y cohesivas en la masa (Gujral y Rosell, 2004).

Algunos de los elementos que han ayudado a sustituir al gluten son compuestos hidrocoloides, emulgentes, enzimáticos o proteicos; que en la mayoría de los casos actúan de manera eficaz en determinadas combinaciones para recrear propiedades viscoelásticas. El gluten ha logrado ser remplazado por diferentes tipos de aditivos, siendo los siguientes los más comunes (Rosell y Marco, 2008; Gambús y col., 2007):

**Hidrocoloides o gomas.**- son polisacáridos (naturales o artificiales) que permiten mejorar la retención de líquidos en la masa, tanto en el proceso de horneado como en el de almacenamiento. Los más usados son: Goma Garrofín, Goma Guar, Goma Espina Corona, Agar, Psyllium y Carboximetilcelulosa (Molina-Rosell, 2013). También se emplean otros hidrocoloides:

- **Goma Xántica.**- por lo general la masa con esta goma no presenta una buena expansión, en comparación con los demás hidrocoloides. Sin embargo, Gambús y colaboradores (2007) lograron que este sustituto produzca una mayor expansión al combinarlo con goma guar y pectina.
- **Hidroxipropilmetilcelulosa.**- es uno de los que produce mayor expansión de la masa o volumen del pan, su uso es muy frecuente pese a que encarece el producto.

**Enzimas.**- Pueden emplearse las siguientes: Amilasas, Proteasas (Figura 1.7), Hemicelulasas, Lipasas, Transglutaminasas y Oxidasas.



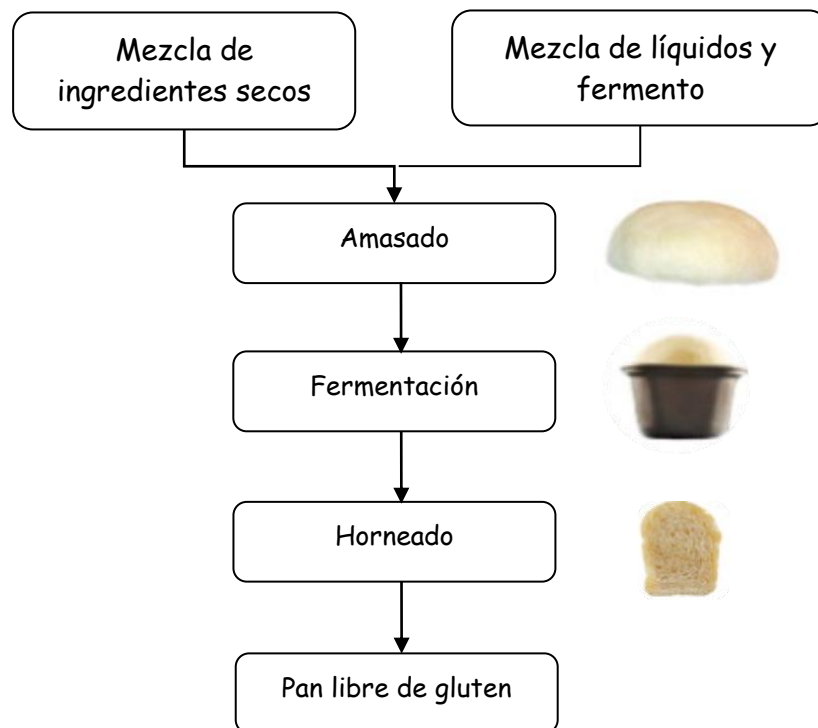
**Figura 1.7.** Efecto de la adición de enzimas proteolíticas en la elaboración de pan de arroz a) Control, b) 0,32 g Proteasa fúngica/300 g de harina, c) 0,63 g Proteasa fúngica/300 g de harina, d) 0,44 g Proteasa bacteriana/300 g de harina.

Fuente: Kawamura-Konishi y colaboradores (2013).

Además, es importante considerar que, al sustituir la presencia del gluten con diferentes tipos de gomas es indispensable el uso de agentes surfactantes y la variación de las proporciones de los componentes principales (Sánchez y col., 1996).

#### 1.4.3. Método de elaboración del pan a base de arroz

Los ingredientes, la temperatura y el tiempo de elaboración, varían usualmente debido a un número de factores como: el origen de la materia prima, la selección de hidrocoloides, tipos de enzimas y la temperatura del lugar de elaboración (Figoni, 2008). Aunque en general, el método de preparación del pan de molde comprende las etapas que se detallan a continuación (Figura 1.8):



**Figura 1.8.** Esquema del proceso de elaboración del pan de molde libre de gluten.

##### 1.4.3.1. Mezclado

En la primera etapa se preparan dos mezclas por separado que al final se homogenizan.

La primera consta de un 50-60 % de almidón que puede proceder del arroz, maíz o mandioca, la adición de este producto se realiza con la finalidad de conferir a la masa

final una textura esponjosa y suave; un 30-40 % de harina de arroz, que puede ser blanca o integral, con la finalidad de otorgar cuerpo y estructura al pan de molde; un 10 % de trigo sarraceno (es uno de los pocos cereales al igual que el arroz que no poseen gluten) cuya adición es opcional, sin embargo, el uso de esta semilla proporciona el sabor tradicional al pan de molde; un 5-8 % de azúcar o leche en polvo, que contribuirá a mejorar la coloración de la corteza, otorgando un color caramelizado y dorado, además de conferir una textura más suave; un 2 % de sal para afirmar el sabor en la masa y facilitar la retención de líquidos; por último se agrega entre 2-3 % de hidrocoloides, que absorben y retienen el agua, confiriendo a la masa una mayor consistencia y maleabilidad.

La segunda mezcla consiste en una cantidad de agua que corresponde al 85 % del peso de los materiales secos, esta puede combinarse con leche o vino para lograr sabores diferentes. En este líquido se disuelve 1-5 % de levadura, cuya función primordial es la de fermentar la masa, que conlleva a la formación de gas ( $CO_2$ ) y alcohol en la misma (Figoni, 2008; Lazaridou y col., 2007; Gujral y Rosell, 2004).

#### **1.4.3.2. Formación de la masa**

Con el fin de homogenizar los ingredientes se juntan las dos mezclas descritas y se amasa de forma constante, para facilitar la absorción de agua hasta obtener una masa suave y compacta (Lazaridou y col., 2007; Gujral y Rosell, 2004) con consistencia de pasta, dado que la misma es muy hidratada. A su vez, durante el amasado las amilasas se activan y se generan azúcares fermentables, que constituyen el sustrato para la acción de las levaduras (De Peña, 2003).

#### **1.4.3.3. Fermentación**

En esta etapa las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) transforman los azúcares en alcohol, dióxido de carbono y otros compuestos menores que influirán en el aroma final del pan. Como resultado, la masa se expande y cambia sus propiedades físicas.

En los procesos de panificación es habitual realizar una fermentación inicial, antes del formado definitivo de la pieza, y otra final, con la pieza ya formada. La primera persigue un cambio en la reología de la masa, que facilita la formación e influirá en la

calidad del pan producido. La segunda pretende incrementar el tamaño de la pieza para obtener un producto esponjoso (Calderón Domínguez y col., 2004; Başaran y Göçmen, 2003).

La fermentación puede durar entre una y varias horas, hasta que la masa duplique su volumen original (Gujral y Rosell, 2004). El tiempo que dure esta fase puede variar según el tipo de levadura (en crema o seca) y las cantidades usadas, así como la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, por ejemplo: mientras menor es el porcentaje de levadura o más baja la temperatura de reposo, mayor es el tiempo de fermentación de la masa; por otra parte, a mayor temperatura y/o a mayor concentración de levadura, menor es el tiempo de reposo. A su vez, dado que las levaduras se alimentan de azúcares, normalmente provenientes de la acción de las enzimas sobre los almidones de las harinas, la adición de sacarosa puede estimular o acelerar la fermentación, pero un exceso de esta en la masa puede deshidratar y matar las levaduras (Alier y Casañ, 2016).

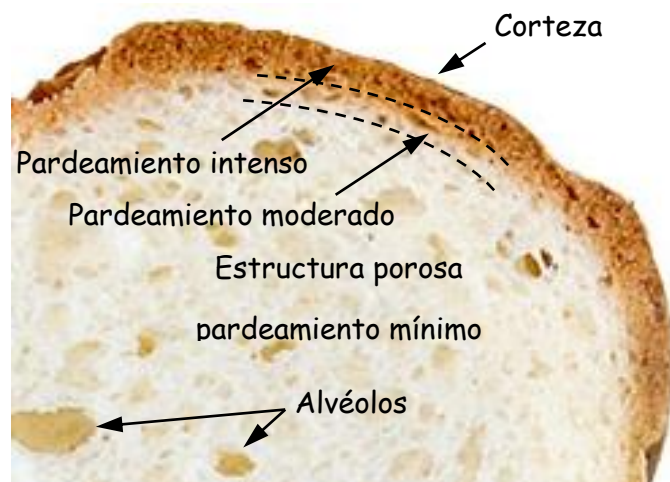
#### **1.4.3.4. Cocción**

Una vez fermentada, la pieza debe ser introducida en el horno, donde ocurre la formación de la corteza y la miga del pan. La temperatura de cocción depende del tamaño del pan, panes pequeños requieren una temperatura y tiempo ideal de 215 °C por 20 a 25 minutos (Lazaridou y col., 2007), mientras que panes de mayor tamaño, como los panes de molde de 1 kg, se calientan a 180 °C por 60 a 70 minutos (Gómez Pallarés y col., 2007).

Durante la primera etapa del horneado se produce la expansión del volumen, la que está influenciada por dos factores: por un lado, los gases ocluidos en el interior de la masa se expanden al incrementarse la temperatura; por otro, parte del agua y del etanol presentes se evaporan, pasan a los alvéolos y favorecen la expansión (Gómez Pallarés y col., 2007). Cuando la temperatura alcanza los 60 °C mueren las levaduras y el almidón comienza a gelatinizarse. Luego, entre 60 °C y 79 °C, las proteínas coagulan, proceso en el que parte del agua se libera y es atrapada por el almidón, en tanto que las proteínas coaguladas se adhieren a la superficie. Durante esta fase, la gelatinización continúa, las moléculas de cadena lineal de amilosa migran fuera de los

gránulos. La amilasa en contacto con el agua forma redes gelatinosas alrededor de los amiloplastos, los que empiezan a perder su estructura cristalina.

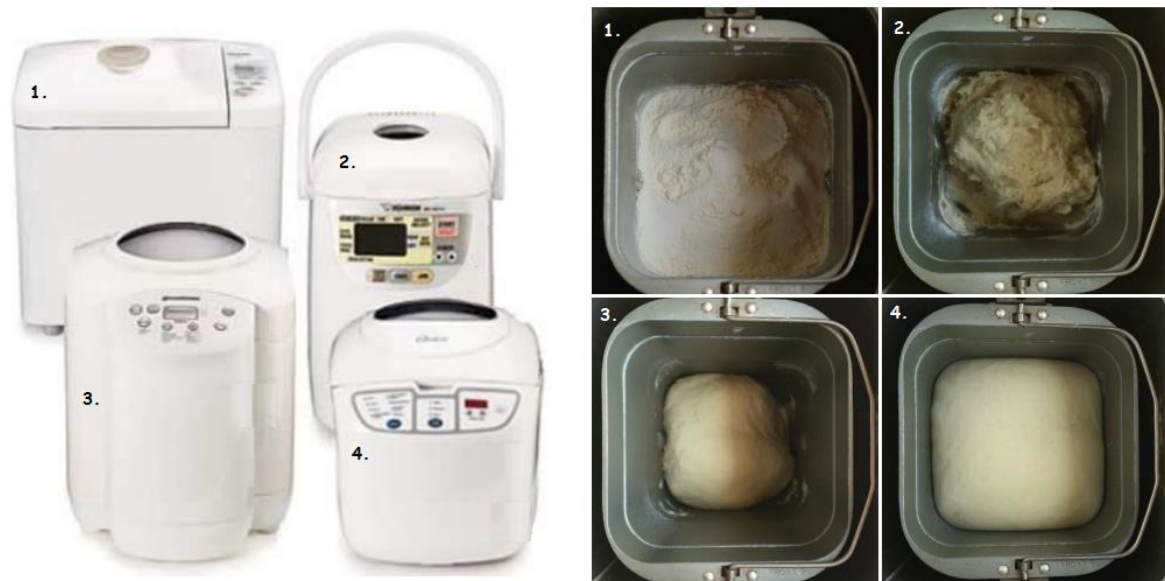
En la segunda y última fase de cocción terminan los procesos descritos y el pan se seca. La formación de la corteza comienza con la deshidratación de la capa exterior de la masa (Wagner y col., 2007). Durante el horneado, el contenido de agua sobre la superficie de la pieza llega a ser inferior en relación con el medio, y esto combinado con la alta temperatura, es uno de los factores que hacen a la corteza diferente de la miga. También el color y el flavor comienzan a cambiar, surgiendo el aroma típico del pan recién horneado (Figura 1.9). Las reacciones químicas implicadas durante esta etapa son principalmente la reacción de Maillard y la caramelización. Estas reacciones generan numerosa cantidad de compuestos aromáticos, que se relacionan con las características sensoriales de los alimentos procesados térmicamente y que inciden de manera especial en la aceptación del producto por parte del consumidor (Whitson y col., 2010; Cerny, 2008).



**Figura 1.9.** Estructura del pan libre de gluten.  
Fuente: adaptado de Rosentrater y Evers (2018).

En la década de 1980, se comenzaron a comercializar en Japón pequeños electrodomésticos con el propósito de hacer pan en el hogar (Figura 1.10.a.). Estas máquinas elaboradoras de pan han sido diseñadas para reproducir y simplificar todos los procesos necesarios para el mezclado, la fermentación y la cocción (como se muestra en la Figura 1.10.b).

La mayoría de las máquinas permiten ajustar la configuración (es decir, tiempos y temperaturas de cocción, mezcla y fermentación) para una variedad de pan, y tienen moldes que pueden acomodar tamaños de pan de 400 g, 700 g y 900 g. Debido a su facilidad de uso, estos electrodomésticos incrementaron su popularidad en todo el mundo (Rosentrater y Evers, 2018).



**Figura 1.10. a)** Diferentes tipos de fabricadoras hogareñas de pan. 1. Panasonic SD-YD250, 2. Zojirushi Mini BB-HAC10 3. Breadman Cool Touch TR555LC 4. Oster 2 lb. **b)** Proceso de elaboración. 1. mezclado, 2. Amasado, 3. Fermentación, 4. Cocción.

Si bien estas máquinas originalmente fueron diseñadas para imitar el proceso de elaboración de pan a base de trigo, las formulaciones libres de gluten requerirán modificaciones en los niveles de ingredientes y contenido de agua. Por otra parte, recientemente Sanyo Electric Co. Ltd. desarrolló un electrodoméstico (Gopan) que permite elaborar pan a partir de granos de arroz crudo, este producto se agotó poco después de salir al mercado, sugiriendo que los consumidores con sensibilidad al gluten podrían ser un factor importante en la demanda excepcional (Joyce, 2010).

#### 1.4.3.5. Almacenamiento

El pan es un producto que pierde aceptación a medida que transcurre el tiempo desde su elaboración. Se distinguen dos tipos de alteraciones: correosidad de la corteza y

endurecimiento de la miga. La primera, en la que la corteza deja de ser crujiente, se debe a la acumulación de agua en la superficie del producto, por enfriamiento inadecuado del pan o por su exposición en ambientes muy húmedos. La segunda se produce después de la elaboración a causa de la retrogradación del almidón. Este fenómeno se retrasa si se conserva el pan congelado, si se reduce la proporción de almidón presente en la harina (harinas con más proteínas o empleando aditivos que rompan la estructura del almidón,  $\alpha$ -amilasas) o con agentes emulsionantes que formen complejos con el almidón. Los panes de larga vida útil se conservan en envases de plástico flexibles y en atmósferas modificadas de nitrógeno (40 %) y dióxido de carbono (60 %) (García-Villanova Ruiz y Guerra Hernández, 2010).

### **1.5. Calidad de la masa**

La calidad panadera de la harina utilizada se mide con ensayos reológicos de las masas obtenidas (García-Villanova Ruiz y Guerra Hernández, 2010).

Uno de los objetivos principales de la reología es determinar ecuaciones constitutivas, para moldear el comportamiento viscoelástico de la materia (Macosko, 1994). Se pueden utilizar equipos especializados como el farinógrafo y el reómetro, con el propósito de establecer las propiedades reológicas de la masa, sean estas cualitativas o cuantitativas. Estos equipos permiten someter a la materia a diferentes deformaciones controladas y medir los esfuerzos (Morán, 2013).

Para investigar las propiedades de la masa, tanto en el farinógrafo como en el reómetro, se debe evitar la adición de levadura, ya que la formación de burbujas de aire interfiere y puede alterar los parámetros reológicos. La cantidad de masa y el número de ensayos varían; Lazaridou y colaboradores (2007) recomiendan un mínimo de dos repeticiones con 150 g cada una. Todas estas mediciones se realizan a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C).

La curva resultante de un farinógrafo proporciona la fuerza necesaria para mezclar una masa a una velocidad constante, brindando información de la cantidad de agua absorbida para alcanzar una determinada consistencia. Este equipo también provee información sobre el tiempo de desarrollo, o tiempo óptimo de amasado, que es el tiempo que transcurre desde el comienzo hasta que se alcanza el máximo de



consistencia. En general las harinas con buena calidad panadera suelen tener mayores valores de absorción de agua, tiempo de desarrollo y estabilidad (Gómez Pallarés y col., 2007).

La masa (sin levadura) también puede ser sometida a un ensayo oscilatorio, en un reómetro dinámico, del que se obtienen los módulos de almacenamiento ( $G'$ , que mide elasticidad) y pérdida ( $G''$ , que mide viscosidad), medidos en Pascales (Pa). El módulo elástico o de almacenamiento, determina la habilidad de la masa para almacenar energía, mientras que el módulo viscoso o de pérdida mide la capacidad para disiparla. De la obtención de ambos módulos se puede inferir: el módulo complejo, que está relacionado con la resistencia total de la masa a la deformación; y el ángulo de desfase, que representa una medida muy útil de la elasticidad de la masa y se determina como el cociente del módulo viscoso sobre el módulo elástico. Para la interpretación de este último parámetro se aplica el siguiente criterio: si el valor de la tangente de dicho ángulo ( $\tan \delta$ ) es menor a 1, la elasticidad se asemeja a la de un sólido, en cambio, si el valor es mayor a la unidad, la elasticidad se asemeja a la de un líquido (Sivaramakrishnan y col., 2004; Lazaridou y col., 2007).

Los ensayos reológicos también suelen ser usados para verificar la influencia de cambios en la formulación, empleo de aditivos o parámetros de procesamiento (Gómez Pallarés y col., 2007).

### **1.6. Calidad del pan**

El volumen específico del pan es la forma tradicional de evaluación de la calidad panadera de una harina, sin embargo, hay otros parámetros que intervienen, como el aspecto, la textura, el color, el olor y el sabor del pan; atributos que también deben ser tomados en consideración.

Las expectativas del consumidor respecto del pan de molde se detallan a continuación: forma simétrica; corteza lisa y sin defectos apreciables, ni separación de la miga; color dorado; miga blanda y húmeda, con alveolos cerrados y uniformes; aroma característico y sabor intenso ligeramente dulzón (Nadal y Fornos, 2004).

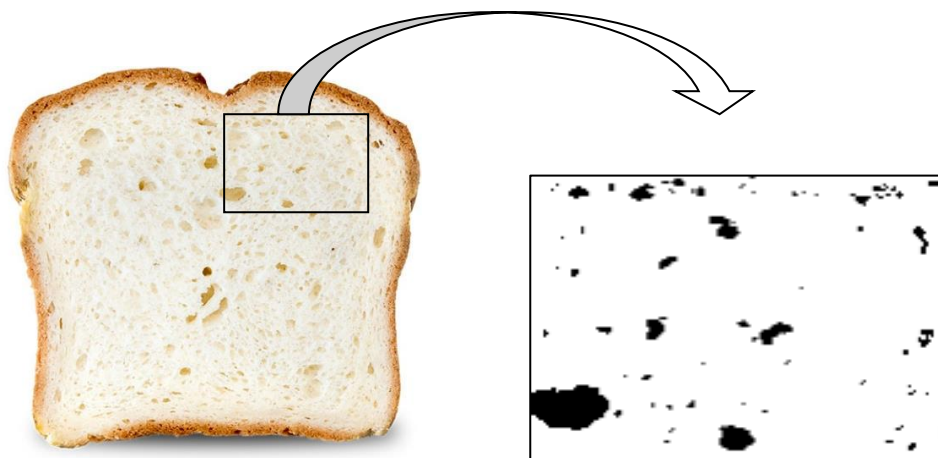
Para llevar a cabo la evaluación se deja reposar el pan a temperatura ambiente por varios minutos, una vez finalizada la cocción, hasta enfriar. Seguidamente se describen los parámetros generalmente estudiados.

### 1.6.1. Volumen

Es el espacio ocupado por el pan y se mide en centímetros cúbicos o mililitros. Tradicionalmente, el volumen del pan ha sido determinado mediante la técnica de desplazamiento de semillas (AACC, 2000).

### 1.6.2. Alveolado

Se refiere a la estructura interna del pan, se mide a través de la porosidad o tamaño y forma de las micro-celdas constituidas por espacios de gas. Una buena medición del alveolado se obtiene mediante el porcentaje de la porosidad. Se toma una muestra transversal central del pan, se pesa y se obtiene el porcentaje de porosidad, usando la densidad del pan previamente calculada. Otra alternativa más reciente para la evaluación del alveolado es mediante el análisis de imágenes (Figura 1.11), basado en la estimación del área alveolar (de Escalada Pla, 2006; Cajas Locke y col. 2015; Rosentrater y Evers, 2018).



**Figura 1.11.** Estimación de la porosidad mediante análisis de imágenes (el negro denota la abertura de los poros o alvéolos).

Fuente: adaptado de Rosentrater y Evers (2018).

### **1.6.3. Textura**

Se refiere a la dureza/blandura del pan, esta propiedad constituye un importante atributo de calidad que puede ser medido mediante un análisis sensorial según la siguiente escala: suave, elástica, áspera, desmenuzable, etc. Además, existen métodos modernos que incluyen el empleo de equipos analizadores de textura, basados en ensayos de compresión que simulan la masticación (AACC, 2000).

### **1.6.4. Color**

La coloración del pan de molde puede ser medida mediante una escala sensorial que incluya las siguientes categorías: dorado, pálido, muy pálido y oscuro. La coloración de la miga y de la corteza también se evalúa mediante fotolorimetría (Lazaridou y col., 2007). Este método proporciona datos específicos de luminosidad y cromaticidad, asociados a un sistema internacional de medición del color (CIELAB). Dada su precisión, permite detectar cambios de color ocasionados por las modificaciones en la formulación o en el proceso de elaboración del pan.

## 2. Objetivos

*“El éxito no llega por suerte, es el sacrificio y el esfuerzo de días, meses y años de trabajo.”*

Paulo Coelho.

## **2.1. Objetivos generales**

El objetivo general del presente trabajo fue seleccionar harinas de arroz y sustitutos del gluten, y desarrollar formulaciones para la elaboración de panes de molde libres de gluten, evaluando las propiedades físicas y funcionales tanto de los ingredientes como del producto final.

## **2.2. Objetivos específicos**

1. Caracterizar las harinas de arroz: comerciales, modificada termo-mecánicamente y gelatinizada; mediante el contenido de humedad, la distribución de tamaño de partícula, las propiedades térmicas y las propiedades de hidratación.
2. Determinar el efecto de la granulometría de las harinas de arroz sobre el alveolado y el volumen del pan de molde, a fin de seleccionar la harina que maximice estos atributos de calidad.
3. Evaluar el efecto de la sustitución de la harina de arroz seleccionada por harina de arroz gelatinizada, sobre el alveolado y el volumen del pan de molde.
4. Estudiar el efecto de seis sustitutos del gluten sobre la calidad de los panes elaborados a base de la harina de arroz seleccionada, con el propósito de elegir los más aptos.
5. Optimizar mediante diseño de mezclas la formulación de los panes de molde, determinando el efecto de los sustitutos del gluten elegidos sobre la reología de la masa y la calidad del pan (volumen del pan, alveolado, textura, y color). Establecer posibles relaciones entre la calidad del pan y los atributos reológicos de la masa.

### 3. Materiales y Métodos

*"Cuando una persona desea realmente algo, todo el universo conspira para ayudar a esa persona a realizar su sueño."*

Paulo Coelho.

### 3.1. Harinas de arroz

Se utilizaron harinas comerciales, harina modificada termo-mecánicamente y harina de arroz gelatinizada.

Las tres **harinas comerciales** empleadas fueron: Santa María (Ana Hernández Productos Alimenticios SRL, La Plata, Argentina), Kapac (Alimentos Específicos S.A., Buenos Aires, Argentina) y Señor de Sipan (Productos libres de gluten SRL, Buenos Aires, Argentina).

La **harina modificada** se obtuvo en un molido planetario de bolas de alto impacto (PM100, Retsch GmbH, Alemania), con accesorios de óxido de circonio, a partir de arroz pulido de grano largo fino (Dos Hermanos, Argentina). La velocidad de rotación de la jarra de molienda se fijó en 550 rpm y el tiempo de molienda en 40 minutos. Se utilizó el protocolo de molienda propuesto por Loubes (2015), el cual comprendió ciclos de molienda (5 min, con inversión de giro cada 30 s) y pausa (40 min) hasta completar el tiempo total de molienda.

La **harina de arroz gelatinizada** fue elaborada a partir de arroz parbolizado comercial (Arroz Gallo, Molinos Río de la Plata, Argentina). Se implementaron dos pasos de molienda: el primero, en un molino continuo de discos dentados (RILO SRL, Buenos Aires, Argentina) y el segundo, en un molino de cuchillas (DECALAB, Buenos Aires, Argentina) durante 1 minuto.

La composición centesimal de las diferentes harinas se muestra en la Tabla 3.1 (a base de lo informado en los rótulos de las harinas comerciales, del arroz entero pulido y del arroz parbolizado; estos últimos empleados respectivamente para la elaboración de la harina modificada y de la harina gelatinizada).

**Tabla 3.1.** Composición centesimal de las harinas de arroz.

<b>g/100 g</b>	<b>SM</b>	<b>K</b>	<b>SP</b>	<b>HM 550</b>	<b>GE</b>
Carbohidratos	80	82	76,5	80	76
Proteínas	8	4,2	6,5	6,2	7,0
Grasas totales	1,2	1,6	0,3	0,4	0,52
Fibra alimentaria	0,0024	1,6	0,1	1,4	3,4

SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: harina modificada, GE: harina gelatinizada

Puede observarse que las harinas presentaron una composición similar, con aproximadamente un 80 % de carbohidratos, 6 % de proteínas y un contenido lipídico de entre 0,4 % y 1,6 %.

### 3.2. Propiedades de las harinas

#### 3.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad de las harinas se determinó mediante el método indirecto 925.10 de la AOAC (2000), el cual se basa en la pérdida de masa de 2 g (base húmeda) de muestra, después del secado a  $130 \pm 3$  °C durante 1 hora.

#### 3.2.2. Distribución de tamaño de partícula

##### 3.2.2.1. Método de Tamizado

La harina (200 g) se tamizó durante 20 minutos en un agitador mecánico Zonytest EJR200 (Rey y Ronzoni, Argentina), con una serie de nueve tamices ASTM (Estándar EE. UU.), que se detallan en la Tabla 3.2 (Figura 3.1).

**Tabla 3.2.** Tamices normalizados por la ASTM (American Society for Testing and Materials).

<i>Malla N° (ASTM)</i>	<i>Abertura de malla (<math>\mu</math>m)</i>
40	420
45	350
60	250
80	177
100	149
120	125
140	105
200	74
270	53

La masa de las nueve fracciones se registró en una balanza analítica de precisión ( $\pm$  0,5 g). A partir de estos datos se calculó el porcentaje en de masa retenida, en cada



uno de los tamices, en relación con la masa total (ec. 1) y se obtuvo la distribución de tamaño de partícula y la distribución acumulada.

$$\text{Masa (\%)} = \frac{\text{masa retenida en cada tamiz} \times 100}{\text{masa total}} \quad (1)$$



**Figura 3.1.** Agitador mecánico Zonytest y tamices ASTM.

Además, se determinó el índice de dispersión (ID) de la distribución de tamaño de partícula según:

$$\text{ID} = \frac{\text{D90-D10}}{\text{D50}} \quad (2)$$

Donde D10, D50 y D90, representan los diámetros por los que pasa el 10 %, el 50 % y el 90 % de la muestra, valores que se obtienen a partir de la distribución acumulada de los porcentajes pasantes<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Pasante (%) = 100 % - masa (%)

### 3.2.2.2. Método de Difracción láser

El tamaño de partícula de las harinas de arroz se determinó por dispersión estática de luz, usando un equipo Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido) con una unidad de dispersión Hydro 2000MU (Malvern Instruments Ltd, Reino Unido), provisto con un láser de He-Ne ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ). El rango de medición del equipo se encuentra entre  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$  y  $1000 \text{ }\mu\text{m}$ . La velocidad de la hélice del equipo de dispersión se mantuvo a 1800 rpm, como agente dispersante se usó agua bidestilada, y para el procesamiento de los datos se empleó el índice de refracción de la fase dispersa (1,53) y su parámetro de absorción (0,001).

A partir de cinco lecturas realizadas sobre la muestra, se obtuvo la distribución de tamaño de partícula en volumen y los valores del **Dv10**, **Dv50** y **Dv90**, expresados en  $\mu\text{m}$ , que representan los diámetros de partícula de la distribución acumulativa al 10 %, 50 % (mediana) y 90 %, respectivamente. La dispersión de la población se estimó mediante el valor de **IDv** (índice de dispersión de la distribución en volumen) calculado según:

$$ID = \frac{Dv90 - Dv10}{Dv50} \quad (3)$$

### 3.2.3. Propiedades térmicas (DSC)

Las propiedades térmicas de las harinas de arroz se determinaron por duplicado en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) Mettler - Toledo DSC modelo 822 (Schwerzenbach, Suiza). En una cápsula de aluminio de  $40 \text{ }\mu\text{l}$  de capacidad (Mettler) se pesaron aproximadamente 3 mg de harina, se adicionó agua destilada en una proporción harina /agua de 1:3 (p/v) y luego se selló la cápsula, dejándola estabilizar un período de 24 horas a temperatura ambiente, antes de realizar el ensayo calorimétrico, con un ciclo de calentamiento de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  a una velocidad constante de  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , usando una cápsula vacía como referencia.

Para cada muestra se obtuvo un termograma (Figura 3.2), el cual fue analizado con el programa STARe Software versión 6.1 (Mettler Thermal Analysis), del que se adquirieron los siguientes parámetros:

- Temperatura de inicio de gelatinización ( $T_o$ ).
- Temperatura de pico o máxima de gelatinización ( $T_p$ ).
- Temperatura de finalización de gelatinización ( $T_e$ ).
- Entalpía de gelatinización  $\Delta H$  (J/g b.s.): integrando el área bajo la curva de la transición endotérmica.

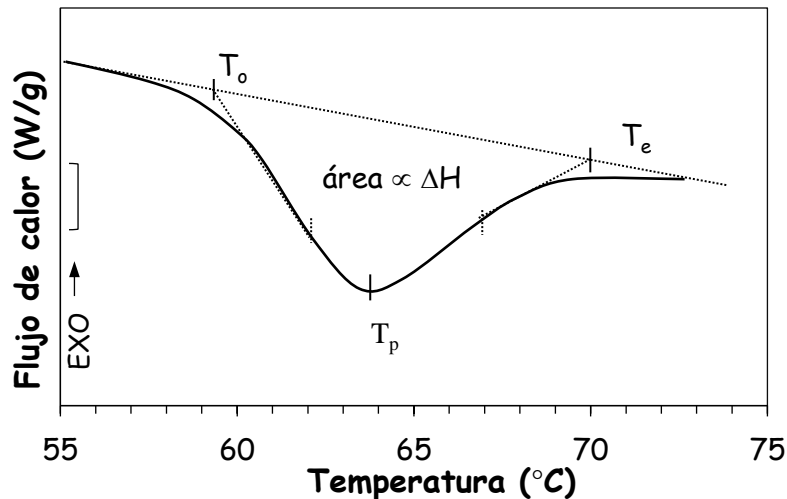


Figura 3.2. Representación esquemática del termograma.

El flujo térmico se midió con una precisión de  $0,04 \mu W$ , el intervalo de 95 % de confianza estimado para la temperatura, fue de  $1^\circ C$  y para la entalpía de 10 mJ.

#### 3.2.4. Propiedades de hidratación

El índice de absorción de agua (IAA) se midió por triplicado sobre la base del método de Chiang y Yeh (2002). Cada muestra (2 g b.s.) se suspendió en 30 ml de agua destilada en un tubo de centrífuga de 50 ml previamente tarado. La suspensión se homogeneizó en un agitador Vortex (modelo AV11 DECALAB, Argentina) por 30 segundos y luego se calentó durante 30 minutos en un baño de agua termostatzado a  $30^\circ C$ . Finalmente se centrifugó 10 minutos a  $1000 \times g$  y se eliminó el sobrenadante, pesándose el sedimento para determinar el índice a partir de la masa de harina seca, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$IAA (g/g) = \frac{\text{masa del sedimento}}{\text{masa de sólidos secos}} \quad (4)$$

El poder de hinchamiento (PH) también conocido como *Swelling power* y el índice de solubilidad en agua (ISA) de las harinas, se determinaron por triplicado según la metodología descrita por Vandeputte y colaboradores (2003), con algunas modificaciones. Cada muestra de harina (0,3 g b.s.) se colocó por triplicado en tubos de centrífuga de 50 ml previamente tarados y se adicionaron 30 ml de agua destilada. Los tubos se calentaron en un baño de agua termostaticado con agitación a 30 °C durante 30 minutos. Posteriormente fueron centrifugados a 1500 × g por 10 minutos. El sobrenadante se separó en recipientes de aluminio previamente tarados y se evaporó en estufa a 50 °C hasta masa constante. Se registró la masa del residuo sólido que quedó adherido a las paredes del tubo de centrífuga y el sedimento seco en los recipientes de aluminio. El índice de solubilidad en agua (ISA, g/100 g) y el poder de hinchamiento (PH, g/g) fueron calculados a partir de las siguientes fórmulas:

$$\text{ISA (\%)} = \frac{\text{masa de sobrenadante seco}}{\text{masa de sólidos secos}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{PH (g/g)} = \frac{\text{masa de sedimento}}{\text{masa de sólidos secos} - \text{masa del sobrenadante seco}} \quad (6)$$

### 3.3. Formulaciones para pan libre de gluten

#### 3.3.1. Formulación básica

Para la elaboración de los panes de molde se optó por una formulación de la guía para celíacos (Martínez, 2010) con algunas modificaciones.

Ingredientes secos:

- Harina de arroz, 384 g; almidón de mandioca, 16 g (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina); Sal fina libre de gluten, 8 g (Dos anclas, Balde, Argentina), sustituto del gluten, 8 g; leche en polvo, 84 g (Sancor, Sunchales, Argentina), huevo en polvo, 10 g (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina) y leudante: azúcar, 12 g (Tabacal Agroindustria, Buenos Aires, Argentina) y levadura en polvo, 8 g (Lesaffre, Buenos Aires, Argentina).

Ingredientes líquidos:

- Agua bidestilada: para la harina, 400 ml; para el huevo en polvo, 32 ml y para el leudante, 16 ml; y aceite de girasol, 40 ml (Molino Cañuelas, Cañuelas, Argentina).

Cabe indicar que se realizaron cuatro formulaciones para pan de molde con las tres harinas de arroz comerciales y con la harina modificada (sección 3.1). Como sustituto del gluten se adoptó goma xántica (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina).

### 3.3.2. Formulaciones con mezclas de harina nativa y gelatinizada

Se modificó la formulación básica (sección 3.3.1), para la elaboración de los panes de molde, reemplazando parcialmente la harina de arroz nativa por harina de arroz gelatinizada (elaborada como se indica en la sección 3.1). Como sustituto del gluten fue empleada la goma xántica (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina).

Se prepararon mezclas con diferentes grados de sustitución de la harina nativa, las cuales se muestran en la Tabla 3.3, donde también se incluyó, para cada mezcla, la cantidad de agua requerida para alcanzar una consistencia similar a la de la formulación sin reemplazo de harina nativa (0 % de sustitución).

**Tabla 3.3.** Formulaciones de mezclas de harina nativa y gelatinizada.

Sustitución <sup>1</sup> (%)	N (g)	GE (g)	Agua <sup>2</sup> (ml)
0	384	0	400
12,5	336	48	497
25	288	96	536
37,5	240	144	604
50	192	192	750

<sup>1</sup> Porcentaje de harina nativa sustituida por harina gelatinizada. <sup>2</sup> Cantidad de agua para la hidratación de la harina, no incluye la cantidad de agua para la hidratación del huevo en polvo y del leudante (32 ml y 16 ml, respectivamente). N: harina nativa, GE: harina gelatinizada.

Debido a la mayor capacidad de hidratación de la harina gelatinizada se puede apreciar el incremento de la cantidad de agua, al aumentar el porcentaje de sustitución en la mezcla.

### 3.3.3. Formulaciones con diferentes sustitutos del gluten

Se elaboraron panes de molde, según la formulación básica (sección 3.3.1), con distintos sustitutos del gluten: goma guar, adquirida en un comercio local (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina); alginato de sodio e hidroxipropilmetilcelulosa (Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri, EE. UU.) y goma espina corona, donada por Ideasupply Argentina S.A. (Chaco, Argentina).

Además, se empleó harina de arroz gelatinizada, según el grado de reemplazo óptimo de la harina nativa, en ausencia de sustitutos y con la cantidad de agua establecida en la Tabla 3.3. La cantidad de sustituto de gluten (8 g) que no se agregó a la formulación se contabilizó como harina de arroz nativa.

La goma xántica (Doña Clara, Buenos Aires, Argentina), incluida como sustituto de gluten en la formulación básica, fue adoptada como referencia o control.

### 3.4. Elaboración de pan libre de gluten

#### 3.4.1. Horno eléctrico programable

Los panes se obtuvieron en un horno eléctrico (ATMA HP4040, Argentina), cuya imagen se visualiza en la Figura 3.3. El equipo está provisto de un molde recubierto de teflón y un amasador (Figura 3.4).

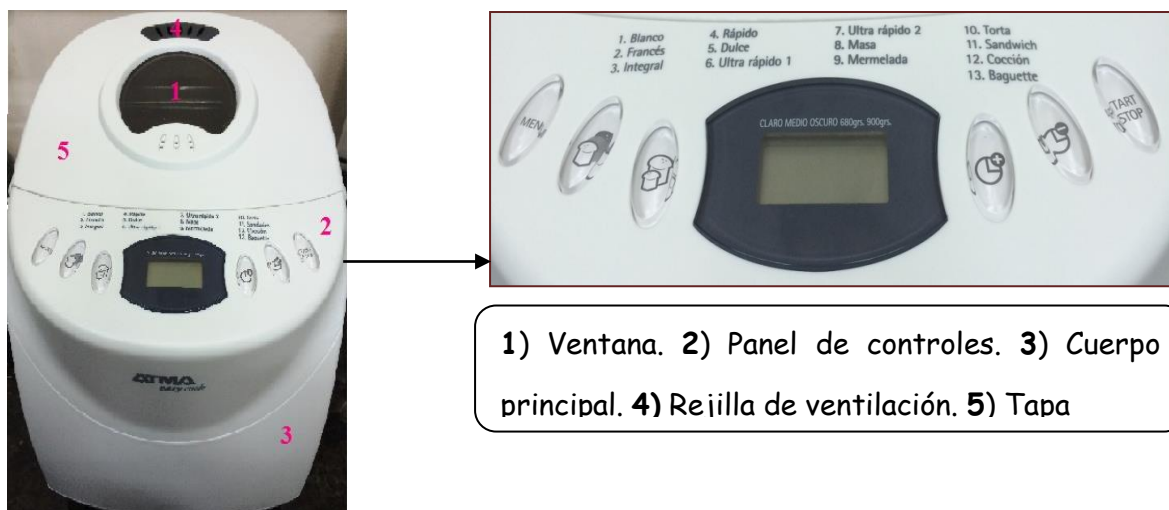
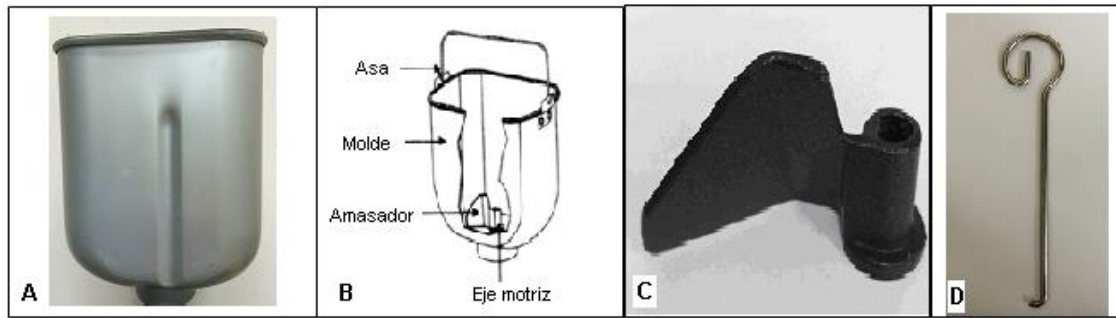


Figura 3.3. Horno eléctrico y detalle del panel de control.



**Figura 3.4.** A) Molde del pan con recubrimiento de teflón. B) Partes del molde. C) Amasador. D) Gancho. Fuente: ATMA (n.d.).

Este horno permite según la función programada (consta de 13 programas) elaborar diferentes tipos de panes, ya que con cada programa varía el tiempo de las etapas (amasado, fermentación, cocción). A su vez, estos procesos se pueden hacer seguidos o separados. Por otra parte, se puede seleccionar el grado de tostado (claro, intermedio, oscuro) y el tamaño del pan, dentro del rango de 680 - 900 g.

### 3.4.2. Preparación de la mezcla

Los ingredientes líquidos se incorporaron al molde del horno, a excepción de una fracción de agua (16 ml). A continuación se pesaron los ingredientes secos y fueron colocados en un recipiente y mezclados para luego ser adicionados al molde, cubriendo a los líquidos. El azúcar y la fracción de agua se añadieron a la levadura para activarla. Finalmente se realizó una depresión en el centro de la superficie de los ingredientes secos para colocar la levadura y así evitar el contacto con los líquidos.

### 3.4.3. Proceso en el horno

Se elaboró un pan de 900 g seleccionándose el programa N° 1 y el nivel intermedio de tostado. Este programa comprende una serie de etapas cuya función, duración y temperatura se detallan en la Tabla 3.4. El horno trabaja automáticamente amasando los ingredientes secos junto con los líquidos, alternando con etapas de fermentación. Finalmente se lleva a cabo la cocción (Tabla 3.4).

Cuando finalizó el proceso, se dejó enfriar el pan a temperatura ambiente por 15 minutos para su posterior análisis.

**Tabla 3.4.** Etapas del proceso de elaboración del pan de molde en el horno eléctrico.

<b>Fases de preparación</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Temperatura</b>
Amasar 1*	10 min	0 °C
Fermentar 1	20 min	25 °C
Amasar 2*	15 min	30 °C
Fermentar 2	25 min	32 °C
Fermentar 3	45 min	38 °C
Cocción	65 min	121 °C
Tiempo total	3h	

\* En estas fases ocurre la agitación de los ingredientes a una velocidad de 31 rpm.

Fuente: ATMA (n.d.).

### 3.5. Determinación del volumen del pan de molde

El volumen del pan fue establecido por desplazamiento de semillas de acuerdo con la metodología descrita por Sánchez y colaboradores (2008), con algunas modificaciones.

Se determinaron experimentalmente la masa del pan y del pan sumergido en un lecho de semillas contenido en un recipiente de volumen conocido ( $V_{\text{total}}$ : 5526,43 ml) así como el valor de la densidad aparente de las semillas (0,8436 g/ml). El volumen del pan (VP, ml) se calculó mediante la ecuación:

$$VP \text{ (ml)} = V_{\text{total}} \text{ (ml)} - \frac{\text{masa de semillas (g)}}{\text{densidad aparente de semillas (g/ml)}} \quad (7)$$

### 3.6. Medición del alveolado

Con el propósito de obtener el área correspondiente a los alvéolos de la miga, se analizaron las imágenes digitales de la sección transversal de los panes de molde, según la metodología propuesta por Loubes y Tolaba (2013).

Las rodajas de pan, de 1 cm de espesor, fueron colocadas sobre una impresora multifunción (HP PSC 1610, Brasil) junto con una escala de referencia y se escanearon individualmente, obteniéndose imágenes digitales en formato JPEG con una resolución de 200 ppp.



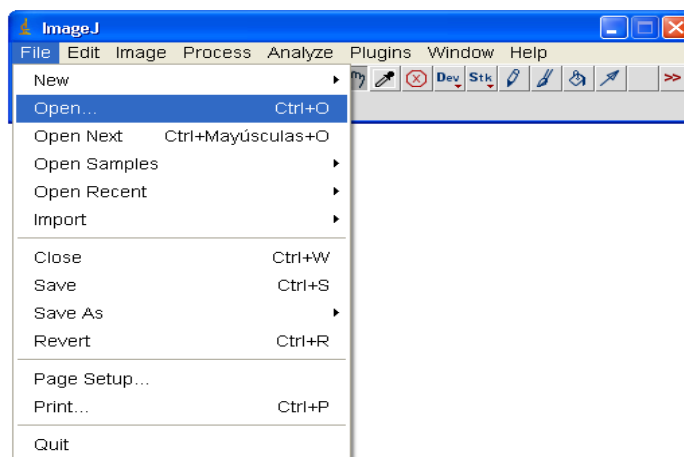
Para establecer el porcentaje del alveolado, las imágenes fueron procesadas con el programa ImageJ versión 1.42q (National Institutes of Health, EE. UU.). Se realizaron tres a cuatro recortes digitales de la imagen de cada rebanada de pan, eliminando la región de la corteza. A partir de las réplicas (recortes), se informaron los valores promedios del porcentaje del área alveolar ( $A$ , %) según la ecuación 8, definido como el porcentaje de la superficie de la rodaja que abarcan los alvéolos; junto con la densidad alveolar (alvéolos/cm<sup>2</sup>), descrita como la cantidad de alvéolos por unidad de superficie; y el área alveolar promedio (mm<sup>2</sup>/alvéolo), la que informa el tamaño medio de un alvéolo.

$$A (\%) = \frac{\text{área de alveolado}}{\text{área de la rodaja recortada}} \times 100 \quad (8)$$

### 3.6.1. Procesamiento digital de imágenes

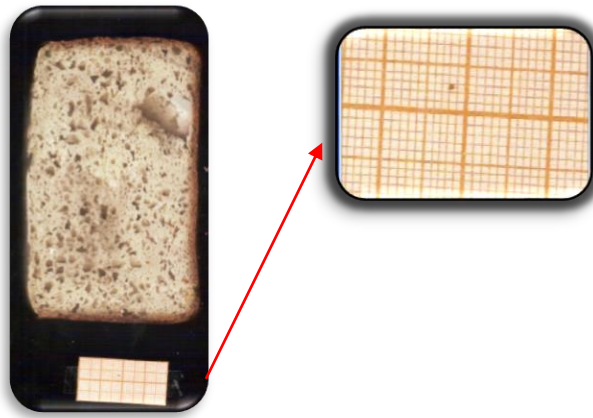
Las imágenes capturadas en formato JPEG se procesaron mediante el siguiente procedimiento:

- Se abrió la imagen seleccionando la opción File > Open: 1.jpg. (Figura 3.5).




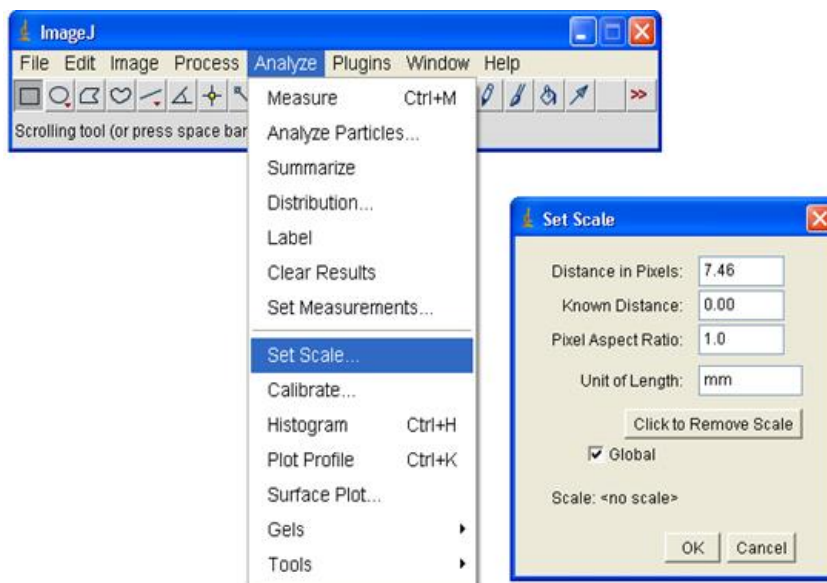
**Figura 3.5.** Selección de la imagen.

- Se hizo zoom seleccionando la opción Image > Zoom > Set > Zoom (%): 200 (Figura 3.6).



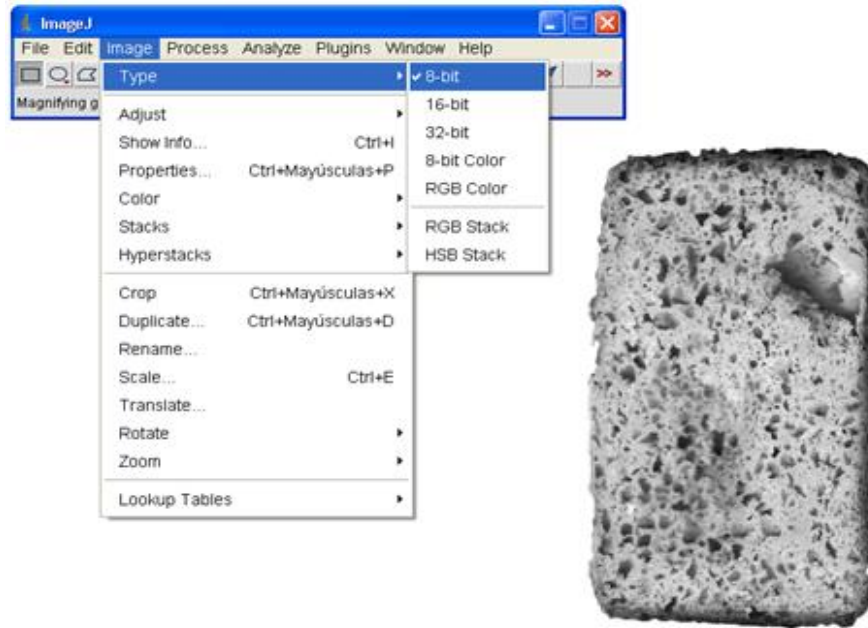
**Figura 3.6.** Selección de la escala (píxeles/mm).

- Calibración. Como se indica en la Figura 3.7, con la línea recta (  ) se seleccionó la distancia entre dos marcas. Se eligió la opción Analyze > Set Scale.



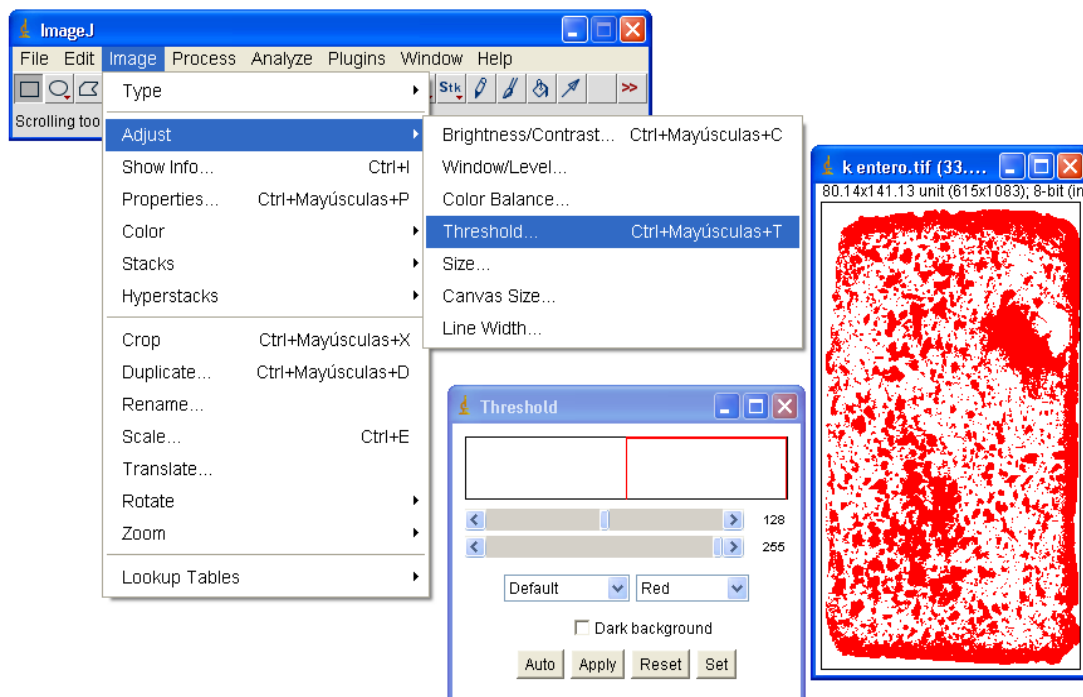
**Figura 3.7.** Calibración para el recuento de alvéolos (píxeles/mm).

- Se transformó la imagen RGB color en escala de grises mediante el comando Image > Type > 8-bit (Figura 3.8).



**Figura 3.8.** Conversión de la rodaja de pan a escala de gris (8 bit).

- Selección del contraste. Se modificó la imagen en escala de grises con los comandos Image > Adjust > Threshold (Figura 3.9), delimitando de forma automática los alvéolos con la opción Default, obteniéndose imágenes en escala binaria (blanco y negro) como se muestra en la Figura 3.10.



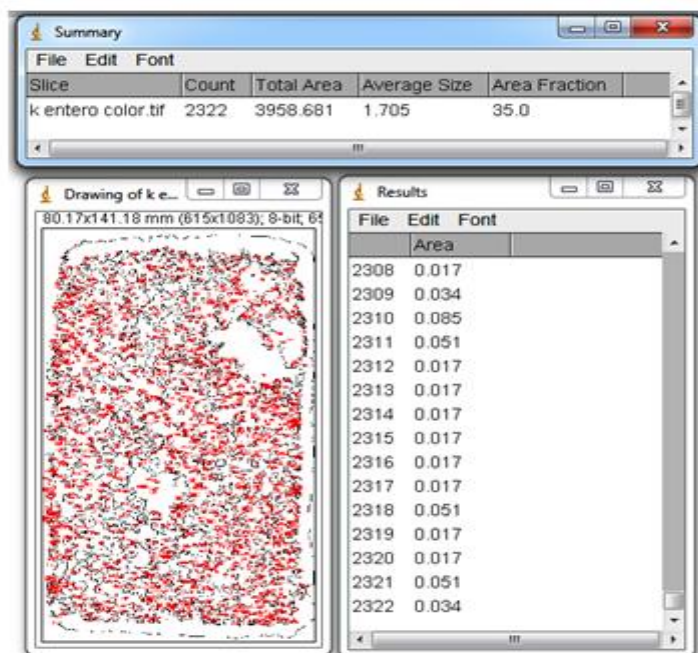
**Figura 3.9.** Selección del contraste.



**Figura 3.10.** Imagen de la rodaja de pan binarizada.

Convertidas todas las imágenes se realizó un análisis exploratorio (Figura 3.11).

- Se eligió la opción Área del menú Analyze > Set Measurements; y finalmente se procedió al recuento de los alvéolos, la determinación del área alveolar y de la superficie recortada de la rodaja mediante el comando Analyze > Analyze Particles; y las opciones Display Results (mostrar los resultados) y Show Outlines (mostrar contornos).



**Figura 3.11.** Análisis exploratorio del recuento de los alvéolos.

### **3.7. Análisis estadístico**

Las diferencias significativas entre los parámetros característicos de las muestras fueron determinadas por análisis de varianza simple (ANOVA), utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion versión XVI (Statistical graphics Corporation, EE. UU.), comparando las medias por el test de mínima diferencia significativa de Fisher (LSD), con un nivel de confianza del 95 %.

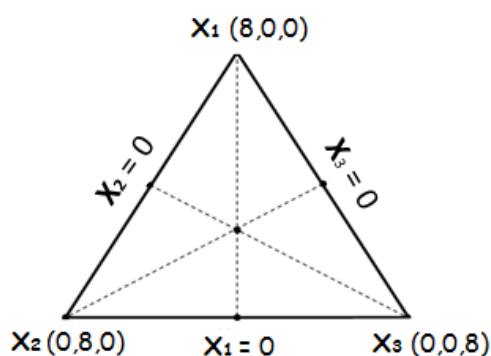
Además, se aplicó el análisis multivariado basándose en la matriz de correlación de Pearson, para establecer posibles relaciones (lineales) entre los diferentes atributos evaluados. Esta matriz contiene los coeficientes de correlación ( $r$ ), los cuales varían entre -1 y 1, y los valores del estadístico que da cuenta del nivel de significación ( $p$ -valor). Una correlación positiva sugiere que dos variables se modifican en la misma dirección, mientras que una negativa sugiere que ellas varían en direcciones opuestas. Variables estadísticamente independientes presentan coeficientes de correlación de cero. Asimismo, los valores de  $p$  inferiores a 0,05 indican una correlación estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95 %.

### **3.8. Diseño de mezclas**

Se adoptó el diseño centroide simplex, para analizar el posible efecto sinérgico o antagónico de las combinaciones ternarias de los sustitutos de gluten, en panes elaborados a partir de la formulación básica (Diseño I) o a partir de la formulación con reemplazo parcial de la harina nativa por la harina gelatinizada (Diseño II). Cabe aclarar que en ambos casos se fijó la cantidad total de sustitutos de gluten utilizada. Sin embargo, en el Diseño I la suma de ingredientes funcionales fue de 8 g; mientras que, en el Diseño II la misma fue de 4 g. Estos valores impuestos limitan la región experimental de los sustitutos de gluten seleccionados, obteniéndose un diseño de mezclas con restricciones.

#### **3.8.1. Diseño I**

Los siete puntos correspondientes al diseño de mezclas se exhiben en la Figura 3.12, en términos de la masa (en gramos) de cada sustituto del gluten.



**Figura 3.12.** Diseño centroide simplex de los sustitutos de gluten empleados en la elaboración de panes con la formulación básica.

La Tabla 3.5 muestra la composición de cada combinación de los sustitutos de gluten, calculadas a partir del diseño experimental, en las que el contenido de agua (400 ml), de todas las mezclas, fue constante.

**Tabla 3.5.** Diseño de mezclas para la evaluación del efecto sinérgico/antagónico de tres componentes seleccionados ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ ), en panes sin gluten elaborados a partir de la formulación básica.

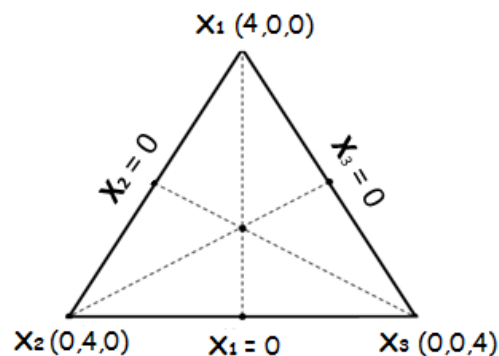
Mezclas	Ingredientes (g)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	8	0	0
2	0	0	8
3	0	8	0
4	4	0	4
5*	2,67	2,67	2,67
6	0	4	4
7	4	4	0

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

### 3.8.2. Diseño II

Este diseño se aplicó en panes elaborados a partir de la formulación óptima con sustitución parcial de la harina nativa por la harina gelatinizada. Los siete puntos correspondientes al diseño de mezclas se muestran en la Figura 3.13, en términos de la masa (en gramos) de cada sustituto del gluten. La Tabla 3.6 presenta la composición

de las mezclas calculada a partir del diseño experimental, en las que el contenido de agua de todas las mezclas fue constante y correspondiente al óptimo.



**Figura 3.13.** Diseño centroide simplex de los sustitutos de gluten empleados en la elaboración de panes, con mezclas de harina nativa y harina gelatinizada

**Tabla 3.6.** Diseño de mezclas para la evaluación del efecto sinérgico/antagónico de tres componentes seleccionados ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ ) en panes sin gluten elaborados con una mezcla de harina nativa y harina gelatinizada.

Mezclas	Ingredientes (g)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	4	0	0
2	0	0	4
3	0	4	0
4	2	0	2
5*	1,33	1,33	1,33
6	0	2	2
7	2	2	0

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

### 3.8.3. Análisis del diseño de mezclas

El objetivo en el problema de mezclas es encontrar un modelo que permita pronosticar el valor de la variable dependiente ( $Y$ ), en función de sus componentes; esto se puede realizar ajustando los modelos de experimentos con mezclas propuestos por Scheffé (1958), los cuales se detallan a continuación:

Modelo lineal 
$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \tag{9}$$

Modelo cuadrático 
$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (10)$$

Modelo cúbico especial 
$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum \sum \sum_{i < j < k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (11)$$

Donde  $Y$  es la variable respuesta,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$ , y  $\beta_{ijk}$  son los coeficientes de las variables de la mezcla en el modelo de regresión y  $x_i$ ,  $x_j$ ,  $x_k$  son las concentraciones de cada componente en la mezcla. EL ajuste del modelo se realizó mediante análisis de regresión, determinándose el nivel de significación de cada uno de los coeficientes. Las diferencias entre los valores experimentales y los predichos se consideraron significativas cuando el nivel de confianza fue del 95 % ( $p < 0,05$ ).

Se empleó el programa Statgraphics Centurion versión XVI (Statistical graphics Corporation, EE. UU.), para obtener el diseño y realizar el análisis estadístico.

### 3.9. Reología de la masa

Las propiedades viscoelásticas de la masa se determinaron mediante ensayos oscilatorios realizados en un reómetro Paar Physica Rheolab Rheometer, modelo MCR 300 (Anton Paar, Austria) de esfuerzo controlado, provisto de un sistema de platos planos paralelos, de 3 cm de diámetro separados por una distancia de 1 mm, entre los cuales se colocó 10 gramos de la masa. La temperatura del plato inferior fue controlada por un sistema Peltier y un baño termostatzado (Viscotherm VT2, Paar Physica).

Para evitar la deshidratación de la muestra y la adherencia de esta al sistema de platos, se sellaron los bordes con aceite de silicona (viscosidad: 290-310 mPa.s, Biopack, Argentina). Como medida adicional para prevenir la evaporación del agua, se utilizó un aro de acrílico transparente con tapas.

#### 3.9.1. Preparación de la masa

Las masas se obtuvieron en un horno eléctrico (ATMA HP4040, Argentina), donde se realizó el amasado de los ingredientes secos junto con los líquidos a 31 rpm, sin el agregado de leudante (azúcar y levadura) ni la correspondiente fracción de agua (16



ml). Se seleccionó el programa N° 8 (tiempo de duración 1:30 h), dado que permite obtener las masas evitando la etapa de cocción.

### **3.9.2. Ensayo de barrido de deformación**

Este ensayo se realizó con el propósito de establecer la región viscoelástica lineal (RVL). Para ello se evaluaron las distintas mezclas de masas para pan, correspondientes a los diseños de mezclas experimentales. Se efectuó un barrido de amplitud entre 0,1 - 100 % a frecuencia (1 Hz) y temperatura (25 °C) constantes.

### **3.9.3. Barridos dinámicos oscilatorios de frecuencia (método dinámico)**

Se ejecutó a 25 °C dentro de la región viscoelástica lineal, determinada previamente para cada masa de pan. El barrido se efectuó variándose la frecuencia angular entre 1 - 100 Hz.

El espectro mecánico que se obtiene brinda información acerca del comportamiento viscoelástico, registrándose los módulos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ), así como la tangente del ángulo de desfase ( $\text{Tan } \delta = G''/G'$ ).

### **3.9.4. Prueba deformación - relajación (ensayo de Creep-Recovery)**

Los ensayos de deformación se hicieron aplicando una tensión de corte ( $\tau$ ) constante de 10 Pa, en la región viscoelástica lineal, durante 60 segundos. En la fase de relajación, la tensión se retiró (0 Pa) y la muestra se dejó reposar durante 100 segundos. Cada ensayo se realizó por duplicado. El carácter viscoelástico se describe en términos de capacitancia elástica o complianza ( $J$ , Pa<sup>-1</sup>), que es la relación entre la deformación lograda ( $\gamma$ ) y la tensión aplicada (Stanley y col., 1996).

$$J(t) = \gamma(t) / \tau \quad (12)$$

Donde  $\gamma$  es la deformación lograda y  $\tau$  es el esfuerzo constante aplicado.

### 3.10. Análisis adicionales de los panes óptimos

#### 3.10.1. Determinación del color de la corteza

El color de la costra del pan se midió en ocho lugares diferentes, mediante el uso de un espectrocolorímetro modelo CM 508-d (Minolta Co., Osaka, Japón) previa normalización con una placa de calibración blanca ( $L^* = 96,9$ ;  $a^* = -117,04$ ;  $b^* = 1,84$ ). Se usó el iluminante C ( $x = 0,310$ ;  $y = 0,316$ ). El color fue ilustrado usando el sistema CIE- $L^* a^* b^*$ , donde  $L^*$  define la luminosidad que se mide de 0 a 100;  $a^*$  define el componente rojo-verde, rojo para valores positivos y verde para valores negativos; y  $b^*$  define el componente amarillo-azul, amarillo para valores positivos y azul para valores negativos. Los colores son más saturados cuanto más separados se encuentran del centro del gráfico que se muestra en la Figura 3.14.

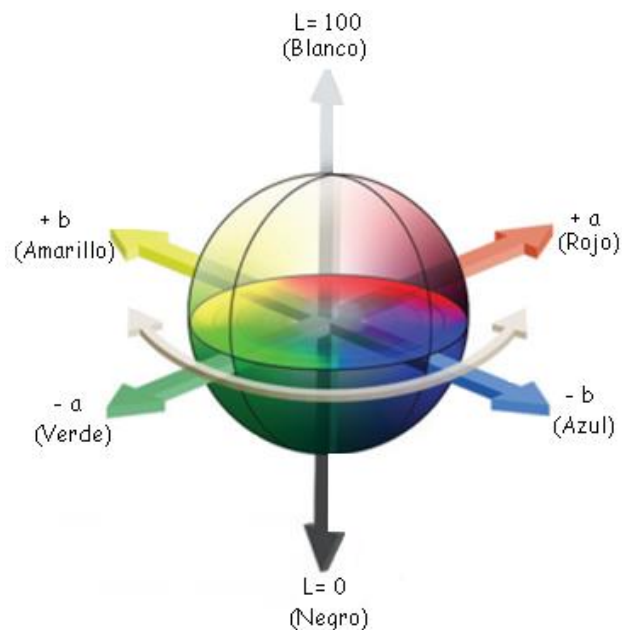


Figura 3.14. Diagrama del espacio de color CIELAB. Fuente: LaCIE (n.d.).

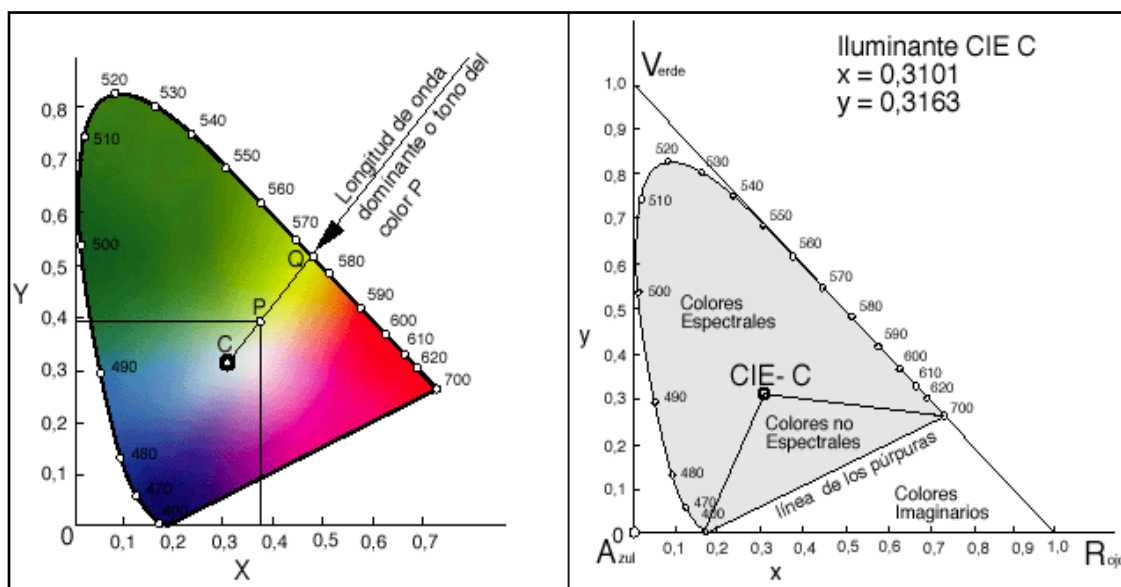
Adicionalmente las coordenadas cilíndricas utilizadas son: el croma o saturación ( $C^*$ ) y el tono o ángulo de tono ( $h^*$ ), definidas por las siguientes ecuaciones:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (13)$$

$$h^* = \arctan(b^*/a^*) \quad (14)$$

El ángulo de tono es el ángulo de los puntos calculados a partir de las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  del espacio de color CIELAB. El croma es el componente cuantitativo del color, el cual refleja la pureza del color en el sistema CIELAB.

A su vez, las coordenadas triestímulo ( $X, Y, Z$ ) y cromáticas ( $x, y$ ) fueron obtenidas sobre la base de los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ; utilizándose el programa CIE color calculator (Lindbloom, 2012). A partir de las coordenadas cromáticas y del iluminante, empleando el diagrama de cromaticidad, se consiguió la longitud de onda dominante, como se visualiza en la Figura 3.15.



**Figura 3.15.** Diagrama de cromaticidad CIE ( $L^*a^*b^*$ ).

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid (n.d.).

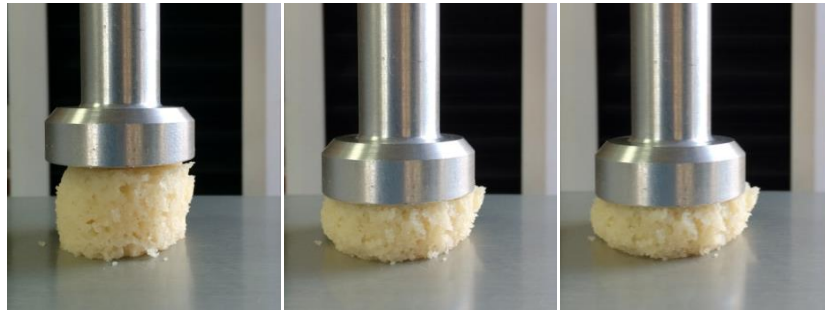
### 3.10.2. Contenido de humedad de la miga

El contenido de humedad de las migas de pan se determinó con el método estándar 44-15 de la AACC (2000), el cual se basa en colocar, por triplicado, aproximadamente 8 g (base húmeda) de muestra en una estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  hasta masa constante.

### 3.10.3. Análisis del perfil de textura (TPA) de la miga

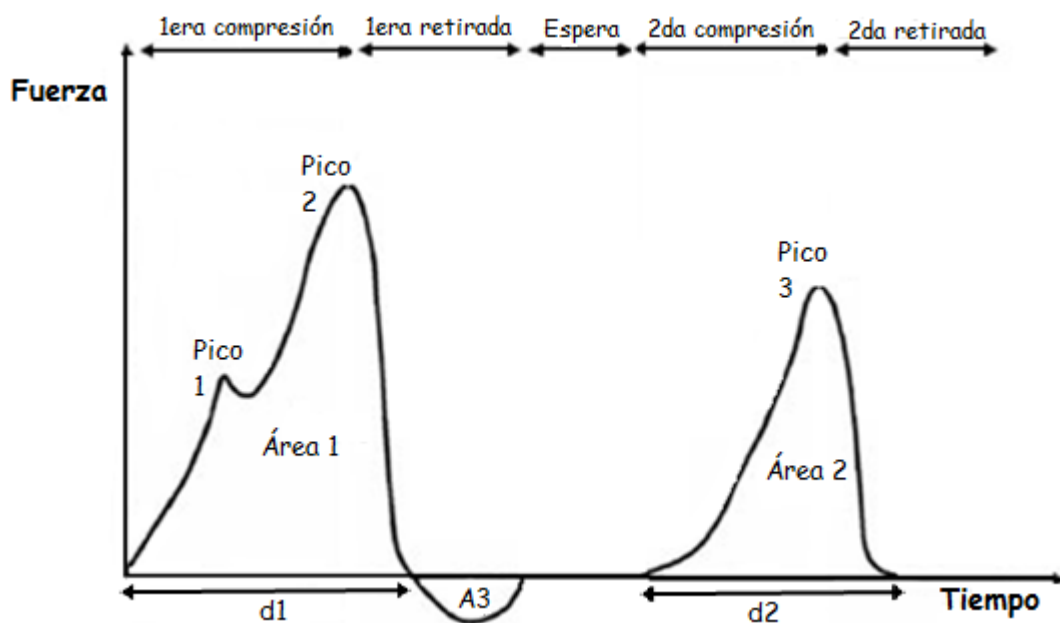
El pan se almacenó herméticamente a temperatura ambiente por 24 horas y luego se evaluó mediante una máquina universal de textura (Instron 3345, Norwood, EE. UU.), controlado por el programa Bluehill 2 (Instron, Norwood, EE. UU.). Previamente se eliminó la costra del pan y con un sacabocado se cortó la miga en cilindros de 30 mm

de diámetro y 20 mm de espesor. El ensayo comprendió dos compresiones sucesivas, que simularon el proceso de masticación, con un tiempo de espera de 10 segundos entre compresión. La miga de pan se colocó en el centro de la placa de medición y fue comprimida hasta un 50 % de su espesor original, en cada uno de los ciclos, utilizando una probeta cilíndrica (35 mm de diámetro) a una velocidad de 1 mm/s (Figura 3.16).



**Figura 3.16.** Compresión de la miga del pan en texturómetro Instron.

La respuesta del ensayo de TPA se registró en una curva tiempo-fuerza, obteniéndose entre 20 y 25 réplicas para cada muestra. La Figura 3.17 muestra un perfil de textura típico, en el cual se señalan las variables usadas para la estimación de los parámetros texturales estudiados.



**Figura 3.17.** Perfil de textura obtenido con el texturómetro Instron.

Fuente: adaptado de (1978).

A continuación se define cada uno de los parámetros característicos (Bourne, 1978):

- *Fracturabilidad*, corresponde a la fuerza necesaria para la primera rotura (pico 1).
- *Dureza* o también llamada *firmeza*, es el valor de la fuerza máxima obtenida durante el primer ciclo de compresión (pico 2). La fuerza máxima que se observa durante la segunda compresión (pico 3) está asociada a la dureza de la segunda compresión.
- *Adhesividad*, corresponde al área de la curva situada bajo el eje de la abscisa (fuerza negativa), es el trabajo necesario para despegar el producto de la placa de compresión ( $A_3$ ).
- *Cohesividad*, mide la fuerza de los enlaces internos del producto, se obtiene como el cociente entre el área del segundo pico y el área del primer pico ( $A_2/A_1$ ).
- *Elasticidad*, altura que el material recupera durante el tiempo que transcurre entre el final de la primera compresión y el comienzo de la segunda. Estandarizada con la distancia inicial de la muestra ( $d_2/d_1$ ).
- *Gomosidad*, es el producto entre la dureza y la cohesividad.
- *Masticabilidad*, es el producto entre la gomosidad y la elasticidad.

## 4. Resultados y Discusión

*"Nunca desistas de un sueño. Solo trata de ver las señales que te lleven a él."*

Paulo Coelho.

#### 4.1. Caracterización de las harinas de arroz

Se determinó la humedad y distribución de tamaño de partícula (DTP) de las diferentes harinas, así como también sus propiedades térmicas y de hidratación.

##### 4.1.1. Contenido de humedad

La humedad es un parámetro de gran importancia para la industria alimentaria, especialmente en el caso de los cereales. La cantidad de agua presente en la harina, como humedad, no juega el mismo rol que el agua añadida durante la elaboración de la masa. Dos masas con igual porcentaje de agua, pero distinto origen, podrían no tener propiedades similares (Doescher y col., 1987).

La Tabla 4.1 muestra el contenido de humedad de las harinas de arroz comerciales: Santa María (SM), Kapac (K) y Señor de Sipan (SP); de la harina modificada por molienda de alto impacto (HM 550) y de la harina gelatinizada (GE).

**Tabla 4.1.** Humedad de las harinas de arroz: comerciales, modificada y gelatinizada determinada por el método de la AOAC (2000).

Harina	Humedad (%)
SM	11,66 ± 0,08 <sup>c</sup>
K	11,09 ± 0,06 <sup>b</sup>
SP	11,22 ± 0,16 <sup>b</sup>
HM 550	10,62 ± 0,03 <sup>a</sup>
GE	12,23 ± 0,06 <sup>d</sup>

SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min, GE: Harina gelatinizada. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

Los porcentajes de humedad variaron entre 10,62 - 12,23 %, siendo estos porcentajes para HM 550 y GE, respectivamente. Las harinas K y SP no presentaron diferencias significativas. A su vez, los porcentajes de humedad de las harinas fueron similares a las harinas utilizadas por otros investigadores (Cornejo y Rosell, 2015; Magaña y col., 2011).

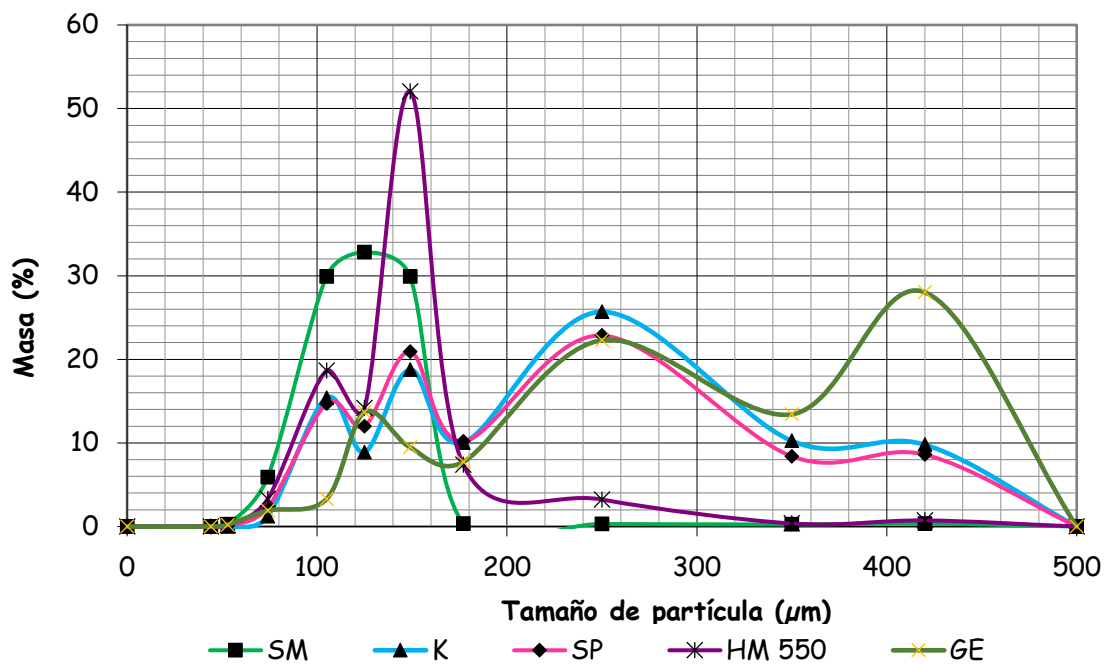
## 4.1.2. Distribución de tamaño de partícula

### 4.1.2.1. Tamizado

El tamizado es un método comúnmente utilizado para la separación de sistemas particulados de acuerdo con su tamaño. El sistema consiste en la oscilación sincronizada de una serie de tamices, colocados de forma tal que los tamaños de apertura descienden en la misma dirección en la que el material se mueve.

La importancia del estudio de la granulometría se relaciona con las propiedades de la harina, tales como densidad aparente y capacidad de absorción de agua, así como también las características sensoriales: aspecto, sabor y textura (López y col., 1996).

En la Figura 4.1 se muestra la distribución de tamaño de partícula de las harinas de arroz: comerciales (SM, K y SP), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).



**Figura 4.1.** Distribución de tamaño de partícula en masa de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).

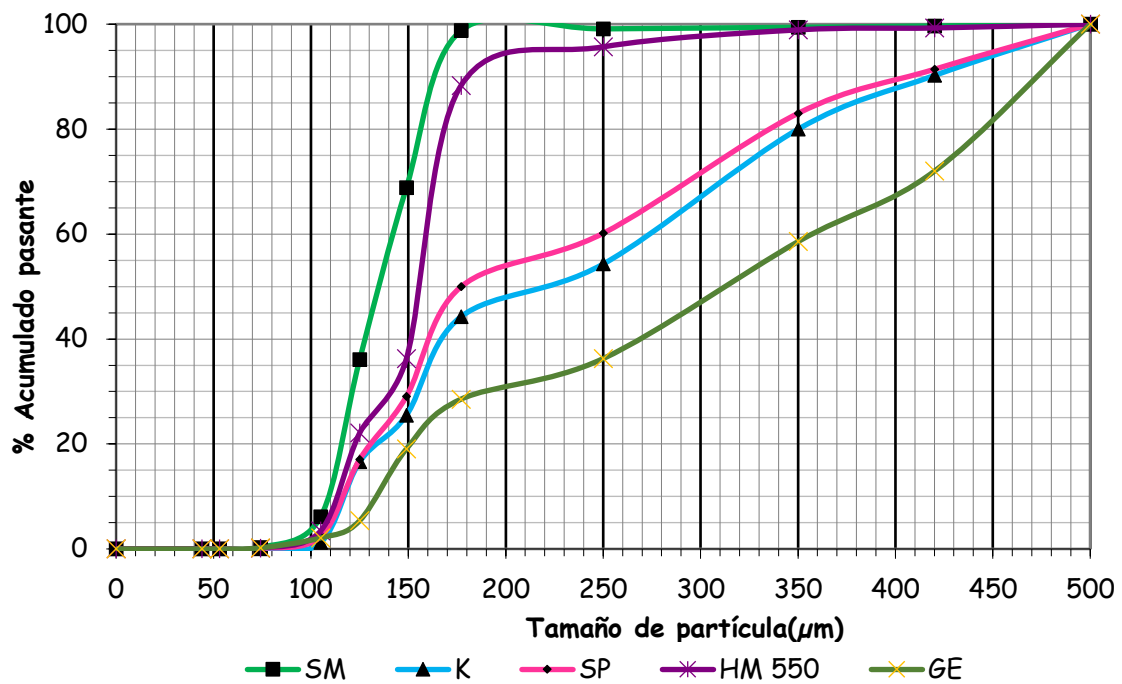
Las muestras K y SP exhibieron una distribución multimodal similar, con máximos en 105 µm, 150 µm, 250 µm, y 420 µm; así mismo la harina GE presentó una distribución multimodal, con modas en 125 µm, 250 µm y 420 µm, siendo esta última en mayor proporción en relación con las obtenidas para K y SP. En cambio, la harina SM



presentó una distribución monomodal, extendiéndose entre 53  $\mu\text{m}$  y 177  $\mu\text{m}$  con un pico en 125  $\mu\text{m}$ ; mientras que la distribución de HM 550 fue bimodal, con la primera moda (149  $\mu\text{m}$ ) más significativa que la segunda (53  $\mu\text{m}$ ).

A su vez, la distribución de tamaño de partícula de K y de SP fue similar a la de las harinas utilizadas por Sánchez y colaboradores (1999), para la elaboración de pan sin gluten, las cuales también presentaron distribuciones multimodales.

A partir de la distribución acumulada de cada una de las muestras (Figura 4.2) se obtuvieron los parámetros característicos (D10, D50 y D90) y el índice de dispersión de la distribución de tamaño de partícula (ID), el cual es indicativo de mayor homogeneidad a medida que disminuye su valor como puede apreciarse en la Tabla 4.2.



**Figura 4.2.** Distribución acumulada del tamaño de partícula acumulativa en masa de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).

Las muestras SM y HM 550 presentaron una menor granulometría, como lo indican los menores valores de la mediana (D50) en relación con GE, SP y K. Asimismo, estas tres últimas muestras fueron más heterogéneas y por lo tanto las curvas de distribución acumulada correspondientes muestran un apartamiento del perfil sigmoideo característico.

**Tabla 4.2.** Parámetros característicos de la distribución de tamaño de partícula de las harinas de arroz determinados por tamizado.

Harina	D10 ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )	ID
SM	109 <sup>a</sup>	135 <sup>a</sup>	163 <sup>a</sup>	0,40 <sup>a</sup>
K	117 <sup>a</sup>	220 <sup>c</sup>	418 <sup>b</sup>	1,37 <sup>c</sup>
SP	116 <sup>a</sup>	177 <sup>b</sup>	406 <sup>b</sup>	1,64 <sup>d</sup>
HM 550	114 <sup>a</sup>	156 <sup>ab</sup>	182 <sup>a</sup>	0,43 <sup>a</sup>
GE	134 <sup>b</sup>	313 <sup>c</sup>	473 <sup>c</sup>	1,08 <sup>b</sup>

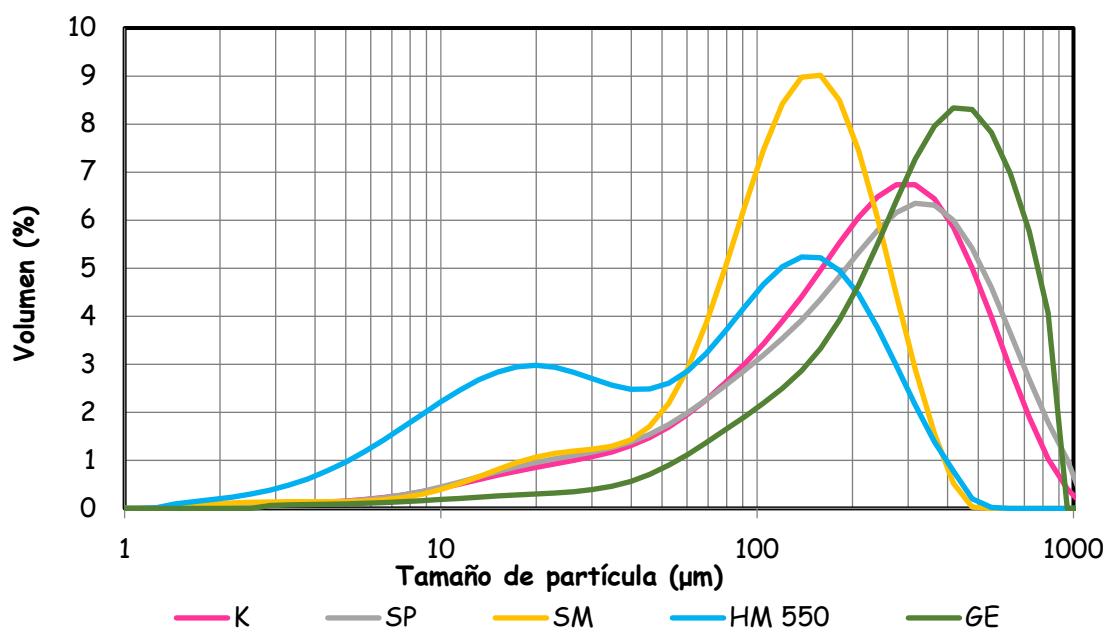
SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min, GE: Harina gelatinizada. D10, D50 y D90: diámetros de partícula correspondientes a la masa acumulada al 10 %, 50 % y 90 % respectivamente. ID: índice de dispersión. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

#### 4.1.2.2. Difracción láser

La técnica de difracción laser (Low Angle Laser Light Scattering) se fundamenta en la relación inversamente proporcional entre el ángulo de difracción y el tamaño de la partícula. Este método emplea la teoría de MIE, la cual permite transformar los datos de medida de las distribuciones de intensidad a medida en volumen, en un rango de entre 0,02  $\mu\text{m}$  y 2000  $\mu\text{m}$  (Rawle, n.d.).

Se obtiene así, una distribución de tamaño de partícula en volumen junto con sus parámetros característicos: mediana (Dv50) e índice de dispersión de la población en volumen (IDv).

En la Figura 4.3 se muestran las distribuciones de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz comerciales (SM, K y SP); de la harina modificada (HM 550) y de la harina gelatinizada (GE). La muestra HM 550 manifestó una distribución bimodal con máximos en 20  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ . Mientras que SM, K, SP y GE exhibieron un único pico en 160  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$  y 417  $\mu\text{m}$ , respectivamente.



**Figura 4.3.** Distribución de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).

En la Tabla 4.3 se visualizan los parámetros característicos (Dv10, Dv50 y Dv90) y el índice de dispersión (IDv) de la distribución de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz. A partir de la mediana (Dv50) y del IDv se estableció que las muestras con mayor granulometría y homogeneidad fueron SM, K, SP y GE, mientras que HM 550 se manifestó con menor granulometría y homogeneidad.

**Tabla 4.3.** Parámetros característicos de la distribución de tamaño de partícula en volumen de las harinas de arroz.

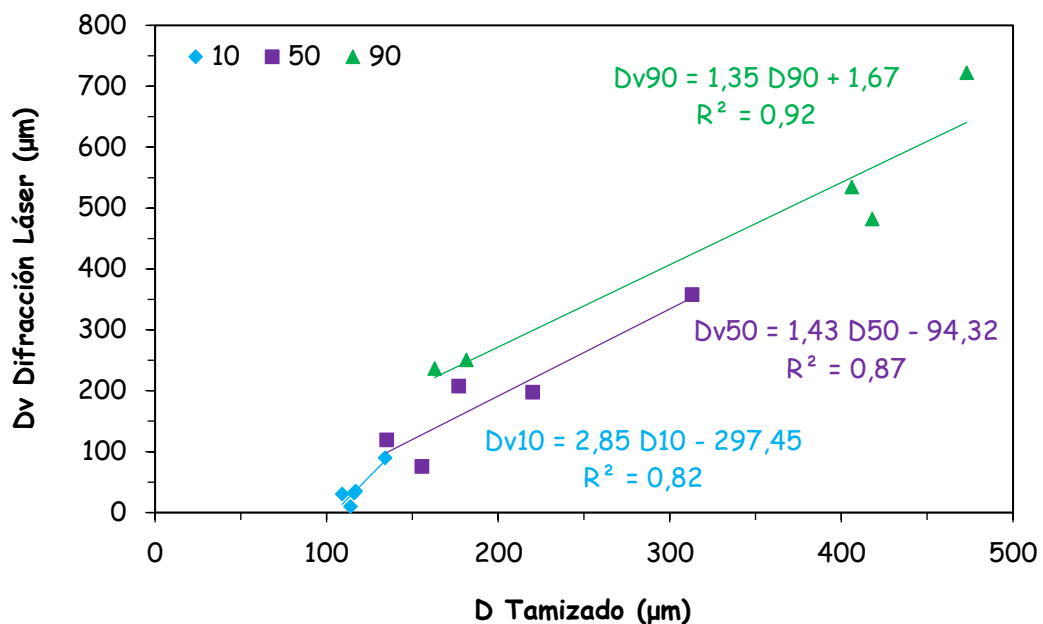
Harina	Dv10 (µm)	Dv50 (µm)	Dv90 (µm)	IDv
SM	30,4 ± 0,9 <sup>b</sup>	119,2 ± 1,4 <sup>b</sup>	236,6 ± 2,0 <sup>a</sup>	1,73 ± 0,05 <sup>a</sup>
K	35,0 ± 1,2 <sup>d</sup>	197,6 ± 1,5 <sup>c</sup>	482,0 ± 4,9 <sup>c</sup>	2,26 ± 0,03 <sup>b</sup>
SP	32,1 ± 1,1 <sup>c</sup>	207,7 ± 4,2 <sup>d</sup>	534,6 ± 5,5 <sup>d</sup>	2,42 ± 0,07 <sup>c</sup>
HM 550	9,7 ± 0,1 <sup>a</sup>	75,4 ± 1,8 <sup>a</sup>	250,7 ± 1,9 <sup>b</sup>	3,20 ± 0,09 <sup>d</sup>
GE	89,6 ± 0,9 <sup>e</sup>	358,1 ± 7,0 <sup>e</sup>	722,0 ± 8,5 <sup>e</sup>	1,77 ± 0,02 <sup>a</sup>

SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min. GE: Harina gelatinizada. Dv10, Dv50 y Dv90: diámetros de partícula correspondientes al volumen acumulado al 10 %, 50 % y 90 % respectivamente. IDv: índice de dispersión en volumen. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

El equipo proporcionó también el área superficial específica (ASE) de cada harina. Se obtuvieron los siguientes valores de ASE para SM (0,111 m<sup>2</sup>/g), SP (0,090 m<sup>2</sup>/g), K (0,088 m<sup>2</sup>/g), GE (0,042 m<sup>2</sup>/g) y HM 550 (0,181 m<sup>2</sup>/g). Como se tenía previsto, el área específica resultó inversamente proporcional al tamaño de la partícula (Dv50, Tabla 4.3).

#### 4.1.2.3. Tamizado versus Difracción láser

Finalmente se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por difracción láser y por tamizado. En las Figura 4.4 y Figura 4.5 puede apreciarse que, si bien los resultados no son equivalentes, existen relaciones lineales entre los diferentes parámetros de las distribuciones de tamaño de partícula.

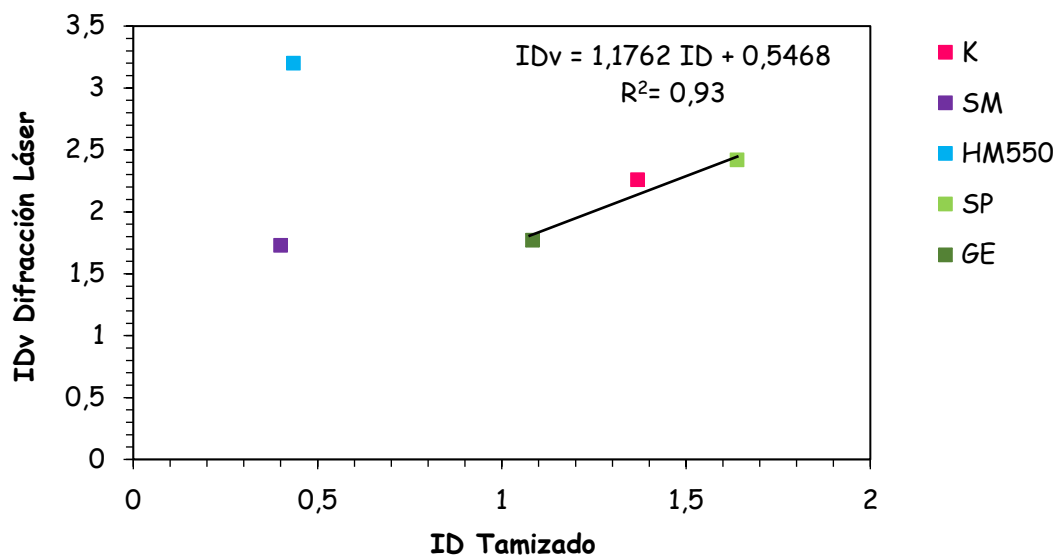


**Figura 4.4.** Relación entre los diámetros característicos de las distribuciones de tamaño de partícula obtenidas por tamizado (D) y por difracción láser (Dv).

Es claro que en los casos de los diámetros correspondientes al 10 % y al 50 % de la población, los valores obtenidos por difracción láser (Dv10 y Dv50) resultaron significativamente menores a los obtenidos por tamizado (D10 y D50). El efecto desaglomerante de la dispersión húmeda es particularmente efectivo en el rango de menor tamaño, donde la solvatación ocurre muy rápidamente y dificulta la aglomeración. En contraste, los valores pertenecientes al 90 % de la población

obtenidos por difracción láser (Dv90) resultaron mayores a los de tamizado (D90). En el caso del método por difracción láser, el área proyectada de la partícula es influida por su orientación, por lo cual los resultados podrían eventualmente ser mayores (Rodríguez y Uriarte, 2009).

En lo que respecta al índice de dispersión también se ha encontrado una relación lineal entre los resultados de ambos métodos (Figura 4.5), con la excepción de las harinas de menor granulometría (SM y HM 550). Probablemente, debido a que solo por difracción láser pudo detectarse en estos casos fracciones de menor tamaño, las cuales fueron imperceptibles por el método de tamizado.



**Figura 4.5.** Relación entre los índices de dispersión de las distribuciones de tamaño de partícula obtenidas por tamizado (ID) y por difracción láser (IDv).

#### 4.1.3. Propiedades térmicas (DSC)

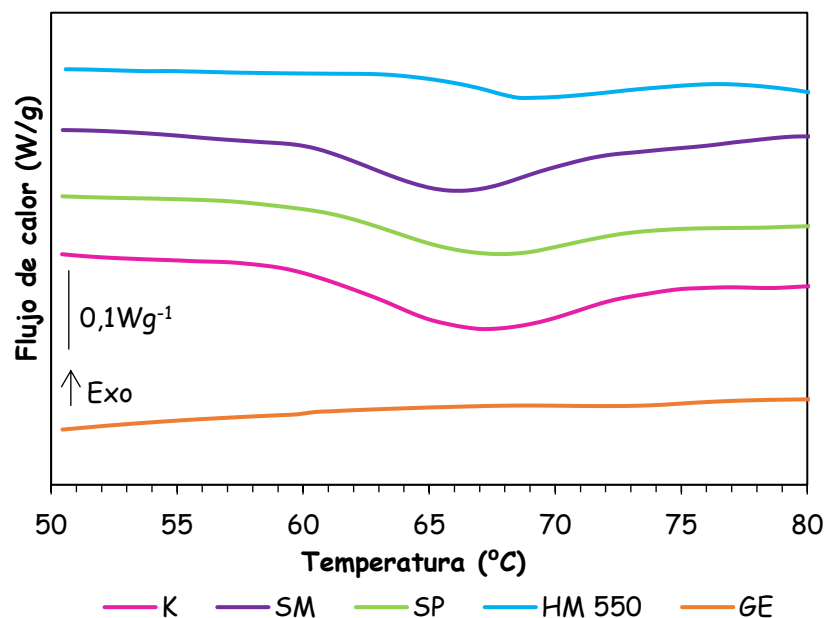
El almidón está compuesto por dos biopolímeros diferentes en su estructura: la amilosa y la amilopectina, con zonas cristalinas y amorfas (Rooney y Huang, 2001).

Conceptos modernos consideran al gránulo de almidón como un polímero vítreo hasta que supera la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), lo que conlleva la pérdida de la organización molecular, por acción del calentamiento, y se vuelve gomoso. Con calentamiento adicional y en presencia de agua, el gránulo de almidón alcanza su temperatura de gelatinización y pierde su organización estructural irreversiblemente (Rooney y Huang, 2001).

Las harinas se distinguen por el contenido de amilosa, el cual determina la temperatura de gelatinización y las propiedades viscoelásticas (Fan y Marks, 1998; Singh y col., 2000; Meadows, 2002; Saif y col., 2003). Las temperaturas de gelatinización se pueden clasificar en: *bajas*, harinas con temperatura de gelatinización por debajo de 70 °C; *intermedias*, aquellas con temperatura entre 70 °C y 75 °C; y *altas*, aquellas con temperaturas por encima de 75 °C. Un almidón con alta relación amilosa / amilopectina necesitará mayor energía térmica para gelatinizar (Huang y col, 1994).

Esta transformación hidrotérmica del almidón es de gran importancia en muchas operaciones de procesamiento de alimentos. Por ejemplo, en la elaboración del pan, la gelatinización del almidón ocurre durante la etapa de cocción y contribuye a producir la textura deseada (Franco y Wenzel de Menezes, 2006).

En el presente trabajo, se determinaron las propiedades térmicas ( $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_e$  y  $\Delta H$ ) de las harinas de arroz por calorimetría diferencial de barrido (DSC). La Figura 4.6 presenta los termogramas obtenidos de las harinas de arroz: comerciales (SM, K y SP), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).



**Figura 4.6.** Termogramas de las harinas de arroz: comerciales (SM, Santa María; K, Kapac; SP, Señor de Sipan), modificada (HM 550) y gelatinizada (GE).

Las harinas comerciales y la harina modificada exhibieron termogramas con una sola transición endotérmica, con una temperatura de pico comprendida entre 64 °C y 69 °C. Estos valores son similares a los informados por Picón (2014), para harina de arroz de grano largo.

Por otra parte, Las harinas estudiadas presentaron entalpías de gelatinización ( $\Delta H$ ) comprendidas entre 0 J/g y 6,15 J/g (Tabla 4.4). La ausencia del pico endotérmico ( $\Delta H = 0$  J/g) en la harina GE confirma la gelatinización completa, como era previsible para esta harina proveniente de un arroz tratada hidrotérmicamente.

**Tabla 4.4.** Parámetros característicos de las propiedades térmicas de las harinas de arroz.

Harina	To (°C)	Tp (°C)	Te (°C)	$\Delta H$ (J/g, b.s.)
SM	61,83 ± 0,5 <sup>b</sup>	64,76 ± 0,1 <sup>a</sup>	71,99 ± 0,3 <sup>a</sup>	4,78 ± 0,2 <sup>c</sup>
K	60,09 ± 0,2 <sup>a</sup>	67,56 ± 0,4 <sup>c</sup>	71,67 ± 0,3 <sup>a</sup>	6,15 ± 0,3 <sup>d</sup>
SP	62,74 ± 0,4 <sup>bc</sup>	66,41 ± 0,2 <sup>b</sup>	73,39 ± 0,5 <sup>b</sup>	3,95 ± 0,1 <sup>b</sup>
HM 550	63,07 ± 0,4 <sup>c</sup>	69,36 ± 0,5 <sup>d</sup>	75,08 ± 0,8 <sup>c</sup>	1,48 ± 0,3 <sup>a</sup>
GE	-	-	-	-

SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min, GE: Harina gelatinizada. No detectado: -. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

La muestra HM 550 presentó una entalpía de gelatinización significativamente menor en relación con las harinas comerciales. Este resultado puede atribuirse al daño termo-mecánico asociado a la molienda de alto impacto (Loubes y Tolaba, 2014).

En cuanto al resto de las harinas, los valores de entalpía encontrados contrastan con los hallados por Sandoval y colaboradores (2005), para harina de mandioca (13,8 J/g) y para harina de maíz (5,3 J/g). Esto confirma el efecto del tamaño del gránulo y el origen del almidón sobre las propiedades térmicas del mismo.

Si bien SP y K fueron similares en cuanto a la granulometría (sección 4.1.2.1), presentaron diferente comportamiento térmico. La muestra K evidenció una entalpía de gelatinización mayor que SP, lo que implicaría un menor daño termo-mecánico ocasionado durante la molienda.

La muestra K presentó además la menor temperatura de inicio de gelatinización ( $T_0$ ) en comparación con las otras harinas comerciales. Si bien no se conoce el proceso de molienda de las harinas comerciales (método de molienda y tipo de molino), ni la variedad de arroz empleada, estos resultados sugieren que la temperatura de inicio de gelatinización podría estar afectada por el tratamiento de molienda. De hecho, los estudios de Wannerberger y Eliasson (1993) concluyeron que el proceso de molienda afectaba la proporción entre las regiones cristalinas y amorfas del grano de almidón ocasionando variaciones, en la temperatura de inicio de la gelatinización, asociadas a la severidad del tratamiento sobre el gránulo de almidón.

#### **4.1.4. Propiedades de hidratación**

El índice de absorción de agua (IAA) y el poder de hinchamiento (PH) se utilizan para medir la capacidad de retención de agua que presenta el almidón después de algún tratamiento (Ruales y col., 1993). La capacidad de absorción de agua de las harinas a temperatura ambiente influye directamente en el proceso de elaboración de los alimentos ya que, dependiendo de esta propiedad, las harinas pueden proporcionar consistencia, adhesión y viscosidad en productos cárnicos, masa y salsas, entre otros (McWatters, 1983). Además, el poder de hinchamiento del almidón se vincula a la relación amilosa/amilopectina, puesto que las moléculas de agua quedan atrapadas en la estructura de la amilopectina (Bello-Pérez y col., 1998). Durante la gelatinización, el gránulo de almidón se hincha, sufre ruptura y simultáneamente libera al exterior la amilosa, formando una red tridimensional (Karim y col., 2000). A su vez, el índice de solubilidad en agua (ISA) mide el grado de degradación del almidón en el proceso de extrusión o de otros procesos de transformación de interés para la industria alimentaria (Ding y col., 2005).

Con el propósito de evaluar las propiedades de hidratación en frío, se determinó a 30 °C el índice de absorción en agua (IAA), el índice de solubilidad (ISA) y el poder de hinchamiento (PH) de las harinas de arroz comerciales, de la harina de arroz modificada y de la harina gelatinizada (Tabla 4.5).



**Tabla 4.5.** Propiedades de hidratación de las harinas de arroz.

Harina	IAA (g/g, b.s.)	ISA (%)	PH (g/g, b.s.)
SM	2,99 ± 0,02 <sup>b</sup>	2,54 ± 0,04 <sup>b</sup>	3,42 ± 0,03 <sup>b</sup>
K	2,43 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,21 ± 0,05 <sup>a</sup>	2,89 ± 0,06 <sup>a</sup>
SP	2,52 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,34 ± 0,03 <sup>a</sup>	2,72 ± 0,03 <sup>a</sup>
HM 550	3,39 ± 0,01 <sup>c</sup>	2,80 ± 0,04 <sup>c</sup>	4,62 ± 0,15 <sup>c</sup>
GE	4,39 ± 0,03 <sup>d</sup>	2,75 ± 0,02 <sup>d</sup>	5,42 ± 0,02 <sup>d</sup>

SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min, GE: Harina gelatinizada. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

El IAA de la harina gelatinizada (GE) fue de  $4,39 \pm 0,03$  g/g (b.s.), resultando considerablemente mayor a los valores obtenidos para las otras harinas. La harina modificada por molienda de alto impacto presentó un valor intermedio ( $3,39 \pm 0,01$  g/g, b.s.) y las harinas comerciales mostraron los menores valores comprendidos entre 2,43 y 2,99 g/g (b.s.).

Estos resultados señalan que el IAA puede incrementarse según el grado de daño en el almidón, causado por la gelatinización del almidón (Colonna y col., 1989) o por la molienda de alto impacto (Loubes y Tolaba, 2014). Del mismo modo, otros investigadores manifestaron que el arroz, al ser sometido a un proceso de molienda de alta energía, presenta mayor capacidad de hidratación en agua, lo que podría señalar la degradación de la estructura molecular del almidón, principal constituyente de la harina de arroz (Tran y col., 2011; Zhang y col., 2010).

El índice de solubilidad en agua de la harina modificada fue, al igual que el índice de absorción, significativamente mayor que los valores correspondientes a las harinas de arroz comerciales. Así mismo, el poder de hinchamiento para HM 550 duplicó los valores de las harinas comerciales K y SP ( $4,62 \pm 0,15$  g/g, b.s. en contraste con  $2,72 \pm 0,03$  g/g, b.s. y  $2,89 \pm 0,06$  g/g, b.s., correspondientemente).

Se debe destacar que las harinas K y SP, las cuales mostraron similares distribuciones de tamaño de partícula, no presentaron diferencias significativas en las propiedades de hidratación. Esta correspondencia entre el tamaño de partícula y las propiedades de hidratación también fue señalada por De la Hera y colaboradores

(2013). Estos autores encontraron que la hidratación de la harina de arroz se incrementaba al reducir el tamaño de partícula de la misma.

## 4.2. Efecto de la granulometría en la calidad del pan de molde

En esta sección se determinó el efecto de la granulometría de la harina en la calidad del pan, evaluada en términos de volumen y alveolado del pan de molde.

### 4.2.1. Volumen del pan de molde

El volumen es uno de los parámetros más importantes al evaluar la calidad de los panes, ya que influye fuertemente en la preferencia de los consumidores. Por lo tanto, es deseable maximizar el tamaño del pan durante el proceso de cocción (Krupa y col., 2010).

La Figura 4.7 muestra los panes elaborados a partir de las harinas de arroz de diversa granulometría. El pan de molde obtenido con la harina K exhibió el mayor volumen (Tabla 4.6) seguido de SP, mientras que SM y HM 550 evidenciaron un menor volumen y manifestaron además una base irregular.



Figura 4.7. Panes elaborados con harinas de arroz de diferente granulometría.

Estos resultados indican que la mayor heterogeneidad y el mayor tamaño de partícula, como poseen las harinas comerciales Kapac y Señor de Sipan en relación con Santa María y HM 550, favorecen la obtención de volúmenes de pan más elevados.

Otros autores también han señalado la importancia de la granulometría de la harina en relación con el volumen del pan (Sánchez y col., 1999; Martínez, 2012).

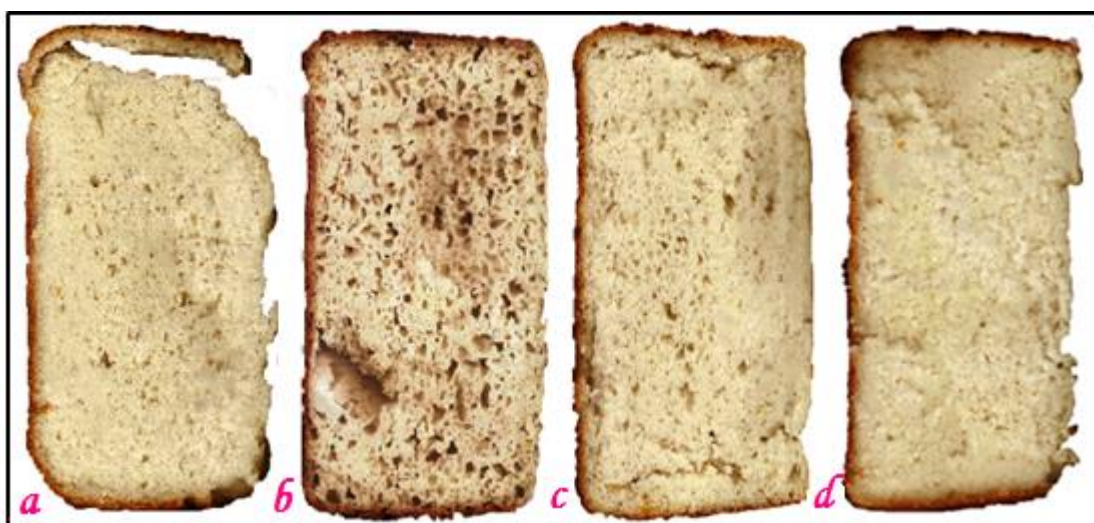
**Tabla 4.6.** Volumen del pan de molde en función de la harina empleada.

Muestra	Volumen (ml)
SM	1098 ± 55 <sup>ab</sup>
K	1362 ± 68 <sup>c</sup>
SP	1332 ± 67 <sup>bc</sup>
HM 550	1037 ± 52 <sup>a</sup>

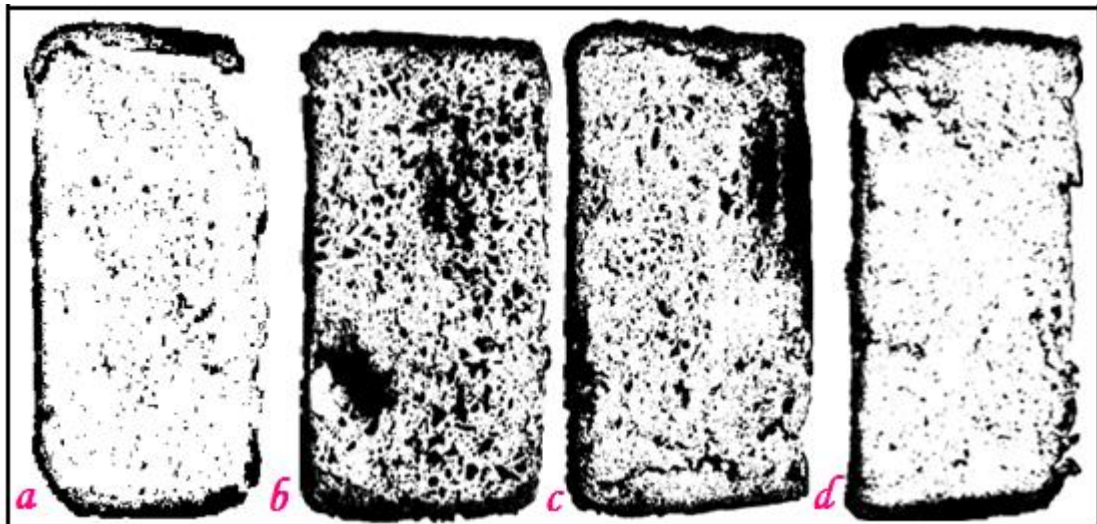
SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

#### 4.2.2. Medición del alveolado del pan

Las rodajas de pan, escaneadas para el análisis de imágenes (Figura 4.8), correspondientes a las harinas K y SP revelaron una cantidad de alvéolos más elevada que las obtenidas a partir de SM y HM 550. Esto también se observó en las imágenes binarizadas correspondientes, las cuales se presentan en la Figura 4.9.



**Figura 4.8.** Rodajas de pan seleccionadas para el análisis de imágenes. A) Santa María, B) Kapac, C) Señor de Sipan, D) Harina molida 550 rpm-40 min.



**Figura 4.9.** Rodajas de pan binarizadas para el análisis de imágenes. A) Santa María, B) Kapac, C) Señor de Sipan, D) Harina molida 550 rpm-40 min.

Mediante el análisis de imágenes se determinaron los porcentajes del área alveolar de las rodajas (Tabla 4.7), estos valores reflejaron que la muestra K tuvo el mayor porcentaje seguido de SP, en contraste, SM y HM 550 no presentaron diferencias significativas y ambas fueron considerablemente inferiores a las anteriormente mencionadas.

**Tabla 4.7.** Porcentaje del área alveolar de los panes, obtenido mediante análisis de imágenes.

<b>Muestra</b>	<b>A (%)</b>
SM	8,1 ± 0,4 <sup>a</sup>
K	33,4 ± 1,5 <sup>c</sup>
SP	19,4 ± 1,5 <sup>b</sup>
HM 550	8,1 ± 1,3 <sup>a</sup>

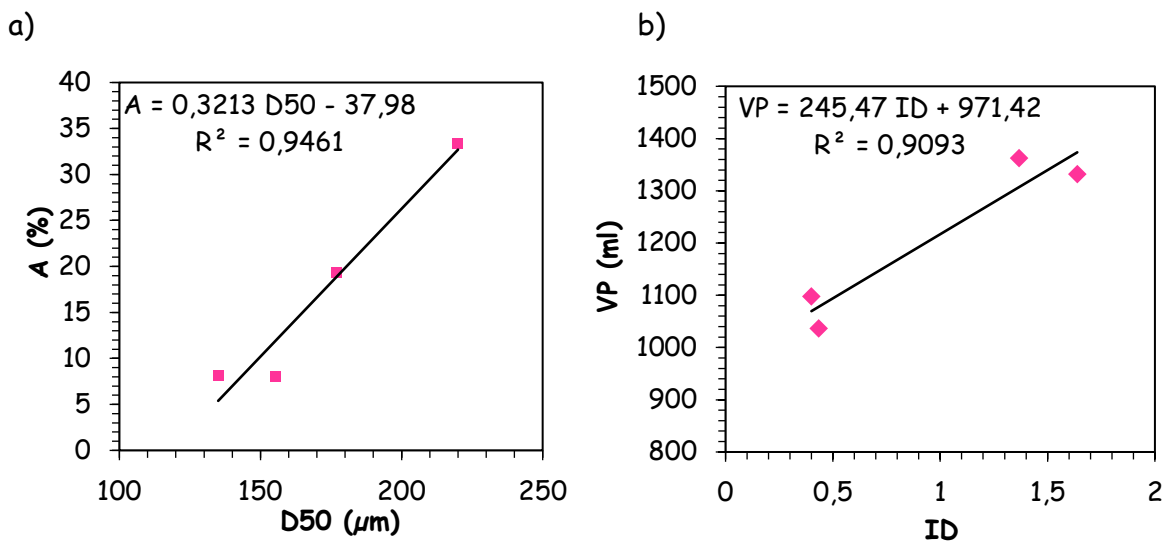
SM: Santa María, K: Kapac; SP: Señor de Sipan, HM 550: Harina molida 550 rpm-40 min.  
 A: porcentaje del área alveolar. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

De acuerdo con el análisis del efecto de la granulometría sobre el volumen y el alveolado del pan, puede concluirse que la harina comercial Kapac (K) es la más apta para la elaboración de un pan de molde de calidad satisfactoria. Por lo tanto, esta

harina fue seleccionada para elaborar todos los panes de molde que se presentan a partir de la sección 4.3.

#### 4.2.3. Correlaciones entre la granulometría de la harina y los atributos del pan

Con el propósito de explicar el efecto de la granulometría sobre la calidad panadera, se determinaron las correlaciones empleando la matriz de Pearson. Se identificaron correlaciones significativas y positivas entre: el volumen del pan y el índice de dispersión de la distribución de tamaño de partícula obtenida por tamizado (VP-ID,  $r = 0,95$ ;  $p < 0,05$ ) y, el porcentaje del área alveolar y la mediana de la distribución de tamaño de partícula obtenida por tamizado (A-D50,  $r = 0,97$ ;  $p < 0,03$ ). En la Figura 4.10 se representa la relación lineal encontrada entre el porcentaje del área alveolar y la mediana de la DTP; y la relación entre el volumen del pan y el índice de dispersión de la DTP.



**Figura 4.10.** Relaciones entre: a) el área alveolar (A) y la mediana de la distribución de tamaño de partícula (D50), b) el volumen del pan (VP) y el índice de dispersión de la distribución de tamaño de partícula (ID).

Para el rango experimental evaluado, el análisis de correlaciones señala que:

- el alveolado del pan mejora al incrementar la granulometría de la harina;
- el aumento del volumen del pan es favorecido por el uso de harina con una amplia distribución del tamaño de partícula. Como la harina Kapac presenta

ambas características favorables, estos resultados corroboran la aptitud de esta harina para elaborar pan de molde de calidad.

### 4.3. Efecto de la sustitución de la harina nativa por gelatinizada en la calidad del pan

En esta sección se analizó la aptitud de la harina de arroz gelatinizada (GE), empleándose con este propósito diferentes grados de sustitución de la harina nativa seleccionada (harina comercial Kapac).

#### 4.3.1. Volumen del pan

Se realizó un ensayo preliminar en el cual se modificó el total de la harina de arroz (Kapac) en la formulación básica de la sección 3.3.1, sustituyéndose con una mezcla de harinas nativa y gelatinizada (50 % Kapac y 50 % harina gelatinizada) para la que se empleó la cantidad de agua señalada en dicha formulación (no se modificó, 400 ml). Como resultado se obtuvo un pan muy compacto y defectuoso (Figura 4.11), debido a la alta viscosidad de la masa, la cual afectó el correcto funcionamiento del horno eléctrico principalmente en las etapas de mezclado y amasado.



**Figura 4.11.** Panes de molde: Kapac (100 %) y mezcla de harinas Kapac-gelatinizada (50-50 %), sin variar el volumen del agua en la formulación (400 ml).

El volumen del pan obtenido con la mezcla de harina nativa y gelatinizada (50-50 %), sin variar el volumen de agua en la formulación (pan defectuoso), fue de  $881 \pm 44$  ml, valor que resultó significativamente inferior al obtenido usando exclusivamente la harina nativa ( $1362 \pm 68$  ml).

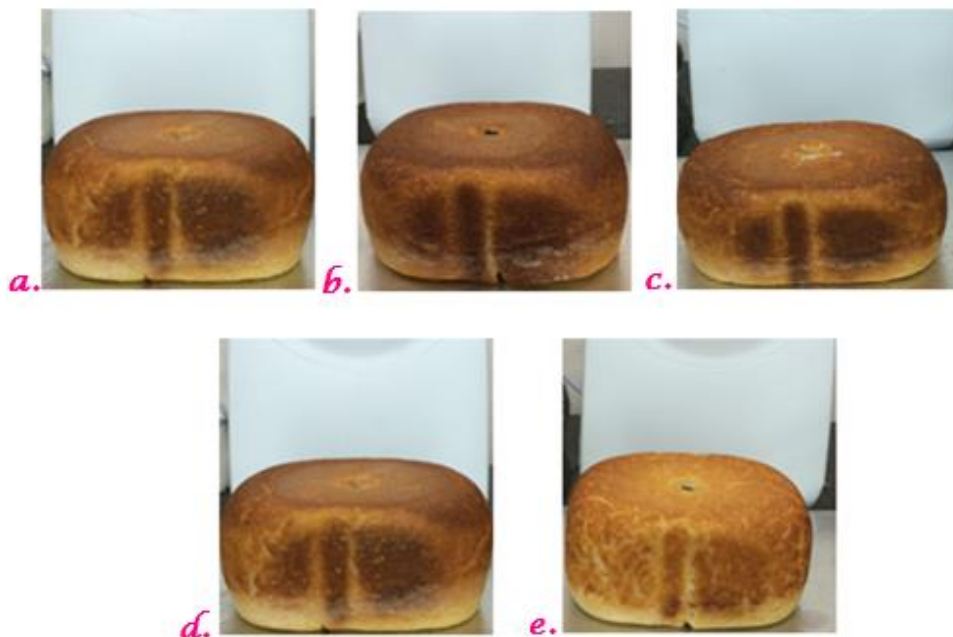


La obtención de este pan compacto, que no presentó alvéolos, se atribuyó a la insuficiente cantidad de agua empleada en la formulación. La mayor capacidad de hidratación de la harina gelatinizada (Tabla 4.5 de la sección 4.1.4) demostró la necesidad de realizar una serie de ensayos previos, para ajustar la cantidad de agua en cada mezcla.

El criterio fue obtener para la mezcla de harinas (nativa + gelatinizada) y agua, la misma consistencia que se adquirió con la mezcla de harina nativa y agua (0 % de sustitución).

Consecutivamente, se prepararon cuatro panes, a base de mezclas de harina nativa y gelatinizada (grado de sustitución: 12,5 %, 25 %, 37,5 % y 50 %), agregando las cantidades de agua mencionadas previamente en la sección 3.3.2 (Tabla 3.3).

La Figura 4.12 muestra los panes obtenidos empleando la harina gelatinizada en diferentes proporciones, donde puede visualizarse que el aspecto de los panes resultó satisfactorio.



**Figura 4.12.** Panes elaborados con diferente porcentaje de harina gelatinizada:  
a) 0 %, b) 12,5 %, c) 25 %, d) 37,5 %, e) 50 %.

En particular, se observó una mejora significativa en la apariencia del pan obtenido con 50 % de harina gelatinizada, al ajustar correctamente la cantidad de agua (750 ml en lugar de 400 ml), si bien este pan resultó menos tostado que los otros.

La Tabla 4.8 muestra los valores del volumen de los panes elaborados con diferentes porcentajes de harina gelatinizada. Esta tabla manifiesta que el volumen tiende a aumentar al incrementar el porcentaje de harina gelatinizada. Cabe aclarar que no se informó el volumen específico (volumen/masa), para no distorsionar los resultados, dado que varía la cantidad de agua y por ende la masa del pan según la proporción de harina gelatinizada en la mezcla.

En particular, se puede percibir un incremento significativo del volumen del pan al aumentar el porcentaje de harina gelatinizada. Sin embargo, cuando el porcentaje de harina gelatinizado fue mayor o igual a 37,5 %, el pan presentó zonas de cocción incompleta (cruda) y no se obtuvo una coloración aceptable (tostado) en la superficie. Entre las mezclas de menor contenido de harina gelatinizada, la correspondiente a 12,5 % mostró mejor apariencia y una cantidad de masa total más compatible con la capacidad del horno eléctrico utilizado.

**Tabla 4.8.** Volumen del pan en función del grado de sustitución de la harina nativa en la mezcla.

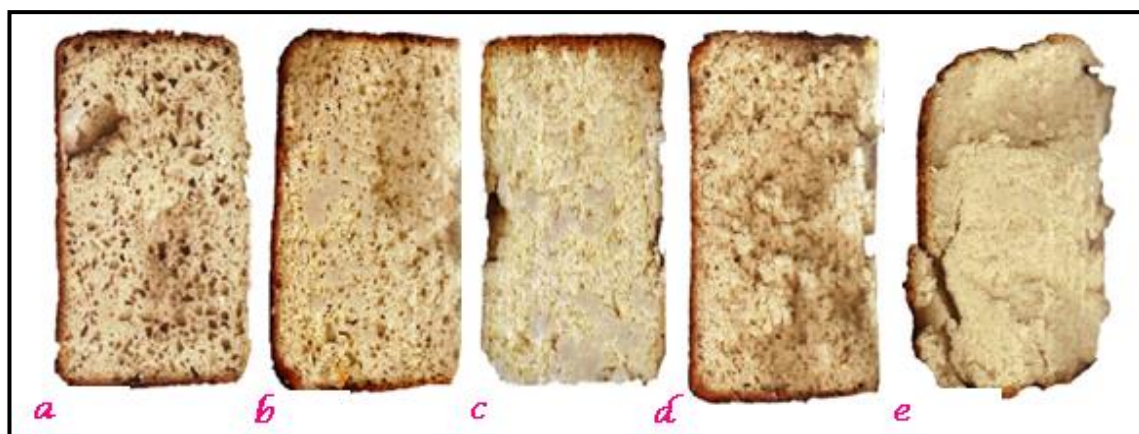
Sustitución* (%)	Volumen (ml)
0	1362 ± 68 <sup>a</sup>
12,5	1397 ± 70 <sup>ab</sup>
25	1340 ± 67 <sup>a</sup>
37,5	1563 ± 78 <sup>bc</sup>
50	1721 ± 86 <sup>c</sup>

\*Porcentaje de la harina nativa sustituida por harina gelatinizada.

Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

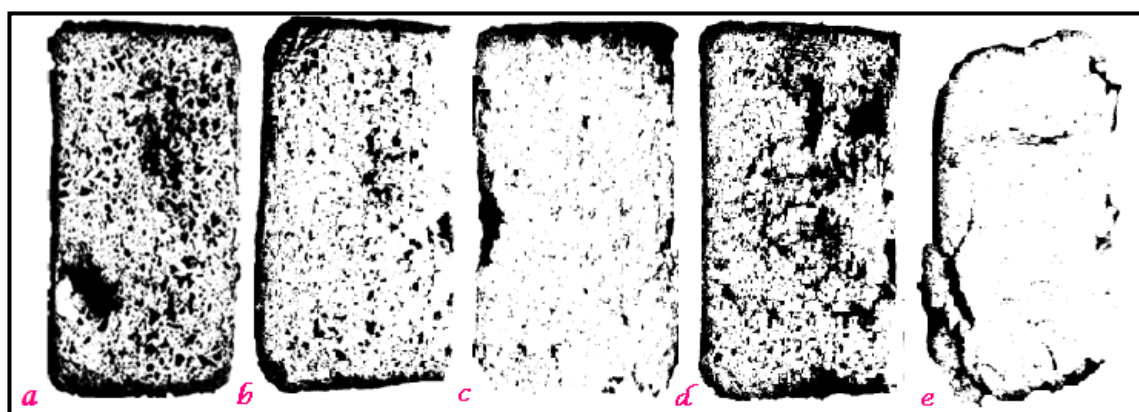
#### 4.3.2. Medición del alveolado del pan

En la Figura 4.13 se exponen las imágenes escaneadas de las rodajas de panes obtenidos con diferentes porcentajes de harina gelatinizada. Un grado de sustitución correspondiente al 12,5 % y al 37,5 % de harina gelatinizada (GE) manifestó un alveolado similar al de la formulación con 0 % de GE. La rodaja correspondiente al 25 % de GE presentó menor cantidad de alvéolos que el control, mientras que la rodaja con 50 % de GE mostró ausencia de alvéolos y cierta deformación (irregularidades).



**Figura 4.13.** Imágenes escaneadas de las rodajas de pan en función del porcentaje de harina gelatinizada en la mezcla. a) 0 %, b) 12,5 %, c) 25 %, d) 37,5 % y e) 50 %.

Las mismas observaciones se reflejan en las imágenes binarizadas (Figura 4.14), las cuales se obtuvieron a partir de las imágenes escaneadas mediante su procesamiento digital.



**Figura 4.14.** Imágenes binarias de las rodajas de pan en función del porcentaje de harina gelatinizada en la mezcla. a) 0 %, b) 12,5 %, c) 25 %, d) 37,5 % y e) 50 %.

Finalmente se calculó el área alveolar ( $A$ , %) a partir de las imágenes binarias, utilizando el programa ImageJ. En la Tabla 4.9 se aprecia que a medida que aumenta la cantidad de harina gelatinizada en la formulación, disminuye significativamente el porcentaje del área alveolar, siendo entre 35 % y 76 % menor a la del pan sin sustitución. Los menores descensos del área alveolar, respecto a la formulación básica (0 % de sustitución), se observaron en los panes obtenidos con 37,5 % y 12,5 % de

harina gelatinizada. No obstante, el correspondiente a 12,5 % mostró un alveolado más uniforme.

**Tabla 4.9.** Porcentaje del área alveolar de los panes, en función del grado de sustitución de la harina nativa, obtenido mediante análisis de imágenes.

Sustitución* (%)	A (%)
0	33,4 ± 1,52 <sup>d</sup>
12,5	19,3 ± 0,93 <sup>c</sup>
25	15,2 ± 1,04 <sup>b</sup>
37,5	21,8 ± 2,09 <sup>c</sup>
50	8,1 ± 0,93 <sup>a</sup>

\*Porcentaje de harina nativa sustituida por harina gelatinizada. A: porcentaje del área alveolar. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

De los resultados obtenidos se concluye que 12,5 % es el porcentaje de harina gelatinizada más conveniente, dado que proporciona:

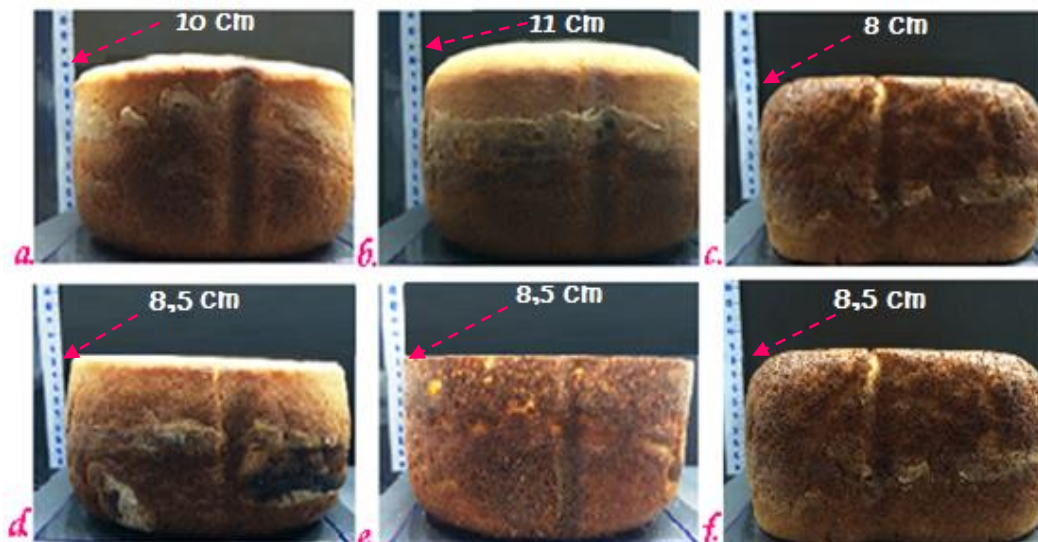
- a) una masa total compatible con la capacidad del horno eléctrico;
- b) un volumen de pan aceptable;
- c) un pan sin irregularidades de forma, perfectamente cocido y homogéneo, con coloración y apariencia satisfactoria;
- d) buen porcentaje del área alveolar y alveolado uniforme.

#### 4.4. Selección de los sustitutos del gluten para el diseño de mezclas

En esta sección se evaluó la aptitud de diferentes sustitutos del gluten para la elaboración de los panes de molde, sobre la base de la harina nativa seleccionada previamente en la sección 4.2 (harina comercial Kapac).

##### 4.4.1. Volumen del pan

La Figura 4.15 muestra los panes de molde elaborados con harina de arroz nativa y los diferentes sustitutos de gluten estudiados, así como también el pan obtenido en ausencia de sustituto utilizando una mezcla en la que se reemplazó parcialmente la harina nativa por harina de arroz gelatinizada (grado de sustitución: 12,5 %).



**Figura 4.15.** Efecto de diferentes sustitutos del gluten en la apariencia del pan. a) goma xántica, b) goma guar, c) alginato de sodio, d) goma espina corona, e) hidroxipropilmetilcelulosa, f) harina de arroz gelatinizada (12,5 %).

Todos los panes presentaron un aspecto aceptable a excepción del obtenido con hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), el cual presentó colapso de la superficie en el centro (no visible en la imagen), una costra dura y una miga disgregable.

Cabe indicar que el pan elaborado con la goma guar presentó la mayor altura (11 cm), seguido del correspondiente a la goma xántica (10 cm). La menor altura del pan se obtuvo utilizando alginato de sodio (27 % menor al pan elaborado con goma guar).

Los panes elaborados con goma espina corona (EC), HPMC o en ausencia de sustituto con harina de arroz gelatinizada (GE 12,5 %), mostraron valores similares de volumen. En comparación con la formulación adoptada como control (sustituto de gluten goma xántica, GX), el volumen obtenido con alginato de sodio (AL) evidenció una disminución mientras que el pan elaborado usando goma guar (GG) presentó un aumento significativo ( $p < 0,05$ ) del 13 % (Tabla 4.10). No obstante, a excepción de AL, todos los panes de molde manifestaron valores equivalentes o superiores al control obtenido con goma xántica (GX); el cual es un hidrocoloide que tradicionalmente se emplea en la producción de alimentos panificados aptos para celíacos (Arendt y Moore, 2007).

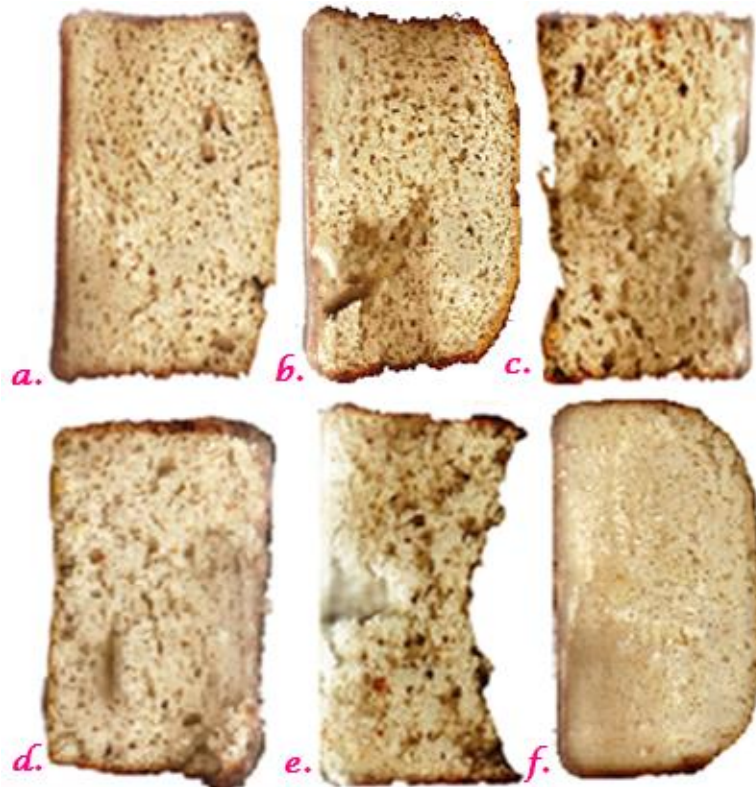
**Tabla 4.10.** Efecto de diferentes sustitutos del gluten sobre el volumen del pan de molde.

Sustituto del gluten	Volumen (ml)
GX	1304 ± 65 <sup>b</sup>
GG	1474 ± 74 <sup>c</sup>
AL	1173 ± 59 <sup>a</sup>
EC	1312 ± 66 <sup>b</sup>
HPMC	1294 ± 65 <sup>b</sup>
GE (12,5 %)	1269 ± 63 <sup>ab</sup>

GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio; EC: goma espina corona; HPMC: hidroxipropilmetilcelulosa; GE: harina de arroz gelatinizada 12,5 %. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

#### 4.4.2. Medición del alveolado del pan

La Figura 4.16 exhibe la sección transversal de los panes de molde elaborados con harina de arroz nativa y los diferentes sustitutos de gluten estudiados, así como también la del pan obtenido con reemplazo parcial de la harina nativa por harina de arroz gelatinizada, en ausencia de sustituto.



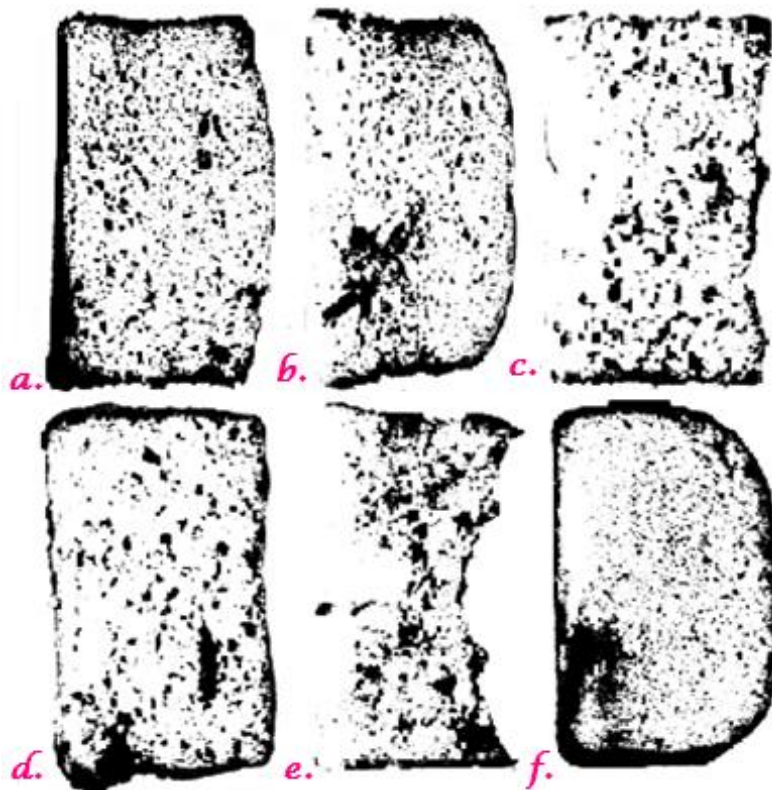
**Figura 4.16.** Sección transversal de panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten: a) goma xántica, GX; b) goma guar, GG; c) alginato de sodio, AL; d) goma espina corona, EC; e) hidroxipropilmetilcelulosa, HPMC; f) harina de arroz gelatinizada 12,5 %, GE.

Se puede observar que la formulación con HPMC proporcionó una estructura con cierto grado de colapso (Figura 4.16.e). Este fenómeno, posiblemente debido a una estructura más débil de la masa, se reflejó también en la apariencia de la superficie del pan de molde, la cual se mostró un tanto deformada.

Cabe señalar que los panes elaborados con goma xántica, goma guar y harina gelatinizada mostraron una buena apariencia de las rodajas (Figura 4.16 a, b y f, respectivamente).

Mediante el análisis de las imágenes binarizadas correspondientes a las secciones transversales (Figura 4.17) se determinaron los parámetros característicos del alveolado de los diferentes panes.

En la Tabla 4.11 se muestran los valores del porcentaje del área alveolar ( $A$ , %), del área alveolar promedio ( $\text{mm}^2/\text{alvéolo}$ ) y de la densidad alveolar ( $\text{alvéolos}/\text{cm}^2$ ).



**Figura 4.17.** Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos del gluten: a) goma xántica, GX; b) goma guar, GG; c) alginato de sodio, AL; d) goma espina corona, EC; e) hidroxipropilmetilcelulosa, HPMC; f) harina de arroz gelatinizada 12,5 %, GE.

**Tabla 4.11.** Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde en función del sustituto de gluten usado.

Sustituto del gluten	A (%)	Área alveolar promedio (mm <sup>2</sup> /alvéolo)	Densidad alveolar (alvéolos/cm <sup>2</sup> )
GX	26,0 ± 1,5 <sup>e</sup>	1,20 <sup>b</sup>	21,7 <sup>c</sup>
GG	21,5 ± 2,7 <sup>d</sup>	1,41 <sup>c</sup>	15,2 <sup>b</sup>
AL	23,1 ± 0,1 <sup>d</sup>	1,63 <sup>d</sup>	14,2 <sup>b</sup>
EC	13,0 ± 0,7 <sup>b</sup>	1,17 <sup>b</sup>	11,1 <sup>a</sup>
HPMC	16,40 ± 0,4 <sup>c</sup>	1,36 <sup>c</sup>	12,1 <sup>a</sup>
GE (12,5 %)	10,3 ± 1,4 <sup>a</sup>	0,41 <sup>a</sup>	25,5 <sup>d</sup>

GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio; EC: goma espina corona; HPMC: hidroxipropilmetilcelulosa; GE: harina de arroz gelatinizada 12,5 %. A: porcentaje del área alveolar. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).



Todos los panes presentaron un porcentaje del área alveolar significativamente menor ( $p < 0,05$ ) a la del control con goma xántica. La formulación con AL mostró el porcentaje mayor, seguido de GG. A su vez, los peores resultados del porcentaje del área alveolar se obtuvieron con GE (12,5 %), HPMC y EC (Tabla 4.11); apreciándose en el primer caso una distribución de tamaño de alvéolos más homogénea y en los dos últimos más heterogénea. El uso de alginato proporcionó la mayor área alveolar promedio (Figura 4.17.c,  $1,6 \text{ mm}^2/\text{alvéolo}$ ), superando al de la goma xántica (Figura 4.17.a,  $1,2 \text{ mm}^2/\text{alvéolo}$ ). Por otro lado, la harina de arroz gelatinizada (Figura 4.17.f) proporcionó la miga más compacta, con los alvéolos más pequeños ( $0,41 \text{ mm}^2/\text{alvéolo}$ ) y la mayor densidad alveolar ( $25,5 \text{ alvéolos}/\text{cm}^2$ ). La presencia de alvéolos más pequeños, distribuidos uniformemente, ha sido asociada a una mayor estabilidad de la estructura después del batido, la cual estaría propiciada por una mayor viscosidad de la mezcla (Hager y Arendt, 2013).

En contraste, la menor densidad alveolar se observó en el caso de EC ( $11,1 \text{ alvéolos}/\text{cm}^2$ ) indicando una estructura menos abierta en relación al control con goma xántica ( $21,7 \text{ alvéolos}/\text{cm}^2$ ), tal como se puede constatar al visualizar la Figura 4.17.a (GX) y d (EC). Cabe indicar que, aunque EC y GX tienen un área alveolar promedio similar, la rodaja correspondiente a EC presenta un alveolado mucho más heterogéneo. Sobre la base de las evaluaciones realizadas se seleccionaron, además de la **goma xántica** (adoptada como referencia), los siguientes ingredientes funcionales:

- ✓ **Goma guar (GG)**, por proporcionar el mayor volumen del pan y un alveolado homogéneo, el cual se refleja en los buenos valores del porcentaje del área alveolar, del área alveolar promedio y de la densidad alveolar.
- ✓ **Alginato de sodio (AL)**, por proporcionar el mayor tamaño alveolar promedio, aunque con un volumen de pan inferior al del control.
- ✓ **Harina de arroz gelatinizada (GE 12,5 %)**, por su bajo costo y por su aptitud para promover un volumen de pan muy satisfactorio, aunque con una miga compacta caracterizada por el menor tamaño alveolar y la densidad alveolar más elevada.

Estos ingredientes funcionales se utilizaron para el desarrollo de panes mediante el diseño de mezclas.

## **4.5. Diseño de mezclas**

En esta sección se investigó el efecto de los diferentes sustitutos del gluten (*GX*, *GG* y *AL*), aplicados individualmente o combinados de a pares o bien en mezcla ternaria, en las propiedades de las masas y de los panes elaborados a partir de la formulación básica (**Diseño I**), o a partir de la formulación con reemplazo parcial de la harina nativa por la harina gelatinizada (**Diseño II**).

### **4.5.1. Diseño I**

Se eligió un diseño de mezclas centroide simplex, para analizar el posible efecto sinérgico/antagónico de los tres sustitutos del gluten seleccionados ( $x_1$ : goma xántica, *GX*;  $x_2$ : alginato de sodio, *AL* y  $x_3$ : goma guar, *GG*) sobre las propiedades viscoelásticas de las masas elaboradas con harina de arroz nativa (harina comercial Kapac), el volumen y el alveolado del pan. La composición de las mezclas se indicó en la Tabla 3.5 de la sección 3.8.1 (Diseño I).

#### **4.5.1.1. Propiedades reológicas de las masas**

Las propiedades reológicas se determinaron en masas elaboradas sin el agregado de leudante (sin azúcar, ni levadura), de acuerdo con otros autores que realizaron ensayos reológicos en masas de panificación, cuyas formulaciones exceptuaron la levadura, ya que la presencia de esta puede alterar o enmascarar los resultados (Pongjaruvat y col., 2014; Lazaridou y col., 2007). De hecho, Upadhyay y colaboradores (2012) informaron sobre el efecto significativo de la concentración de la levadura en el perfil viscoelástico de panes a base de trigo.

##### **4.5.1.1.a Barrido de deformación del Diseño I**

La determinación de la región viscoelástica lineal o también llamada estabilización de la muestra, permite estudiar el material (masa) sin sufrir variación en un determinado rango de amplitud. Además, la deformación y el esfuerzo aplicado no afectan los módulos de almacenamiento y de pérdida ( $G'$  y  $G''$ ) ni la tangente del ángulo de fase ( $\tan \delta$ ), debido a que no son dependientes de estos parámetros (Fu y col., 1997; Khatkar y Schofield, 2002; Newberry y col., 2002).

En la Tabla 4.12 se exhibe la región viscoelástica de las masas de pan del Diseño I. La goma xántica posee un mayor rango de amplitud en comparación con la goma guar y el alginato de sodio, como único ingrediente de sustitución de gluten en la masa. Cabe indicar que las mezclas binarias se potenciaron alcanzando valores de deformación de 7,28 - 8,76 %. Por último, la mezcla ternaria (GX+AL+GG) presentó una deformación mayor a las otras mezclas, la cual permite trabajar a valores altos de amplitud sin destruir la masa del pan.

**Tabla 4.12.** Región viscoelástica lineal de las masas de pan del Diseño I en función del sustituto de gluten.

Diseño I Mezcla N°	Sustituto	RVL <sup>1</sup> (Deformación %)
1	GX	0,1 - 8,34
2	GG	1 - 5,16
3	AL	1 - 4,7
4	GX+GG	0,1 - 8,76
5*	GX+AL+GG	1 - 17,8
6	AL+GG	0,1 - 7,28
7	GX+AL	0,1 - 7,95

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

<sup>1</sup>Barrido de deformación entre 0,1 - 100 % a frecuencia (1 Hz) y temperatura (25 °C) constantes.

GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

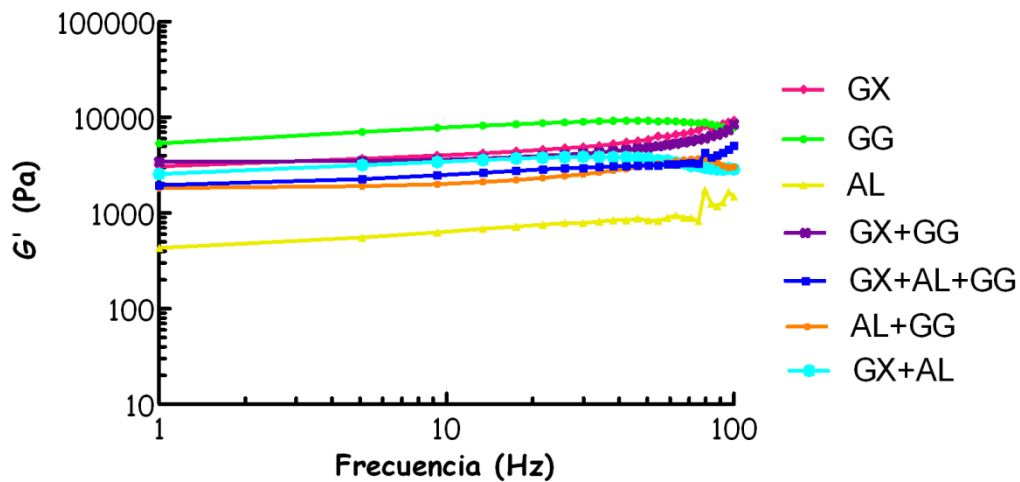
#### 4.5.1.1.b Barrido de frecuencia del Diseño I (método oscilatorio dinámico)

Las propiedades viscoelásticas evaluadas fueron: el módulo de almacenamiento o elástico ( $G'$ ), el módulo de pérdida o viscoso ( $G''$ ) y la tangente del ángulo de desfase ( $\tan \delta$ ).  $\tan \delta$  se obtiene de la relación  $G''/G'$ , por lo tanto cuando ambos módulos coinciden se obtiene  $\tan \delta = 1$ .

En la Figura 4.18 se presentan los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) de las masas para la elaboración de pan del Diseño I. En general, se aprecia la independencia de  $G'$  con la frecuencia en un amplio rango de barrido (frecuencia menor a 50 Hz).

Contrariamente, Sivaramakrishnan y colaboradores (2004) encontraron dependencia de la frecuencia con los módulos ( $G'$  y  $G''$ ), en masas de harina de arroz con HPMC como sustituto (sin levadura), al igual que en masas de trigo. Cabe mencionar que

otros autores informaron que la presencia de levadura ocasionaba dependencia de  $G'$  con la frecuencia, en masas elaboradas con harina de arroz (Rivera, 2015).



**Figura 4.18.** Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) de las masas para pan del Diseño I (GX: goma xántica, AL: alginato de sodio, GG: goma guar) a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ).

El empleo de los distintos hidrocoloides permitió obtener comportamientos viscoelásticos diferenciados. En la Figura 4.18 se visualiza que la formulación con goma guar (GG) presentó mayor carácter elástico que los demás sustitutos del gluten empleados individualmente o combinados; mientras que el alginato de sodio (AL) exhibió los menores valores de  $G'$ . Se observaron comportamientos similares en el caso de la goma xántica (GX) y la mezcla de gomas (GX+GG). Además, se evidenció que la presencia de alginato de sodio en las mezclas (binaria o ternaria) provocó una disminución del carácter elástico de la masa.

La Figura 4.19 muestra los espectros mecánicos dinámicos de las mezclas correspondientes al Diseño I, los cuales revelan el carácter elástico ( $G' > G''$ ) de las masas para pan libre de gluten, elaboradas a base de harina de arroz.

Se puede observar a través de los valores de los módulos dinámicos de todas las masas, que el comportamiento viscoelástico corresponde a la llamada meseta de relajación, donde los valores de  $G'$  son mayores que los valores de  $G''$ , prácticamente en todo el rango de frecuencias.

Se indica además, que el módulo viscoso presenta una tendencia creciente más evidente en la zona de alta frecuencia, llegando a superar al módulo elástico. Todas las mezclas evaluadas exhibieron un valor de frecuencia en el que coinciden ambos módulos viscoelásticos (Figura 4.19). Los valores de frecuencia en donde coinciden ambos módulos viscoelásticos se presentan en la Tabla 4.13 en función del sustituto de gluten utilizado.

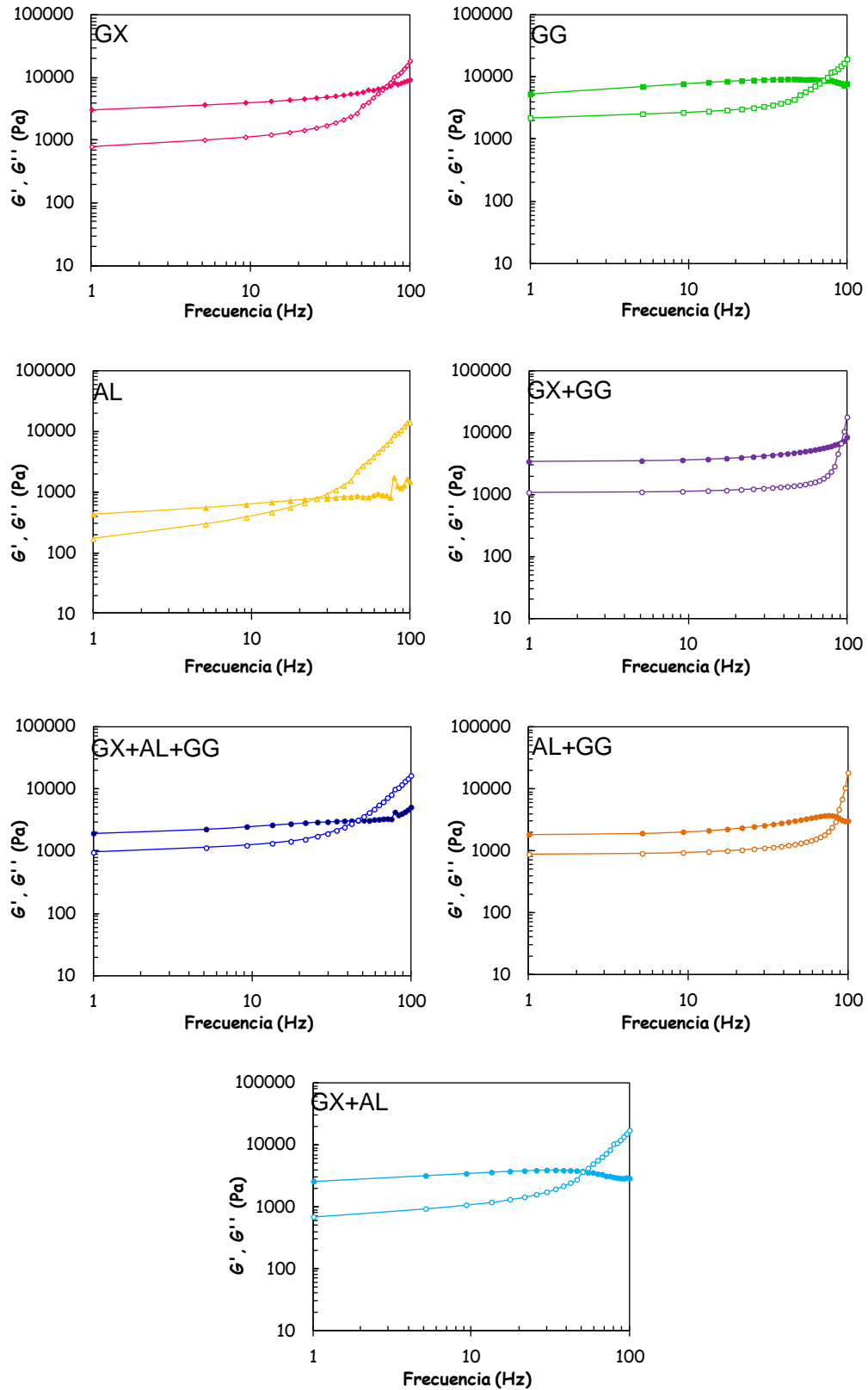
Los resultados de la Tabla 4.13 revelaron que la presencia de alginato de sodio le da un carácter viscoso a la masa a partir de un valor de frecuencia relativamente bajo (26 Hz). Conjuntamente se evidenció una disminución significativa en el valor de los módulos en el punto en donde se igualan ( $\tan \delta = 1$ ), en comparación con los otros sustitutos.

Por otra parte, las combinaciones de goma xántica - goma guar (GX+GG) y goma guar - alginato de sodio (GG+AL) permitieron mantener el carácter elástico prácticamente en todo el rango de frecuencia, como se desprende de los altos valores de frecuencia (91,8 Hz y 84,9 Hz, respectivamente) para el punto de coincidencia.

Cabe señalar que a diferencia de lo observado en este trabajo, Sivaramakrishnan y colaboradores (2004) encontraron dos puntos de coincidencia entre  $G'$  y  $G''$ , en masas a base de arroz con HPMC como sustituto.

Por lo expuesto, el barrido de frecuencia permitió detectar diferentes comportamientos entre los sustitutos estudiados, los cuales están asociados a las interacciones específicas entre cada sustituto y los componentes de la harina de arroz (Weipert, 1990).

Además, estos ensayos evidenciaron los efectos de interacción presentes en combinaciones de sustitutos.



**Figura 4.19.** Espectros mecánicos dinámicos de las masas de pan en función del Diseño I, a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ). GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio. Valores de  $G'$  (•) y  $G''$  (○) en función de la frecuencia.

**Tabla 4.13.** Valores de la frecuencia correspondientes a  $\tan \delta = 1$  en función del sustituto de gluten para el Diseño I.

Diseño I Mezcla N°	Sustituto	$G' = G''$ (Pa)	F (Hz)
1	GX	6840	69,05
2	GG	8890	71,1
3	AL	788	25,8
4	GX+GG	6920	91,8
5*	GX+AL+GG	3170	46,4
6	AL+GG	3490	84,9
7	GX+AL	3650	50,5

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio.  $G'$ : módulo de almacenamiento.  $G''$ : módulo de pérdida.

#### 4.5.1.1.c Prueba de deformación-relajación (ensayo de Creep-Recovery) del Diseño I

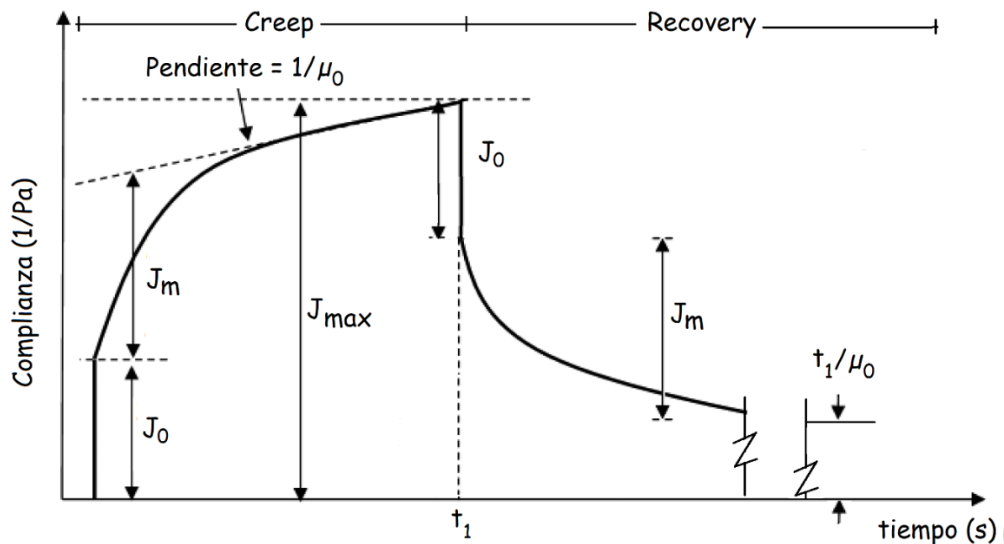
El "creep" puede definirse como la deformación lenta de un material sometido a una tensión constante, y permite diferenciar bien las respuestas viscosas y elásticas de un material. En los ensayos de creep se aplica por compresión una tensión instantánea constante ( $\alpha$ ) y se registra la deformación ( $\gamma$ ) a lo largo del tiempo.

En la mayoría de los materiales viscoelásticos la aplicación de una tensión constante da lugar a una deformación elástica retardada, hasta que se establece un flujo newtoniano en el sistema. Para caracterizar el comportamiento total se ha empleado el modelo de Burger o de los cuatro elementos (Burger, 1935), el cual combina los modelos de Maxwell y Kelvin, en términos de fluencia o "creep compliance" (Lazaridou y col., 2007; Van Bockstaele y col., 2011).

Para el modelado de la zona del **creep** la ecuación utilizada fue:

$$J_c(t) = J_0 + J_m (1 - \exp(-t/\lambda)) + t/\mu_0 \quad (15)$$

Donde  $J_c(t)$  es la deformación en la zona del creep,  $J_0$  es la deformación o complianza instantánea,  $J_m$  es la deformación o complianza elástica retardada,  $\lambda$  es el tiempo de retardo,  $\mu_0$  es la viscosidad estacionaria y  $t$  es el tiempo (Figura 4.20).



**Figura 4.20.** Esquema del cálculo de los parámetros del modelo de Burger.  
Fuente: Pérez y Tripaldi (2012).

En la fase de recuperación o **recovery** se realizó un ajuste con la misma ecuación de Burger. En este caso, al no existir viscosidad, se puede representar por medio de la siguiente expresión:

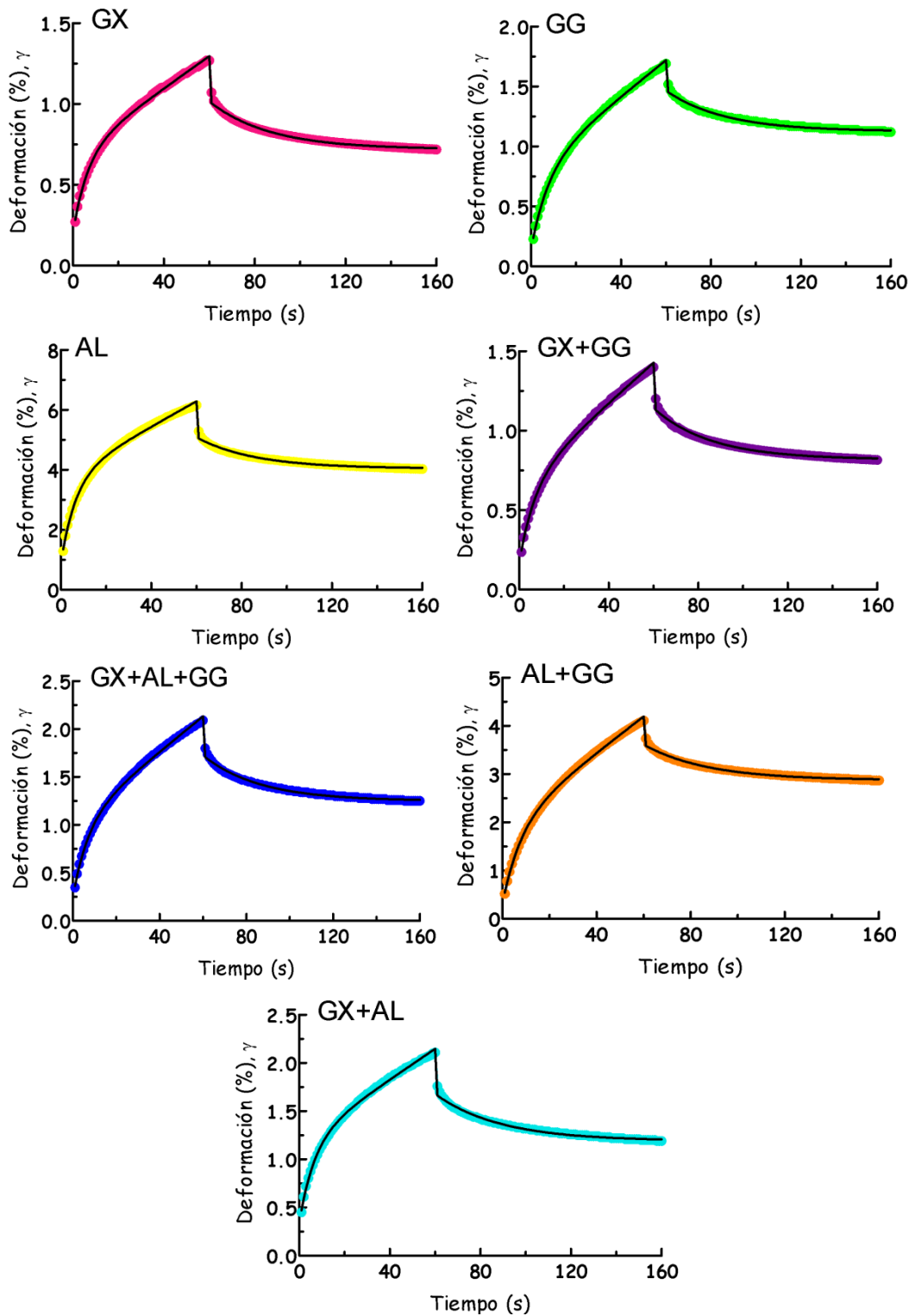
$$J_r(t) = J_{max} - J_0 - J_m (1 - \exp(-t/\lambda)) \quad (16)$$

Donde  $J_r(t)$  es la deformación en la zona del "recovery",  $J_{max}$  es la máxima deformación,  $J_0$  es la deformación o complianza instantánea,  $J_m$  es la deformación o complianza elástica retardada,  $\lambda$  es el tiempo de retardo y  $t$  es el tiempo.

En la Figura 4.21 se muestran los resultados de los ensayos de "creep - recovery" de masas preparadas con diferentes sustitutos del gluten. En la figura mencionada puede observarse el comportamiento viscoelástico característico de cada fase del ensayo (Sivaramakrishnan y col., 2004; Lazaridou y col., 2007).

Los resultados de la prueba de fluencia y relajación revelan el comportamiento típico de un material viscoelástico, el cual resultó similar al obtenido por Sivaramakrishnan y colaboradores (2004), para masa a base de harina de arroz.

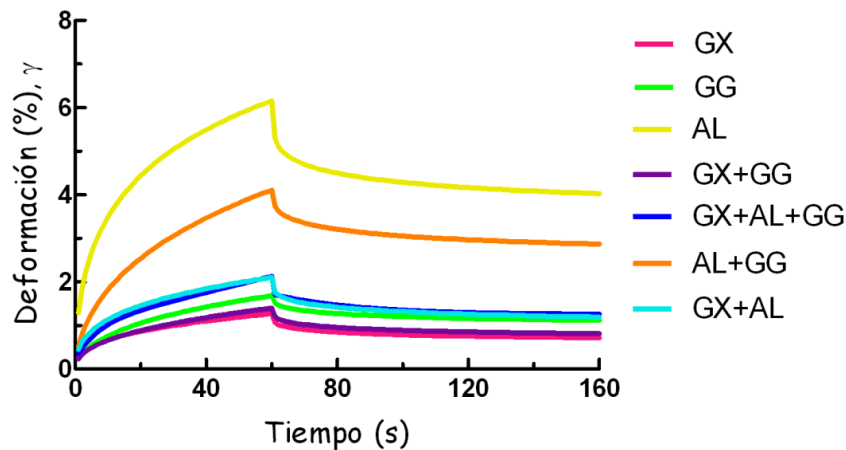




**Figura 4.21.** Curvas del ensayo de deformación-relajación de las masas del Diseño I. Valores experimentales (en color) y predichos (—, ecs. 15 y 16). GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio.

Con el propósito de comparar entre sí las diferentes mezclas se muestra la Figura 4.22, donde se visualiza el efecto de la formulación sobre la resistencia de la masa a

la deformación. Cuanto mayor es la resistencia menor es la deformación. La mayor resistencia correspondió a la goma xántica (control) la cual se presenta como la más elástica de todas las mezclas estudiadas y muestra la menor deformación.



**Figura 4.22.** Curvas experimentales del ensayo de deformación-relajación de las masas del Diseño I (GX: goma xántica, AL: alginato de sodio, GG: goma guar).

Cabe también señalar que en la fase de recuperación (cuando se retira la carga) la deformación no recuperable o residual, que refleja la componente viscosa del sistema viscoelástico, varía según el sustituto de gluten usado. La deformación residual fue mayor en el caso de las muestras con AL y AL+GG. Estos sistemas mostraron, a diferencia de los otros, curvas con un decrecimiento indefinido en el tiempo del ensayo, lo que estaría indicando que van recuperándose de la deformación más lentamente que las otras muestras, si bien su recuperación es parcial y de menor magnitud.

La masa que menos resistencia ofreció fue la elaborada con alginato de sodio, mientras que las que ofrecieron mayor resistencia fueron las masas con goma xántica y la mezcla de goma xántica - goma guar, seguidas de la masa con goma guar y la mezcla de goma xántica - alginato de sodio, junto con la mezcla ternaria (GX+AL+GG). Valores intermedios de deformación se obtuvieron con la mezcla de alginato de sodio - goma guar.

Una mayor resistencia a la deformación puede asociarse con una estructura más firme de la masa. La masa que presentó una mayor deformación (AL) también

presentó menor capacidad de ocluir gas durante la fermentación. Este hecho fue corroborado y se reflejó en el bajo volumen del pan obtenido con alginato de sodio. Por el contrario, las masas que exhibieron la menor deformación (GX, GX+GG) poseen buena capacidad para retener gas, y este resultado es compatible con los volúmenes satisfactorios de los panes obtenidos utilizando estos sustitutos (Tabla 4.10).

Los datos experimentales derivados de los ensayos transientes (ensayos de creep y relajación de la tensión) se ajustaron con el **modelo de Burger** (ecuaciones 15 y 16), la Tabla 4.14 proporciona los valores de los parámetros del modelo y los coeficientes de determinación correspondientes al ajuste los cuales resultaron muy satisfactorios ( $R^2 > 0,99$ ) para ambas fases del test. La buena correspondencia entre los valores experimentales y predichos se puede visualizar en la Figura 4.21.

**Tabla 4.14.** Parámetros del modelo de Burger (ecs. 15 y 16) para las masas de pan del Diseño I.

<b>Fase "Creep"</b>						
<b>Mezcla N°</b>	<b>Mezcla</b>	<b>J<sub>0</sub> (1/Pa × 10<sup>-4</sup>)</b>	<b>J<sub>m</sub> (1/Pa × 10<sup>-4</sup>)</b>	<b>λ (s)</b>	<b>μ<sub>0</sub> (Pa.s)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	GX	2,02 <sup>ab</sup>	4,92 <sup>ab</sup>	6,46 <sup>a</sup>	99486 <sup>d</sup>	0,9992 <sup>c</sup>
2	GG	1,42 <sup>a</sup>	6,67 <sup>a</sup>	7,81 <sup>c</sup>	65896 <sup>b</sup>	0,9994 <sup>de</sup>
3	AL	8,96 <sup>d</sup>	28,48 <sup>d</sup>	6,53 <sup>a</sup>	23601 <sup>a</sup>	0,9989 <sup>a</sup>
4	GX+GG	1,67 <sup>a</sup>	4,96 <sup>ab</sup>	6,98 <sup>b</sup>	78495 <sup>c</sup>	0,9993 <sup>d</sup>
5*	GX+AL+GG	2,42 <sup>b</sup>	7,82 <sup>b</sup>	7,09 <sup>b</sup>	54129 <sup>b</sup>	0,9992 <sup>c</sup>
6	AL+GG	3,12 <sup>c</sup>	16,18 <sup>c</sup>	7,90 <sup>d</sup>	26482 <sup>a</sup>	0,9994 <sup>e</sup>
7	GX+AL	3,37 <sup>c</sup>	8,53 <sup>b</sup>	6,70 <sup>a</sup>	62663 <sup>b</sup>	0,9991 <sup>b</sup>
<b>Fase "Recovery"</b>						
<b>Mezcla N°</b>	<b>Mezcla</b>	<b>J<sub>0</sub> (1/Pa) × 10<sup>-4</sup></b>	<b>J<sub>m</sub> (1/Pa) × 10<sup>-4</sup></b>	<b>λ (s)</b>	<b>J<sub>max</sub> (1/Pa) × 10<sup>-3</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	GX	2,57 <sup>a</sup>	2,95 <sup>a</sup>	26,49 <sup>bc</sup>	1,27 <sup>a</sup>	0,9929 <sup>bc</sup>
2	GG	2,21 <sup>a</sup>	3,39 <sup>a</sup>	26,12 <sup>bc</sup>	1,69 <sup>b</sup>	0,9931 <sup>bc</sup>
3	AL	10,78 <sup>e</sup>	10,40 <sup>d</sup>	25,79 <sup>ab</sup>	6,17 <sup>d</sup>	0,9907 <sup>a</sup>
4	GX+GG	2,57 <sup>a</sup>	3,23 <sup>a</sup>	25,72 <sup>a</sup>	1,40 <sup>a</sup>	0,9923 <sup>b</sup>
5*	GX+GG+AL	3,63 <sup>b</sup>	4,74 <sup>b</sup>	26,15 <sup>ab</sup>	2,09 <sup>b</sup>	0,9931 <sup>c</sup>
6	AL+GG	5,00 <sup>d</sup>	7,38 <sup>c</sup>	27,28 <sup>c</sup>	4,11 <sup>c</sup>	0,9924 <sup>bc</sup>
7	GX+AL	4,27 <sup>c</sup>	4,87 <sup>b</sup>	28,60 <sup>c</sup>	2,11 <sup>b</sup>	0,9924 <sup>b</sup>

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).  
 J<sub>0</sub>: complianza instantánea, J<sub>m</sub>: complianza elástica retardada, λ: tiempo de retardo, μ<sub>0</sub>: es la viscosidad estacionaria, J<sub>max</sub>: máxima deformación.  
 GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

En la fase de fluencia (creep) los valores de  $J_m$  reflejan la máxima deformación al final de esta. Wang y colaboradores (2002) sugirieron que los valores de  $J_m$  pueden utilizarse para describir la fuerza o rigidez de la masa, que tienen una relación inversa con la misma. Lazaridou y colaboradores (2007) han señalado también el efecto positivo del contenido de agua de la mezcla sobre la deformación de la masa. En el presente trabajo este efecto se controló fijando el mismo contenido de agua para todas las mezclas estudiadas (sección 3.3.1).

En la fase de fluencia todos los valores de complianza ( $J_0$ ,  $J_m$ ) resultaron mayores en comparación con el control de goma xántica (GX), mientras que las viscosidades ( $\mu_0$ ) correspondientes disminuyeron respecto al control, como se esperaba, ya que el control representa el sistema con mayor viscosidad.

Esta viscosidad, la cual es una medida de la fluidez del sistema al terminar la fase de carga (creep), se conoce como la viscosidad en estado estacionario, que se alcanza al terminar la fase de fluencia. De la Tabla 4.14 resulta el siguiente orden decreciente de viscosidades:  $GX > GX+GG > GG > GX+AL > GX+GG+AL > AL+GG > AL$ . Exactamente el orden inverso se registró para los valores de  $J_m$ , mientras que el orden para la complianza instantánea ( $J_0$ ) fue:  $AL > GX+AL > GG+AL > AL+GG+GX > GX > GG+GX > GG$ .

Durante la fase de deformación (creep), las formulaciones con alginato de sodio presentaron los mayores valores de complianza instantánea ( $J_0$ ) y de complianza retardada ( $J_m$ ) y los menores valores fueron para las gomas xántica y guar. A su vez, estos resultaron comparativamente mayores a los reportados por Sozer (2009), para masas (pastas) a base de mezclas de harinas de arroz y maíz; e implicaron el mismo orden de magnitud que los de las masas para panificación libres de gluten informados por Lazaridou y colaboradores (2007). Esto se debe, a que para masas destinadas a la elaboración de pasta se utilizan tensiones de corte mayores (~750 Pa) que la usada en este trabajo (10 Pa) para panificados.

En general los valores del tiempo de retardo medio ( $\lambda$ ), en la fase de fluencia, fueron levemente mayores a los del control (GX).

Las diferencias en el comportamiento viscoelástico pueden interpretarse en términos de las diferencias en el estiramiento de la red asociativa, establecida por enlaces intermoleculares no covalentes entre el almidón y los sustitutos de gluten estudiados (Edwards y col., 2001).

La contribución relativa de cada complianza a la complianza total, para las masas ensayadas, se encontró dentro de los siguientes rangos: 16-29 % para  $J_0$ ; 71-84 % para  $J_m$ ; y resultó despreciable para la componente viscosa.

Para la fase de relajación (recovery) se obtuvieron resultados que se corresponden con los obtenidos en la fase de deformación.

Durante la fase de relajación los tiempos de retardo se incrementaron significativamente (entre 18,3 s y 21,9 s), respecto a los correspondientes de la fase de fluencia (creep), debido al estiramiento molecular al que se someten los componentes de la mezcla durante la prueba. Un incremento del tiempo de retardo en la fase de relajación, pero de mucha menor magnitud (7 s), fue observado también por Hernandez-Estrada y colaboradores (2014), quienes aplicaron el ensayo de fluencia-relajación para determinar el efecto de diferentes glutelinas en la viscoelasticidad de pan de trigo. En la tabla también se visualiza que las muestras menos elásticas (GX+AL; GG+AL) presentaron un tiempo de retardo ligeramente mayor (1,1 s en promedio) que las más elásticas (GX, GG).

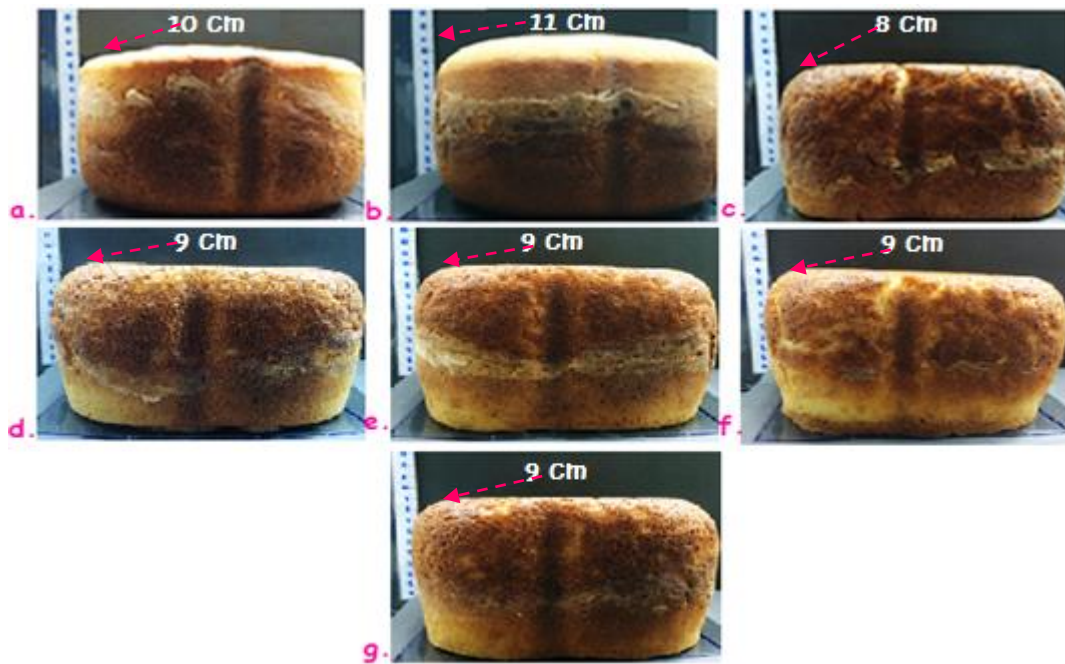
La influencia del aditivo está relacionada con su estructura molecular y la conformación de las cadenas del polisacárido, las cuales determinan las posibles interacciones físicas intermoleculares ("cross-linking" o entrecruzamiento) entre las cadenas poliméricas del sustituto y los componentes de la mezcla (almidón, proteínas).

Entre todos los sustitutos estudiados, la goma xántica exhibe la menor complianza ( $J_m$ ) y la mayor viscosidad de corte estacionaria ( $\mu_0$ ). La elevada elasticidad de la masa a la cual se agregó GX se explica por la capacidad bien conocida de esta goma para formar un gel débil, como también para proporcionar alta viscosidad a baja velocidad de corte, debido a la conformación rígida de sus cadenas (Doublrier y Cuvelier, 1996).

#### 4.5.1.2. Volumen del pan del Diseño I

En la Figura 4.23 se muestran los panes de molde elaborados según el Diseño I, en donde se empleó como sustitutos la goma xántica, la goma guar y el alginato de sodio en mezclas binarias y ternaria.

Los panes presentaron un aspecto aceptable, a excepción del obtenido con la mezcla de goma guar - alginato de sodio (GG+AL), en el que se observó el colapso de la superficie, y una costra dura (Figura 4.24).



**Figura 4.23.** Panes de molde elaborados según el Diseño I. a) goma xántica, GX; b) goma guar, GG; c) alginato de sodio, AL; d) GX+GG; e) GX+AL; f) GG+AL; g) GX+GG+AL.



**Figura 4.24.** Colapso de la superficie del pan de molde elaborado con la mezcla (Diseño I) de goma guar - alginato de sodio (GG+AL).

Cabe resaltar que el pan elaborado con la goma guar presentó la mayor altura (11 cm), seguido del correspondiente a la goma xántica (10 cm), mientras que la menor altura se obtuvo en el pan elaborado con alginato de sodio. Además, se hallaron valores intermedios (9 cm) para los panes obtenidos usando mezclas binarias y ternaria.

En la Tabla 4.15 se observan los valores de volumen de los panes elaborados con la harina nativa y mezclas de los sustitutos de gluten según el Diseño I.

**Tabla 4.15.** Volumen de los panes de molde del Diseño I.

Diseño I Mezcla N°	Sustituto	Volumen (ml)	Volumen/masa <sup>a</sup> (ml/g)
1	GX	1304 ± 65 <sup>b</sup>	3,4
2	GG	1474 ± 74 <sup>c</sup>	3,8
3	AL	1173 ± 59 <sup>a</sup>	3,1
4	GX+GG	1622 ± 81 <sup>d</sup>	4,2
5*	GX+GG+AL	1618 ± 81 <sup>d</sup>	4,2
6	AL+GG	1315 ± 66 <sup>b</sup>	3,4
7	GX+AL	1615 ± 81 <sup>d</sup>	4,2

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. <sup>a</sup>masa de harina = 384 g  
GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio.

Los panes de mayor volumen fueron los elaborados con goma xántica - goma guar (GX+GG), goma xántica - alginato de sodio (GX+AL) y goma xántica - goma guar - alginato de sodio (GX+GG+AL), no encontrándose diferencias significativas entre los mismos. En contraste, el pan elaborado con alginato de sodio en ausencia de gomas exhibió una disminución significativa ( $p < 0,05$ ) del 28 % con relación al obtenido con la goma xántica - goma guar (mayor volumen).

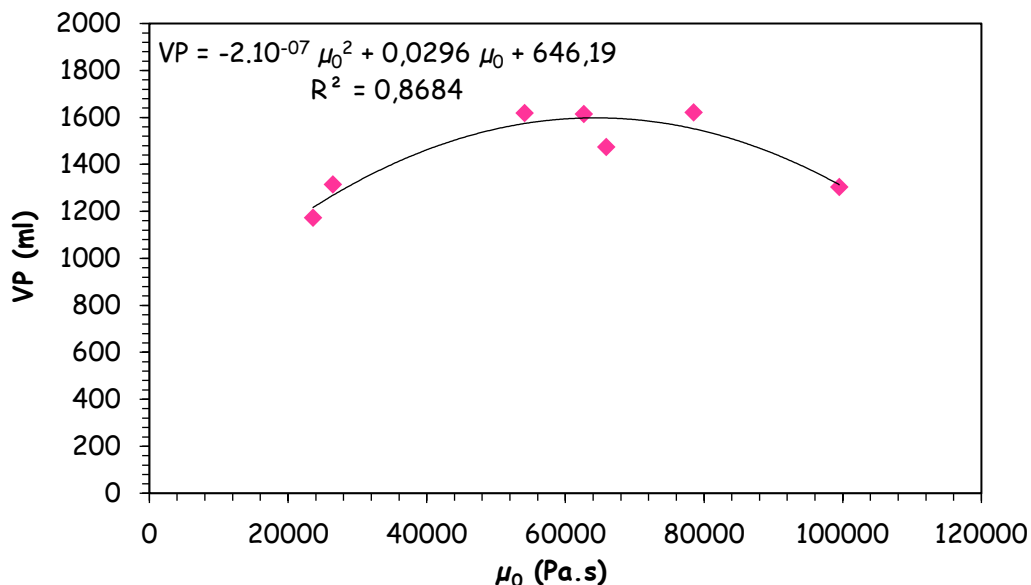
Para facilitar la comparación con datos de bibliografía se calculó el volumen por unidad de masa de harina (Tabla 4.15). El promedio fue 3,8 ml/g, valor que está dentro del rango 3,6-4,3 ml/g reportado por Aoki y colaboradores (2015), quienes formularon pan de arroz utilizando variedades de arroz con el mismo contenido de amilosa pero que diferían en la estructura de la amilopectina (diferentes porcentajes de cadena corta).



#### 4.5.1.2.a Relación entre el volumen del pan y la viscosidad de la masa del Diseño I

La Figura 4.25 sugiere una relación no lineal entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), encontrándose un ajuste ( $R^2 = 0,87$ ) a un modelo polinómico de segundo grado. Con el incremento de la viscosidad se observó un aumento del volumen hasta una viscosidad estacionaria de  $\sim 60000$  Pa.s, posteriormente se manifestó una dependencia negativa entre estas dos propiedades. El incremento de la viscosidad de la masa permite la retención de gas y la formación de alvéolos en mayor cantidad y de más tamaño durante el horneado. Al superar la viscosidad crítica ( $\sim 60000$  Pa.s) observada en la prueba de creep, la consistencia de la masa no permite el incremento de tamaño de los alvéolos, por consiguiente se obtiene un pan más compacto y menos aireado. Otros investigadores informaron resultados similares entre el volumen del pan y la viscosidad estacionaria de la masa de panes elaborados a base de harina de arroz con  $\beta$ -glucanos de avena y de cebada (Ronda y col., 2015).

La importancia de este análisis radica en la posibilidad de determinar la aptitud de la masa cruda y seleccionar aquella que permita maximizar el volumen del pan.



**Figura 4.25.** Relación entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del Diseño I.

#### 4.5.1.3. Medición del alveolado del pan del Diseño I

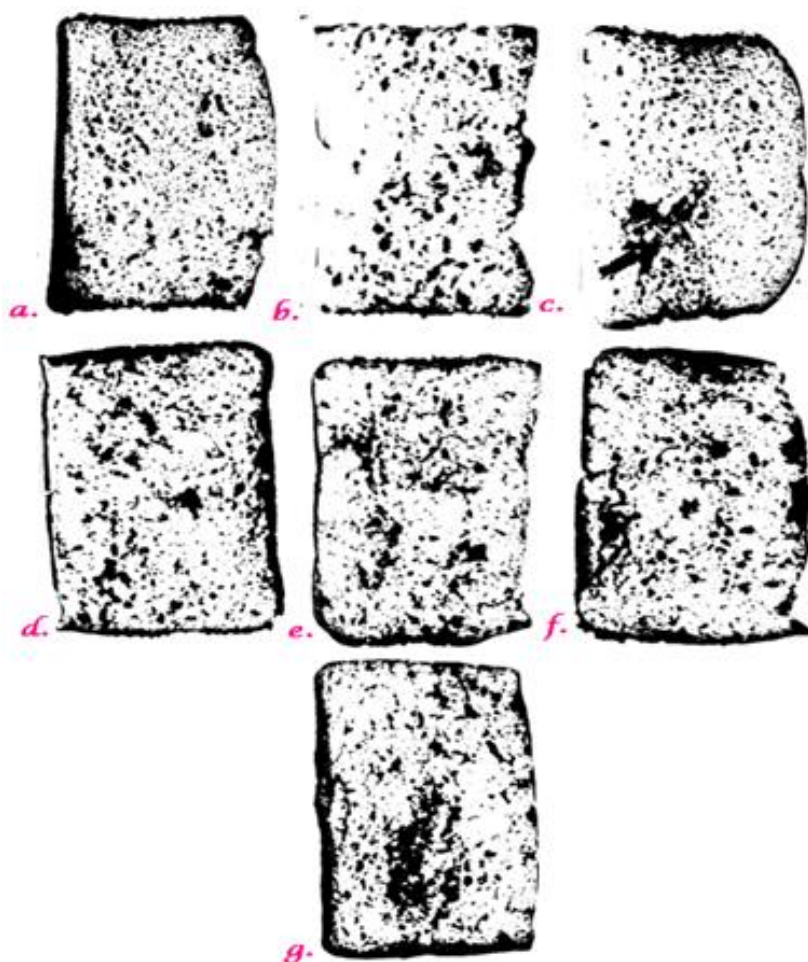
La Figura 4.26 muestra la sección transversal de los panes de molde elaborados según el Diseño I, a base de mezclas de harina de arroz nativa y los sustitutos de gluten evaluados: goma xántica, goma guar y alginato de sodio.



**Figura 4.26.** Sección transversal de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten en función del Diseño I. a) GX: goma xántica, b) AL: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+GG, e) GX+GG+AL, f) AL+GG, g) GX+AL.

Se puede observar que todas las rodajas tienen una apariencia aceptable. Cabe indicar que en la sección anterior se comentó que el pan de molde con la mezcla de alginato de sodio - goma guar (AL+GG) presentó colapso en la superficie, sin embargo, en la rodaja de pan no se evidenció tal efecto (Figura 4.26.f).

Los parámetros característicos del alveolado de los diferentes panes (Tabla 4.16) se determinaron mediante el análisis de las imágenes binarizadas, correspondientes a las secciones transversales (Figura 4.27).



**Figura 4.27.** Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con harina de arroz nativa y diferentes sustitutos de gluten en función del Diseño I. a) GX: goma xántica, b) AL: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+GG, e) GX+GG+AL, f) AL+GG, g) GX+AL.

La densidad alveolar obtenida con goma guar resultó similar a la del pan sin gluten elaborado a base de almidón de maíz y papa (Ziobro y col., 2012), pero presentó menor tamaño de alvéolos (40 % menor). Con las diferentes combinaciones se obtuvo un amplio rango de densidad alveolar (6,8-21,7 alvéolos/cm<sup>2</sup>), área promedio de alvéolo (1,2-2,79 mm<sup>2</sup>/alvéolo) y porcentaje del área alveolar (18,4-29,7 %). La densidad alveolar se redujo con el uso del alginato, y en general

resultó comparativamente menor a la de los panes a base de harina de arroz y con 20 % de harina de amaranto o de quinua, elaborados por Manzatti Machado Alencar y colaboradores (2015), quienes informaron entre 42 y 61 alvéolos/cm<sup>2</sup>. Posiblemente el aporte proteico de los cereales andinos propicia las interacciones entre los componentes de la mezcla, contribuyendo a la formación de un alveolado mucho más denso.

**Tabla 4.16.** Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde elaborados en función del Diseño I.

Diseño I Mezcla N°	Sustituto	A (%)	Área alveolar promedio mm <sup>2</sup> /alvéolo	Densidad alveolar alvéolos/cm <sup>2</sup>
1	GX	26,00 ± 1,54 <sup>d</sup>	1,20 <sup>a</sup>	21,7 <sup>d</sup>
2	GG	21,50 ± 2,65 <sup>bc</sup>	1,41 <sup>b</sup>	15,2 <sup>c</sup>
3	AL	23,10 ± 0,09 <sup>cd</sup>	1,63 <sup>c</sup>	14,2 <sup>c</sup>
4	GX+GG	29,69 ± 3,09 <sup>e</sup>	2,79 <sup>e</sup>	10,3 <sup>b</sup>
5*	GX+GG+AL	18,42 ± 0,44 <sup>a</sup>	2,56 <sup>d</sup>	6,8 <sup>a</sup>
6	AL+GG	18,92 ± 0,31 <sup>ab</sup>	1,53 <sup>b</sup>	11,9 <sup>b</sup>
7	GX+AL	20,08 ± 1,09 <sup>ab</sup>	1,55 <sup>b</sup>	12,7 <sup>b</sup>

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. A: porcentaje del área alveolar. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).  
GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

#### 4.5.1.4. Optimización de la formulación del pan correspondiente al Diseño I

En el desarrollo de panes libres de gluten, un diseño de mezclas resulta útil para conocer la proporción más adecuada de gomas e hidrocoloides empleados en su elaboración (Toufeili y col., 1994; Huang y col., 2001; Sánchez y col., 2002). Autores como Gallagher y colaboradores (2003) emplearon esta metodología para desarrollar y optimizar una formulación libre de gluten a base de harina de arroz, almidón de papa, concentrados proteicos e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) a partir de un diseño central, el cual fue optimizado en función del peso de las hogazas, el volumen específico y el perfil de textura.

En este trabajo los parámetros característicos de calidad: porcentaje del área alveolar (A) y volumen del pan (VP) fueron modelados en función de la composición

de las mezclas (ec. 11), encontrándose efectos significativos ( $p < 0,05$ ) de todos los sustitutos del gluten, tal como se puede observar en la Tabla 4.17, donde se informan los coeficientes del polinomio junto con el nivel de significación correspondiente.

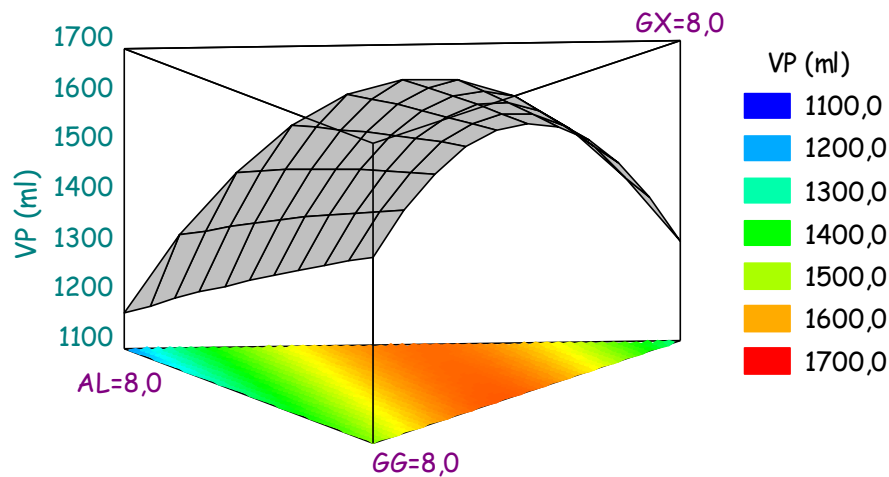
**Tabla 4.17.** Efecto de los sustitutos del gluten sobre los parámetros de calidad del pan del Diseño I, en términos de los factores sin codificar: goma xántica (GX), alginato de sodio (AL) y goma guar (GG).

<b>Coefficientes</b> (ec. 11)	<b>VP</b> (ml)	<b>A</b> (%)
GX	162,44	3,35
AL	146,65	3,08
GG	184,27	2,57
GX-GG	15,83*	0,37*
GX-AL	24,79*	-0,31*
AL-GG	---	-0,23*
GX-AL-GG	---	-0,23*
R <sup>2</sup>	0,9448	0,9967

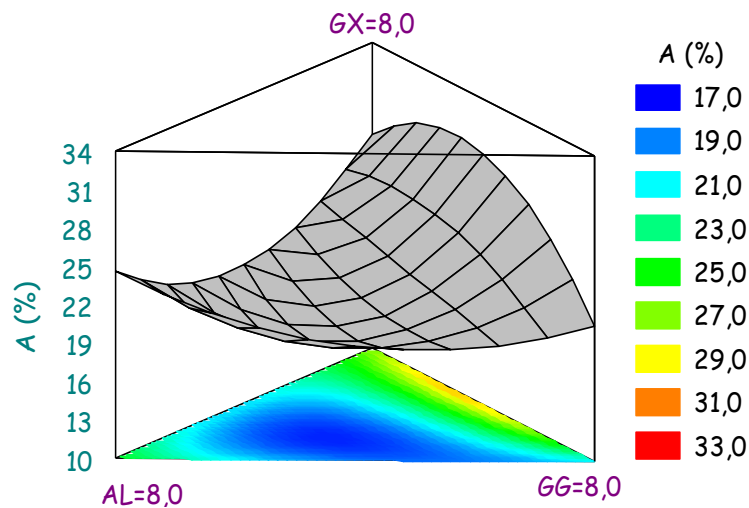
\* Significativo para  $p < 0,05$ ; NS: coeficiente no significativo; ---: coeficiente eliminado.

VP: volumen del pan, A: porcentaje del área alveolar.

La superficie de cada una de las respuestas fue predicha mediante la ecuación 11 en función de la composición de las mezclas estudiadas. La relación entre el volumen del pan y los diferentes sustitutos del gluten, solos o combinados (Figura 4.28), fue adecuadamente representada por un modelo cuadrático, con un ajuste satisfactorio de los datos ( $R^2 = 0,945$ ). En cambio, el porcentaje del área alveolar (Figura 4.29), fue explicada por un modelo cúbico especial ( $R^2 = 0,997$ ), siendo significativos los efectos de interacción entre los sustitutos del gluten, como fueron señalados en la Tabla 4.17.



**Figura 4.28.** Superficie de respuesta predicha del volumen del pan (VP) en función del Diseño I de mezclas. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 8 %).



**Figura 4.29.** Superficie de respuesta predicha del porcentaje del área alveolar (A) en función del Diseño I de mezclas. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 8 %).

En la Tabla 4.18, se presentan los resultados de la **optimización individual**, obtenidos a partir de cada una de las superficies de respuesta. Se informa en dicha tabla los valores máximos y mínimos de los parámetros característicos de calidad de los panes, y la composición de la mezcla respectiva. Se detectó un efecto sinérgico al combinar las gomas, observándose valores máximos del VP (1644,8 ml, GX/GG: 0,71) y del A (30,1 %, GX/GG: 1,7), en ausencia de alginato de sodio.

**Tabla 4.18.** Valores máximos y mínimos predichos de los parámetros de calidad del pan de molde en función del Diseño I de mezclas.

<b>Parámetros de calidad</b>		<b>GX</b> (g)	<b>AL</b> (g)	<b>GG</b> (g)
<b>VP (ml)</b>	máx	1644,79	3,33	0
	min	1169,09	0	8,0
<b>A (%)</b>	max	30,1	5,04	0
	min	17,46	1,64	3,68

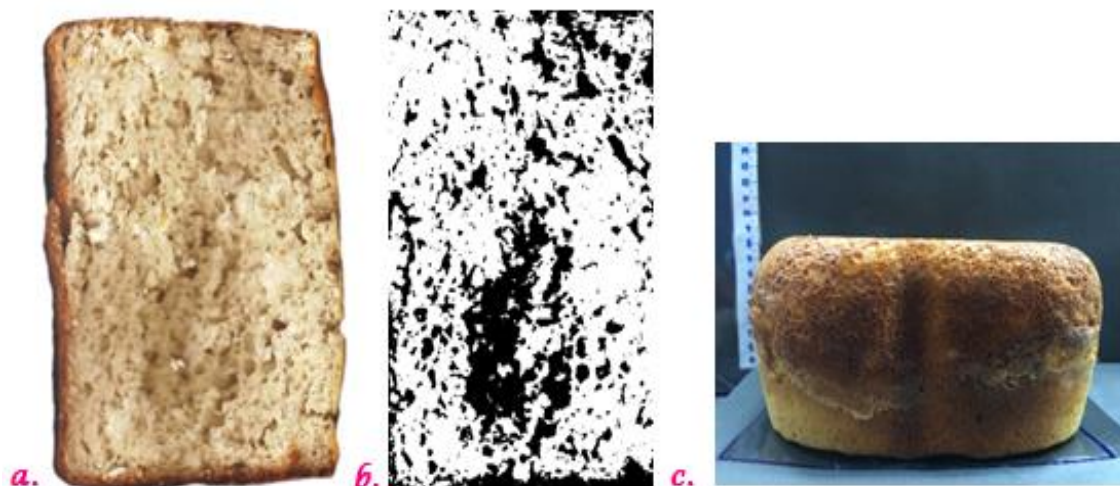
GX: goma xántica, AL: alginato de sodio, GG: goma guar, VP: volumen del pan, A: porcentaje del área alveolar.

La interacción sinérgica entre polisacáridos se debe al entrecruzamiento de los segmentos de ambos polímeros, que permite mejorar las propiedades texturales, por ello estas interacciones han suscitado el interés de muchos investigadores (Mao y Rwei, 2006; Wang y col., 2002).

Es de destacar la buena calidad del pan de molde que se obtuvo en este trabajo, la cual se compara a la obtenida por Lazaridou y colaboradores (2007), quienes lograron un buen volumen y textura en hogazas de pan sin gluten a base de harina de arroz, utilizando con éxito diferentes sustitutos del gluten (goma xántica, pectina, agarosa,  $\beta$ -glucano, carboximetilcelulosa - CMC) como ingrediente funcional.

Finalmente, como no coincidieron las formulaciones que proporcionan valores máximos de volumen y de alveolado del pan (ver Tabla 4.18), se llevó a cabo una **optimización múltiple**, para encontrar la mezcla que proporcione los valores deseados de las principales respuestas. Se adoptó como criterio maximizar simultáneamente el volumen del pan y el porcentaje del área alveolar. El óptimo se halló cercano a la mezcla binaria de goma xántica - goma guar (deseabilidad = 0,95), en una proporción de 3,3 g de GX y 4,67 g de GG, en ausencia de alginato de sodio. Esta mezcla fue ensayada y proporcionó un volumen de pan de 1563 ml y un porcentaje del área alveolar del 29 %. En la Figura 4.30 se muestra el pan de molde a partir de la formulación óptima, así como también un corte transversal del mismo

(rodaja) y su correspondiente imagen binarizada donde se observa el alveolado obtenido.



**Figura 4.30.** Imágenes del pan obtenido con la formulación óptima del Diseño I. a) Corte transversal del pan (rodaja); b) Imagen binarizada de la rodaja de pan; c) Pan de molde.

#### 4.5.2. Diseño II

Se empleó un diseño de mezclas centroide simplex con el propósito de evaluar la posibilidad de disminuir a la mitad el uso de sustitutos del gluten seleccionados ( $x_1$ : goma xántica, *GX*;  $x_2$ : alginato de sodio, *AL* y  $x_3$ : goma guar, *GG*), en masas y panes elaborados a partir de la formulación básica, con sustitución parcial (12,5 %) de la harina nativa (harina comercial Kapac) por la harina gelatinizada (*GE*). La composición de las mezclas se indicó en la sección 3.8.2 (Tabla 3.6), en las que el contenido de agua fue constante e igual a 497 ml, correspondiente a un grado de sustitución del 12,5 %.

##### 4.5.2.1. Propiedades reológicas de las masas del Diseño II

Las propiedades reológicas de las masas del Diseño II se determinaron de la misma forma que en el Diseño I. A su vez, la ausencia de leudante permitió comparar los resultados entre estos diseños.



#### 4.5.2.1.a Barrido de deformación del Diseño II

En la Tabla 4.19 se muestra la región viscoelástica lineal (RVL) de las masas de pan correspondientes al Diseño II. Al lado se copiaron los valores obtenidos con el Diseño I, para facilitar la comparación entre ambos (se remarcaron en negrita las principales diferencias).

Las gomas xántica y guar mostraron, individualmente o combinadas, las regiones viscoelásticas lineales de mayor amplitud, con relación a la masa con alginato de sodio. A su vez, la mezcla que contenía solo goma guar presentó un aumento significativo (68 %) del RVL, en correspondencia con la formulación de goma guar del Diseño I. En otros casos (GX, AL, GX+GG, GX+AL) no se observaron cambios en la RVL con respecto al Diseño I. Sin embargo, la presencia de harina gelatinizada provocó una significativa ( $p < 0,05$ ) reducción de la RVL, tanto en la mezcla de goma guar - alginato (GG+AL) como en la mezcla ternaria, cuyo RVL disminuyó un 65 % en comparación con el obtenido en el Diseño I.

Por lo tanto, se puede afirmar que el aporte funcional de la harina gelatinizada fue dependiente de los sustitutos presentes en las mezclas.

**Tabla 4.19.** Región viscoelástica lineal de las masas de pan del Diseño II y su comparación con el Diseño I en función del sustituto de gluten.

Diseño II Mezcla N°	Sustituto	Diseño II RVL <sup>1</sup> (Deformación %)	Diseño I RVL <sup>1</sup> (Deformación %)
1	GX	1 - 8,03	0,1 - 8,34
2	GG	<b>1 - 8,67</b>	<b>1 - 5,16</b>
3	AL	1 - 4,55	1 - 4,7
4	GX+GG	1 - 8,73	0,1 - 8,76
5*	GX+GG+AL	<b>0,1 - 6,13</b>	<b>1 - 17,8</b>
6	AL+GG	<b>0,1 - 5,42</b>	<b>0,1 - 7,28</b>
7	GX+AL	1 - 8,14	0,1 - 7,95

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

<sup>1</sup>Barrido de deformación entre 0,1 - 100 % a frecuencia (1 Hz) y temperatura (25 °C) constantes.

GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

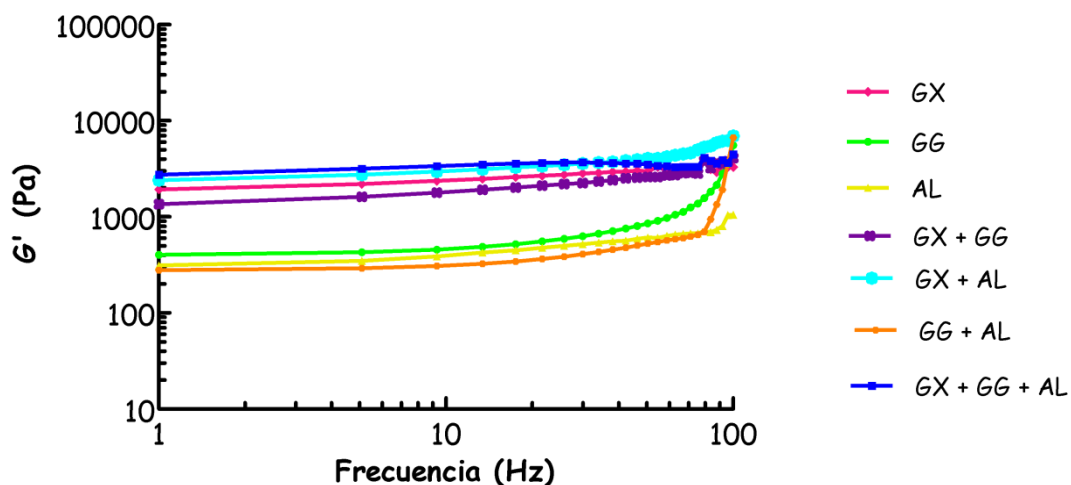
#### 4.5.2.1.b Barrido de frecuencia del Diseño II (método oscilatorio dinámico)

Las propiedades viscoelásticas evaluadas fueron: el módulo de almacenamiento ( $G'$ ), el módulo de pérdida ( $G''$ ) y la tangente del ángulo de desfase ( $\tan \delta$ ).

Para el módulo de almacenamiento, según muestra la Figura 4.31, se evidenció la independencia de  $G'$  en un amplio rango de barrido de frecuencia (frecuencia menor a 20 Hz). Este comportamiento también se encontró en el Diseño I, aunque en un rango aún más amplio (frecuencia menor a 50 Hz).

Por otra parte, la mezcla ternaria ( $GX+GG+AL$ ) presentó mayor carácter elástico que las demás combinaciones (unitarias y binarias), mientras que las masa con goma guar, alginato de sodio y mezclas de ambos sustitutos ( $GG+AL$ ) exhibieron los menores valores de  $G'$ . En comparación con el Diseño I, la goma xántica favoreció el carácter elástico, mientras que la presencia de alginato de sodio proporcionó valores menores de  $G'$ .

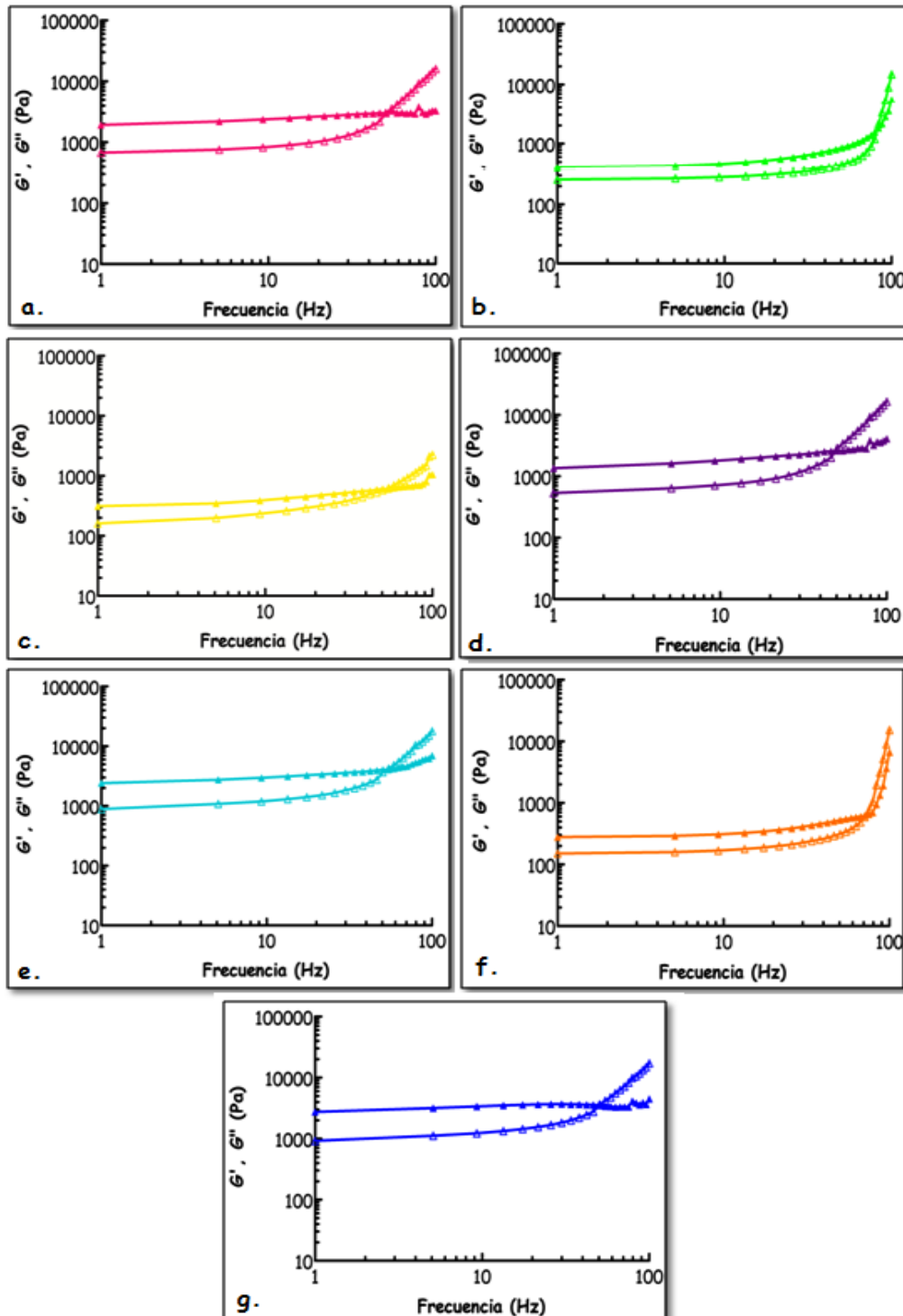
La presencia de la harina gelatinizada, la cual posee mayor capacidad de absorción de agua (Tabla 4.5), influyó en las propiedades viscoelásticas de las masas en concordancia con lo reportado en la bibliografía (McWatters, 1983).



**Figura 4.31** Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) de las masas para pan del Diseño II ( $GX$ : goma xántica,  $GG$ : goma guar,  $AL$ : alginato de sodio) a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ).

La Figura 4.32 revela el carácter elástico de las masas de pan del Diseño II, en donde los valores de  $G'$  son mayores que los valores de  $G''$  prácticamente en todo el

rango de frecuencias. El carácter viscoso ( $\tan \delta > 1$ ) se aprecia a valores mayores de frecuencia, después del punto de intersección entre las curvas que representan ambos módulos viscoelásticos.



**Figura 4.32.** Espectros mecánicos dinámicos de las masas de pan del Diseño II, a 25 °C y deformación constante ( $\gamma = 1\%$ ). Valores de  $G'$  ( $\blacktriangle$ ) y  $G''$  ( $\triangle$ ) en función de la frecuencia. a) GX: goma xántica, b) GG: goma guar, c) AL: alginato de sodio, d) GX+GG; e) GX+AL, f) GG+AL, g) GX+GG+AL.

Los valores de frecuencia en los que coinciden ambos módulos viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ) se muestran en la Tabla 4.20, en función del sustituto de gluten utilizado. Junto a estos se transcribieron los valores obtenidos en el Diseño I, para facilitar la comparación entre ambos.

**Tabla 4.20.** Valores de la frecuencia correspondientes a  $\text{Tan } \delta = 1$ , en función del sustituto de gluten para el Diseño II y su comparación con el Diseño I.

Diseño II Mezcla N°	Sustituto	Diseño II		Diseño I	
		$G' = G''$ (Pa)	f (Hz)	$G' = G''$ (Pa)	f (Hz)
1	GX	<b>2983</b>	50,2	<b>6840</b>	69,05
2	GG	<b>1756</b>	81,9	<b>8890</b>	71,7
3	AL	606	<b>52,8</b>	788	<b>25,8</b>
4	GX+GG	<b>2596</b>	<b>49,1</b>	<b>6920</b>	<b>91,8</b>
5*	GX+GG+AL	3517	49,9	3170	46,4
6	AL+GG	<b>634</b>	72,1	<b>3490</b>	84,9
7	GX+AL	4064	53,4	3650	50,5

\* Punto central del diseño experimental por triplicado.

GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

$G'$ : módulo de almacenamiento.  $G''$ : módulo de pérdida.

La combinación GG+AL y la goma guar sola permitieron mantener el carácter elástico prácticamente en todo el rango de frecuencia (72,1 Hz y 81,9 Hz; respectivamente); mientras que en las otras mezclas el carácter elástico se observó solamente para frecuencia menores a 50 Hz aproximadamente.

Cabe resaltar que, en relación con el Diseño I, la masa con alginato de sodio en el Diseño II permitió aumentar 100 % el rango de frecuencia (de 25,8 Hz a 52,8 Hz) para el comportamiento elástico. En contraste, la mezcla GX+GG (Diseño II) produjo la disminución en un 50 % del rango de frecuencia (de 91,8 Hz a 49,1 Hz). Estas y otras diferencias con el Diseño I (remarcadas en negrita en la Tabla 4.20) se atribuyen a la sustitución parcial de la harina nativa por harina gelatinizada y a la reducción de la cantidad de sustituto en la formulación de la masa.

El efecto de la harina gelatinizada sobre el comportamiento viscoelástico de la masa también fue señalado por Martínez (2012), quien encontró que los módulos  $G'$  y  $G''$  fueron independientes de la frecuencia en el rango de 0,01 a 15 Hz, cuando estudiaba las propiedades reológicas de harinas modificadas por extrusión.

Los cambios estructurales provocados por tratamientos hidrotérmicos o mecánicos, que causan la gelatinización del almidón (Bello, 2009; Slade y Levine, 1994), determinan la interacción entre este y los otros componentes de la mezcla, afectando significativamente el comportamiento viscoelástico de la masa.

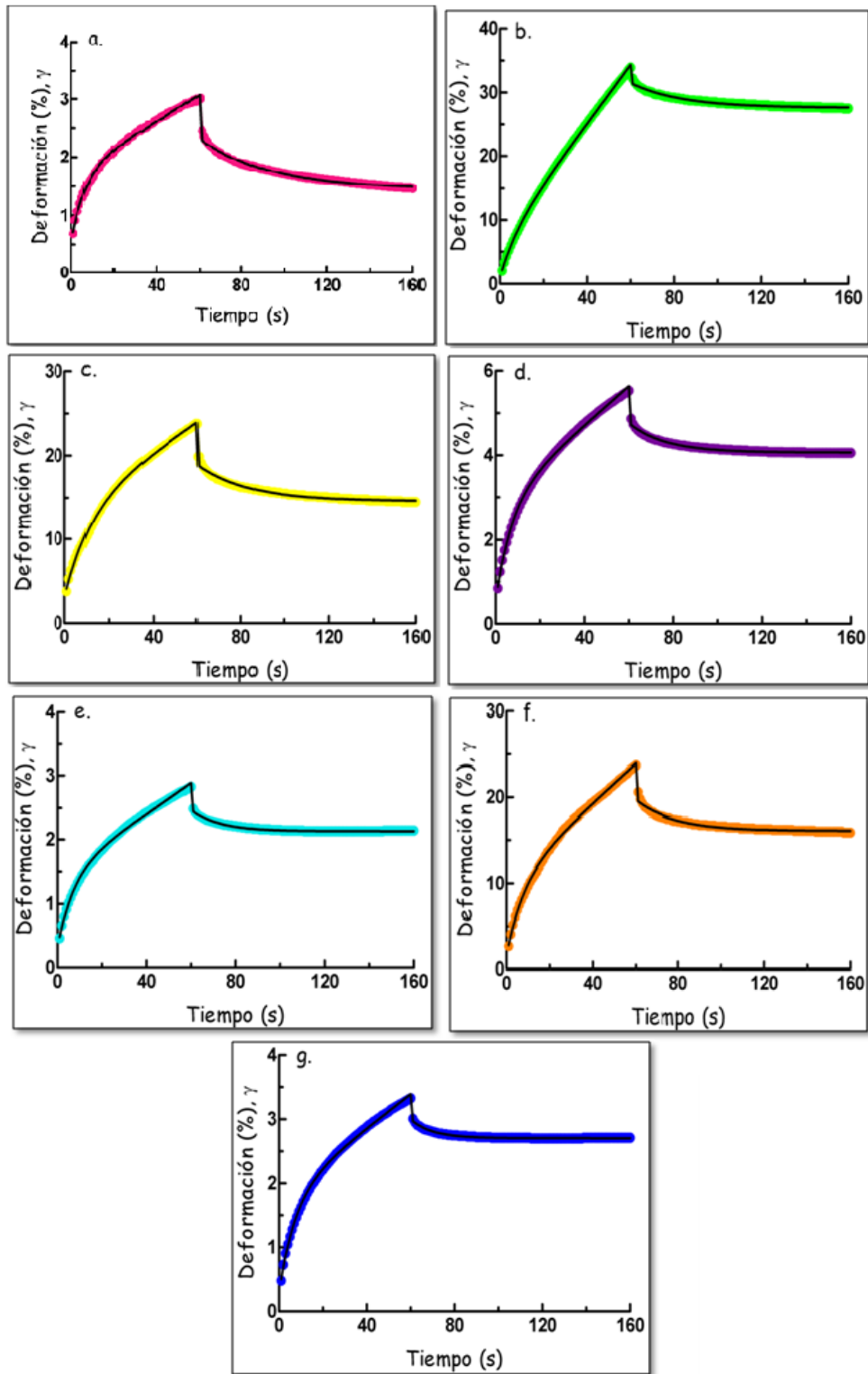
#### **4.5.2.1.c Prueba deformación-relajación (ensayo de Creep-Recovery) del Diseño II**

En la Figura 4.33 se muestran los resultados de los ensayos de "creep - recovery" (comportamiento viscoelástico) de las masas a base de harina nativa sustituida parcialmente (12,5 %) por harina gelatinizada, y con el agregado de diferentes sustitutos del gluten. Puede apreciarse el efecto significativo de los diferentes sustitutos de gluten sobre el comportamiento reológico de las masas.

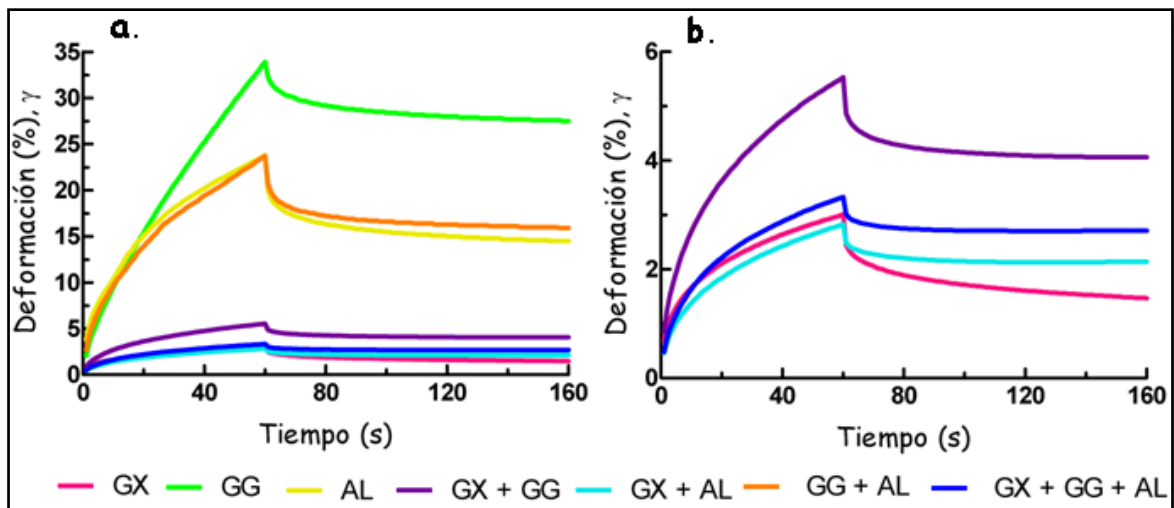
Para facilitar el análisis se muestran todas las curvas experimentales juntas en la Figura 4.34.a. Los resultados del ensayo de creep-recovery señalaron que la masa con goma guar ofreció la menor resistencia, mientras que las masas correspondientes a: GX, GX+AL y GX+GG+AL presentaron mayor resistencia. En la Figura 4.34.b se pueden visualizar mejor las diferencias entre las masas que presentan menor deformación. Se obtuvieron valores intermedios de deformación con las mezclas de GG+AL, AL y GX+GG (Figura 4.34 a y b).

En comparación con el Diseño I, donde para todas las mezclas la deformación porcentual resultó menor al 7 %, se obtuvo con el Diseño II (harina nativa parcialmente sustituida por harina gelatinizada) un amplio rango de porcentaje de deformación (valores entre 3 % y 35 %).

En el caso de la masa con goma guar (GG) se registró la mayor deformación porcentual (35 %), como consecuencia de la presencia de harina gelatinizada y de la cantidad de goma guar empleada, el efecto funcional de este aditivo resultó particularmente limitado.



**Figura 4.33.** Curvas del ensayo de deformación-relajación de las masas del Diseño II. Valores experimentales (en color) y predichos (—, ecs. 15 y 16): a) GX: goma xántica, b) GG: goma guar, c) AL: alginato de sodio, d) GX+GG, e) GX+AL, f) GG+AL, g) GX+GG+AL.



**Figura 4.34.** Curvas experimentales del ensayo de deformación-relajación de las masas del Diseño II: a) todas las mezclas, b) selección de mezclas en la región de baja deformación porcentual.

GX: goma xántica, GG: goma guar, AL: alginato de sodio.

En contraste, las masas con goma xántica (unitaria o combinada) mostraron una baja deformación (1,4-3,5 %) aunque la concentración del sustituto de gluten (4 g) se redujo a la mitad respecto del Diseño I. Este resultado refleja el efecto beneficioso que puede tener el agregado de harina gelatinizada combinada con determinados sustitutos de gluten, para la formación de una estructura elástica en la masa (Martínez, 2012).

En la Tabla 4.21 se presentan los parámetros y el ajuste muy satisfactorio ( $R^2 > 0,99$ ) proporcionado por el **modelo de Burger** (ecuaciones 15 y 16) para las masas del Diseño II. Además, se puede visualizar en la Figura 4.33 la excelente correspondencia entre los valores experimentales y predichos.

Los valores de  $J_0$  y  $J_m$  estuvieron comprendidos entre  $(2,9-30,71) \times 10^{-4} \text{ 1/Pa}$  y entre  $(11,36-107,14) \times 10^{-4} \text{ 1/Pa}$ , respectivamente; siendo la deformación mayor en la masa con alginato de sodio (aproximadamente 3,6 veces mayor en relación con el Diseño I).

Tabla 4.21. Parámetros del modelo de Burger (ecs. 15 y 16) para las masas de pan del Diseño II.

Fase "Creep"						
Mezcla N°	Mezcla	$J_0$ (1/Pa $\times 10^{-4}$ )	$J_m$ (1/Pa $\times 10^{-4}$ )	$\lambda$ (s)	$\mu_0$ (Pa.s)	$R^2$
1	GX	5,19 <sup>a</sup>	11,93 <sup>ab</sup>	6,37 <sup>a</sup>	44358 <sup>cd</sup>	0,9990 <sup>a</sup>
2	GG	10,43 <sup>b</sup>	55,69 <sup>bc</sup>	7,93 <sup>ab</sup>	2162,1 <sup>a</sup>	0,9998 <sup>a</sup>
3	AL	30,71 <sup>c</sup>	107,14 <sup>c</sup>	12,28 <sup>b</sup>	5897 <sup>a</sup>	0,9996 <sup>a</sup>
4	GX+GG	5,38 <sup>a</sup>	23,22 <sup>ab</sup>	7,29 <sup>ab</sup>	21592 <sup>b</sup>	0,9994 <sup>a</sup>
5*	GX+GG+AL	2,91 <sup>a</sup>	15,09 <sup>ab</sup>	7,51 <sup>ab</sup>	37704 <sup>c</sup>	0,9994 <sup>a</sup>
6	AL+GG	16,00 <sup>b</sup>	84,04 <sup>bc</sup>	8,03 <sup>ab</sup>	4299 <sup>a</sup>	0,9992 <sup>a</sup>
7	GX+AL	3,02 <sup>a</sup>	11,36 <sup>a</sup>	7,02 <sup>ab</sup>	41370 <sup>d</sup>	0,9991 <sup>a</sup>
Fase "Recovery"						
Mezcla N°	Mezcla	$J_0$ (1/Pa) $\times 10^{-4}$	$J_m$ (1/Pa) $\times 10^{-4}$	$\lambda$ (s)	$J_{max}$ (1/Pa) $\times 10^{-3}$	$R^2$
1	GX	7,02 <sup>a</sup>	8,5 <sup>a</sup>	33,08 <sup>c</sup>	3,01 <sup>a</sup>	0,9933 <sup>bc</sup>
2	GG	23,51 <sup>b</sup>	38,86 <sup>b</sup>	23,26 <sup>bc</sup>	33,87 <sup>c</sup>	0,9898 <sup>b</sup>
3	AL	48,15 <sup>c</sup>	43,34 <sup>b</sup>	23,47 <sup>bc</sup>	23,75 <sup>b</sup>	0,9872 <sup>b</sup>
4	GX+GG	7,63 <sup>a</sup>	6,96 <sup>a</sup>	16,32 <sup>b</sup>	5,53 <sup>a</sup>	0,9908 <sup>bc</sup>
5*	GX+GG+AL	3,29 <sup>a</sup>	2,915 <sup>ab</sup>	9,85 <sup>a</sup>	3,33 <sup>a</sup>	0,9950 <sup>c</sup>
6	AL+GG	39,50 <sup>bc</sup>	36,29 <sup>ab</sup>	18,21 <sup>b</sup>	23,67 <sup>b</sup>	0,9825 <sup>a</sup>
7	GX+AL	3,53 <sup>a</sup>	3,41 <sup>a</sup>	12,15 <sup>a</sup>	2,83 <sup>a</sup>	0,9953 <sup>c</sup>

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

$J_0$ : complianza instantánea,  $J_m$ : complianza elástica retardada,  $\lambda$ : tiempo de retardo,  $\mu_0$ : es la viscosidad estacionaria,  $J_{max}$ : máxima deformación.

GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.



De la Tabla 4.21 resulta el siguiente orden decreciente de viscosidades:  $GX > GX+AL > GX+GG+AL > GX+GG > AL > GG+AL > GG$ ; mientras que para la complianza instantánea ( $J_0$ ) fue:  $AL > GG+AL > GG > GX+GG > GX > GX+AL > GX+GG+AL$ . Para la complianza retardada ( $J_m$ ) se encontró un orden similar a  $J_0$  salvo por los tres últimos puntos de la lista ( $GX+GG+AL > GX > GX+AL$ ).

Al igual que en el Diseño I, los valores del tiempo de retardo medio ( $\lambda$ ) en la fase de creep (deformación) resultaron mayores al del control ( $GX$ ).

Durante la fase de relajación los tiempos de retardo se incrementaron significativamente entre 9,85-33,08 s, respecto a los de la fase de creep (6,37-12,28 s), siendo el efecto similar al observado en el Diseño I.

Entre todos los sustitutos estudiados la goma xántica exhibe la menor complianza ( $J_m$ ) y la mayor viscosidad de corte estacionaria ( $\mu_0$ ).

La contribución relativa de cada complianza a la complianza total, para las masas examinadas, se encontró dentro de los siguientes rangos: 16-30 % para  $J_0$ ; 70-84 % para  $J_m$ ; y resultó despreciable para la componente viscosa. Estos resultados coinciden con lo reportado para el Diseño I, lo cual indicaría que la harina gelatinizada puede utilizarse como constituyente de un sustituto de gluten eficaz.

#### 4.5.2.2. Volumen del pan del Diseño II

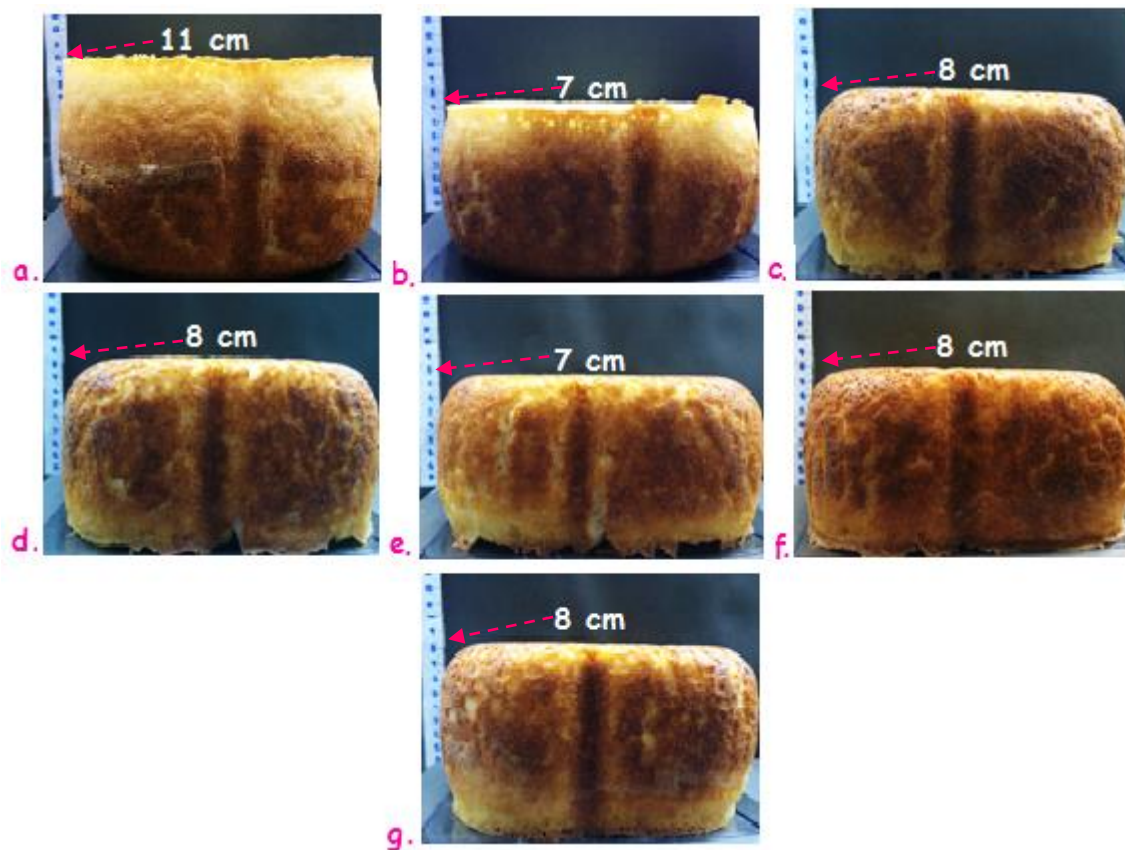
En la Figura 4.35 se muestran los panes de molde elaborados según el Diseño II, en donde se empleó una mezcla de harina nativa y gelatinizada, a la que se agregaron los sustitutos propuestos (goma xántica, goma guar y alginato de sodio) solos o combinados (en mezclas binarias o ternaria).

Visualmente todos los panes presentaron muy buen aspecto; por su mayor volumen se destaca el pan obtenido con goma xántica, y por su color más intenso el pan elaborado con goma guar y alginato (aunque con menor volumen).

En la Tabla 4.22 se observan los valores de volumen de los panes elaborados según el Diseño II para los diferentes sustitutos de gluten estudiados.

El pan elaborado con la goma xántica presentó el mayor volumen, seguido por los panes obtenidos con goma xántica - goma guar y con goma xántica - alginato de sodio ( $GX+AL$ ), los cuales resultaron similares en volumen. Los panes que contenían goma

guar sola o combinada con alginato de sodio fueron los de menor volumen; en estos casos se encontró una disminución significativa ( $p < 0,05$ ) del 31 %, en comparación con el pan de mayor volumen (elaborado con goma xántica).



**Figura 4.35.** Panes de molde elaborados según el Diseño II. a) GX: goma xántica, b) Al: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+AL, e) GX+GG+AL, f) GG+AL, g) GX+GG.

**Tabla 4.22.** Volumen de los panes de molde del Diseño II.

Diseño I Mezcla N°	Sustituto	Volumen (ml)	Volumen/masa <sup>a</sup> (ml/g)
1	GX	1644 ± 82 <sup>d</sup>	4,3
2	GG	1136 ± 57 <sup>a</sup>	3,0
3	AL	1264 ± 63 <sup>b</sup>	3,3
4	GX+GG	1433 ± 72 <sup>c</sup>	3,7
5*	GX+GG+AL	1283 ± 64 <sup>b</sup>	3,3
6	AL+GG	1132 ± 57 <sup>a</sup>	2,9
7	GX+AL	1426 ± 71 <sup>c</sup>	3,7

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. <sup>a</sup>masa de harina: 384 g  
GX: goma xántica; GG: goma guar; AL: alginato de sodio.

Los resultados obtenidos (Tabla 4.22), en términos de volumen por unidad de masa de harina, son comparables al valor promedio (3,9 ml/g) informado por Aoki y colaboradores (2015) para pan a base de arroz.

Si se contraponen los resultados del Diseño II con los del Diseño I se encuentra que los máximos volúmenes de pan, en ambos experimentos, fueron similares ( $1644 \pm 82$  ml vs  $1622 \pm 81$  ml del Diseño I) aunque se obtuvieron usando diferentes sustitutos. En el caso de la harina nativa (Diseño I) se requirió una combinación de GX y GG, mientras que para la mezcla de harinas nativa y gelatinizada (12,5 % del total de harina) bastó con el uso de goma xántica, puesto que la harina gelatinizada actuó como sustituto no convencional. Se debe destacar que en el Diseño II se empleó una cantidad de sustituto de gluten 50 % menor al usado en el Diseño I.

#### **4.5.2.2.a Relación entre el volumen del pan y la viscosidad de la masa del Diseño II**

Para evaluar la relación entre las propiedades reológicas de la masa, determinadas en la sección 4.5.2.1, y el volumen del pan (VP), se realizó el análisis de correlación mediante la matriz de Pearson, encontrándose una correlación significativa y positiva ( $r = 0,91$ ;  $p < 0,01$ ) entre la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ) determinada en el ensayo de creep y VP, como se visualiza en la Figura 4.36. Si estos resultados se combinan con los hallados en el Diseño I (Figura 4.37) se obtiene una relación no lineal entre  $\mu_0$ -VP, la cual ajusta ( $R^2 = 0,73$ ) a un modelo polinómico de segundo grado, del mismo modo que se expuso para el Diseño I solamente (sección 4.5.1.2.a).

El volumen de pan aumenta con la disminución de la consistencia (entre 100000 Pa.s y ~60000 Pa.s) de la masa, pero solo hasta una viscosidad crítica de ~60000 Pa.s. Una consistencia baja de la masa, menor a la viscosidad crítica de ~60000 Pa.s, condujo a la disminución en el volumen del pan, porque la estructura de red formada por los sustitutos del gluten es incapaz de retener el gas durante su expansión, particularmente en el horneado. Estos resultados son coincidentes con la investigación de Ronda y colaboradores (2015), quienes informaron valores de viscosidad estacionaria para masas a base de arroz entre 31000-660000 Pa.s y volúmenes de pan menores a 564 ml.

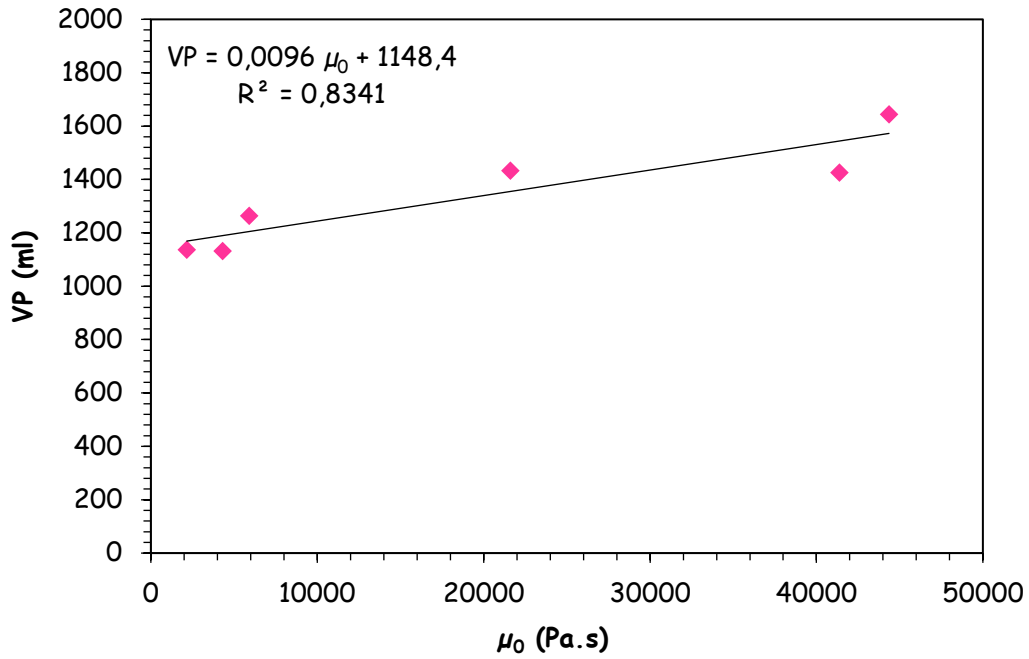


Figura 4.36. Relación entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del Diseño II.

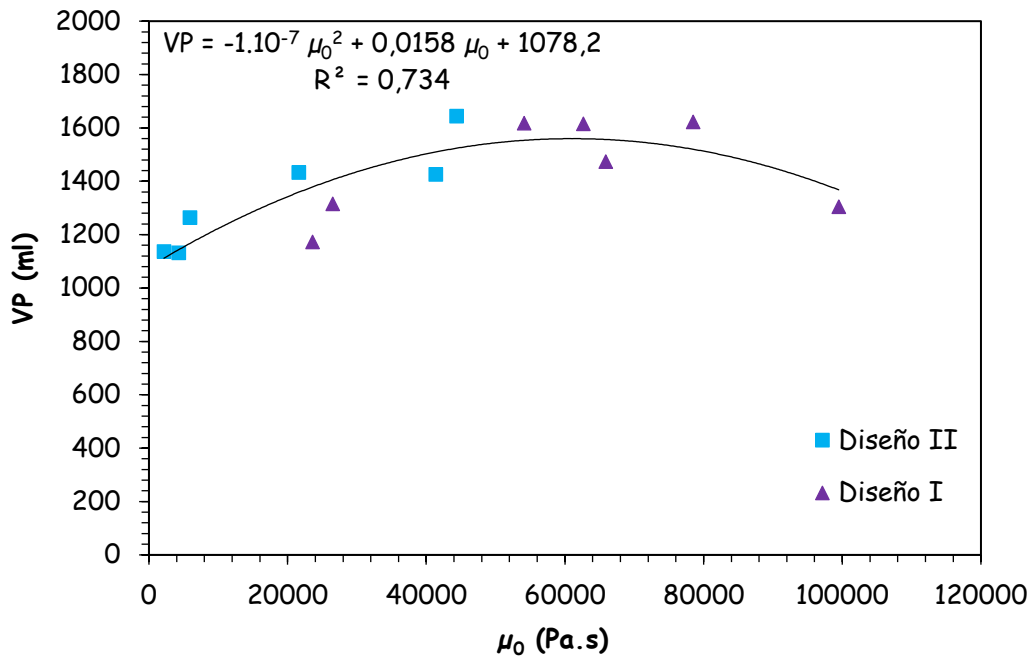


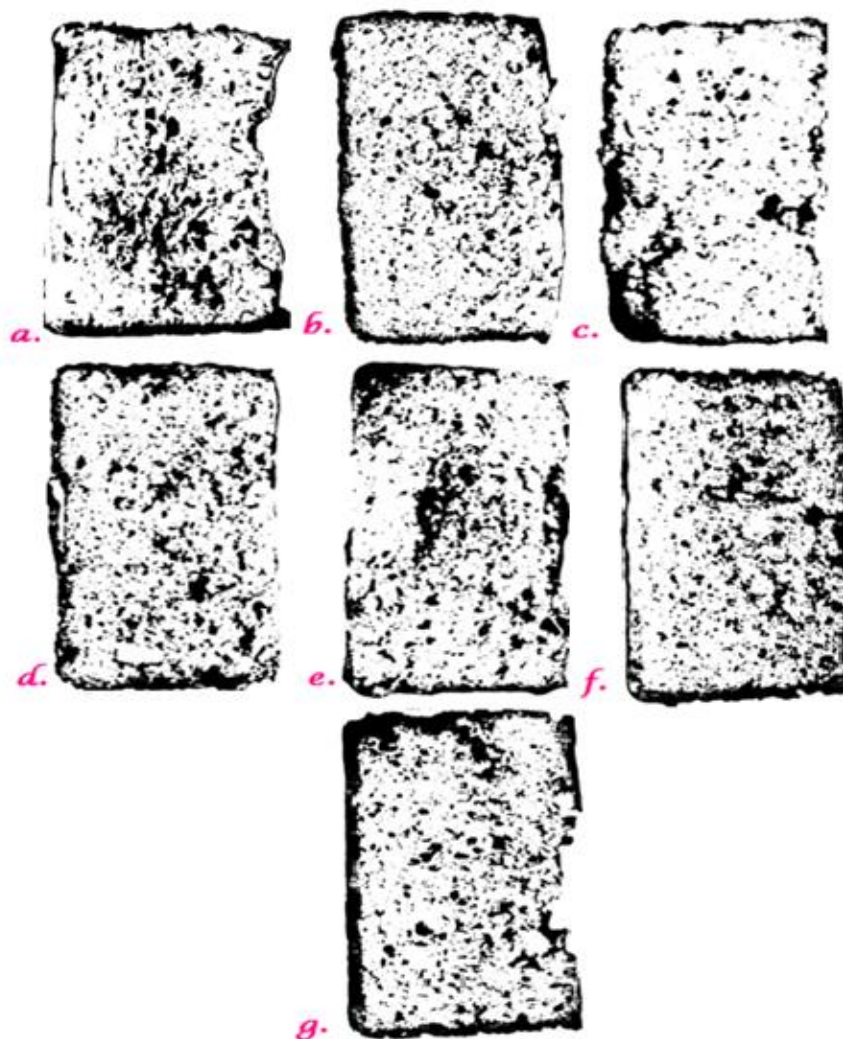
Figura 4.37. Relación entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa ( $\mu_0$ ), del Diseño I y II combinados.

#### 4.5.2.3. Medición del alveolado del pan del Diseño II

En la Figura 4.38 se muestra la sección transversal de los panes de molde elaborados a base de una mezcla de harinas (nativa y gelatinizada) y varias combinaciones de sustitutos de gluten evaluadas: goma xántica, goma guar y alginato de sodio; según el Diseño II. Se aprecia a simple vista que el tamaño de los alvéolos varía de acuerdo con el sustituto empleado. Las imágenes escaneadas de las rodajas fueron binarizadas (Figura 4.39) para obtener los parámetros característicos mediante análisis de imágenes.



**Figura 4.38.** Sección transversal de los panes elaborados con mezcla de harina nativa y gelatinizada y diferentes sustitutos de gluten en función del Diseño II. a) GX: goma xántica, b) Al: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+AL, e) GX+GG+AL, f) GG+AL, g) GX+GG.



**Figura 4.39.** Sección transversal (imagen binarizada) de los panes elaborados con mezcla de harina nativa y gelatinizada y diferentes sustitutos de gluten en función del Diseño II. a) GX: goma xántica, b) Al: alginato de sodio, c) GG: goma guar, d) GX+AL, e) GX+GG+AL, f) GG+AL, g) GX+GG.

Los resultados del análisis de imágenes se resumen en la Tabla 4.23. Los valores del porcentaje del área alveolar (13-25 %) fueron comparables a los del Diseño I (18-29 %) así como también los valores del área alveolar promedio (Diseño I: 1,20-2,79 mm<sup>2</sup>/alvéolo, Diseño II: 1,07-2,07 mm<sup>2</sup>/alvéolo). Sin embargo, la densidad alveolar resultó más acotada en el caso del Diseño II (11,4-18,8 alvéolos/cm<sup>2</sup>) en comparación con el Diseño I (6,8-21,7 alvéolos/cm<sup>2</sup>), denotando mayor homogeneidad entre las rodajas del Diseño II, tal como se visualiza en la Figura 4.39. Como consecuencia de la presencia de harina gelatinizada en las mezclas del Diseño II se requiere una mayor

cantidad de agua respecto del Diseño I. Al incrementar la cantidad de agua se observó una reducción de la densidad alveolar y un aumento del área alveolar para los panes elaborados con goma xántica (GX) y goma guar (GG), en concordancia con lo informado por Encina-Zelada y colaboradores (2018), quienes estudiaron el efecto de la concentración de agua y de goma xántica en las propiedades de panes sin gluten a base de arroz, maíz y quinua.

**Tabla 4.23.** Parámetros característicos del alveolado de los panes de molde elaborados en función del Diseño II.

Diseño II Mezcla N°	Sustituto	A (%)	área alveolar promedio (mm <sup>2</sup> /alvéolo)	Densidad alveolar (alvéolos/cm <sup>2</sup> )
1	GX	25,37 ± 0,18 <sup>e</sup>	2,07 <sup>e</sup>	12,6 <sup>b</sup>
2	GG	21,69 ± 0,35 <sup>c</sup>	1,52 <sup>d</sup>	14,3 <sup>c</sup>
3	AL	12,96 ± 0,07 <sup>a</sup>	1,20 <sup>b</sup>	11,4 <sup>a</sup>
4	GX+GG	20,46 ± 0,36 <sup>b</sup>	1,28 <sup>c</sup>	15,6 <sup>c</sup>
5*	GX+GG+AL	21,42 ± 0,41 <sup>c</sup>	1,15 <sup>a</sup>	18,7 <sup>e</sup>
6	AL+GG	22,98 ± 0,77 <sup>d</sup>	1,22 <sup>b</sup>	18,8 <sup>e</sup>
7	GX+AL	18,28 ± 0,86 <sup>b</sup>	1,07 <sup>a</sup>	17,4 <sup>d</sup>

\* Punto central del diseño experimental por triplicado. A: porcentaje del área alveolar. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

GX: goma xántica; AL: alginato de sodio; GG: goma guar.

#### 4.5.2.4. Optimización de la formulación del pan correspondiente al Diseño II

Los parámetros de calidad del pan de molde, volumen del pan (VP) y porcentaje de área alveolar (A, %), fueron modelados en función de la composición de las mezclas (ec. 11), encontrándose efectos significativos ( $p < 0,05$ ) de todos los ingredientes funcionales, tal como se observa en la Tabla 4.24, junto con los coeficientes del polinomio de segundo grado.

La relación entre el volumen del pan y la composición de la mezcla fue representada satisfactoriamente por un modelo cuadrático, del mismo modo que el porcentaje de área alveolar. Para ambos parámetros de calidad se obtuvo un ajuste satisfactorio de los datos ( $R^2 > 0,95$ ), siendo significativos los efectos de interacción binarios entre los sustitutos del gluten, como se muestra en la Tabla 4.24.

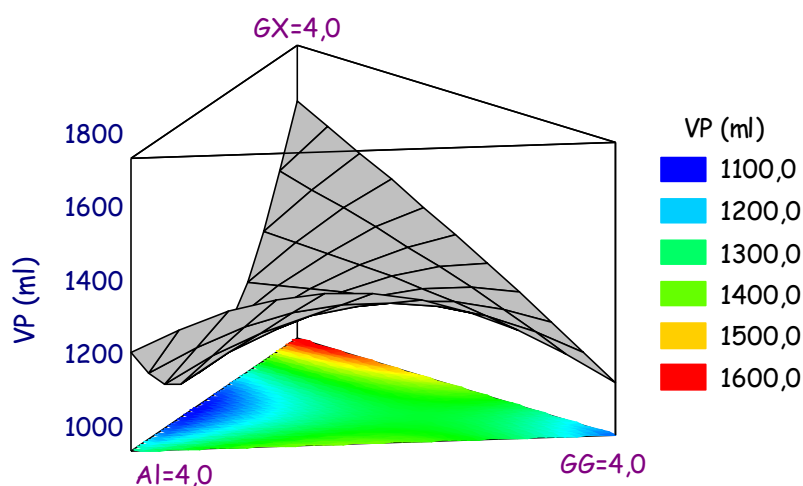
**Tabla 4.24.** Efecto de los sustitutos del gluten sobre los parámetros de calidad del pan del Diseño II, en términos de los factores sin codificar: goma xántica (GX), alginato de sodio (AL) y goma guar (GG).

<b>Coefficientes</b> (ec. 11)	<b>VP</b> (ml)	<b>A</b> (%)
GX	412,20	6,33
AL	317,20	3,23
GG	285,20	5,41
GX-AL	-86,48*	-0,08 NS
GX-GG	4,77 NS	-0,65*
AL-GG	50,52*	1,47*
GX-AL-GG	---	---
$R^2$	0,9533	0,9945

\* Significativo para  $p < 0,05$ ; NS: coeficiente no significativo; ---: coeficiente eliminado.

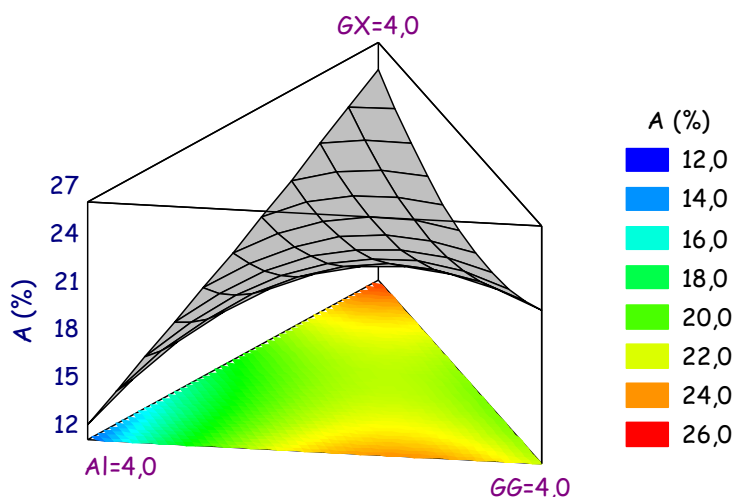
VP: volumen del pan, A: porcentaje del área alveolar.

La Figura 4.40 y la Figura 4.41 muestran las superficies predichas (ec. 11) del volumen del pan (VP) y del porcentaje del área alveolar (A, %) respectivamente, en función de la composición de la mezcla. Puede apreciarse claramente el efecto positivo que tiene sobre ambos parámetros de calidad el incremento de la goma xántica.



**Figura 4.40.** Superficie de respuesta predicha del volumen del pan (VP) en función de la composición de la mezcla para el Diseño II. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 4 %).





**Figura 4.41.** Superficie de respuesta predicha del porcentaje del área alveolar (A) en función de la composición de la mezcla para el Diseño II. GX: goma xántica, AL: alginato de sodio y GG: goma guar; (0 - 4 %).

En la Tabla 4.25 se presentan los resultados de la optimización, obtenidos a partir de cada una de las superficies de respuesta. Se informan en dicha tabla los valores máximos y mínimos de los parámetros de calidad del pan de molde y la composición de la mezcla respectiva. Los valores máximos de VP (1649 ml) y A (25,32 %) correspondieron a la mezcla con goma xántica (4 g). En contraste, el mínimo valor de A (12,91 %) fue para la mezcla con alginato (4 g) mientras que hubo sinergia al combinar la goma xántica y el alginato de sodio, observándose el valor mínimo de VP (1087 ml) para AL/GX: 1,76.

**Tabla 4.25.** Valores máximos y mínimos predichos de los parámetros de calidad del pan de molde en función del Diseño II de mezclas.

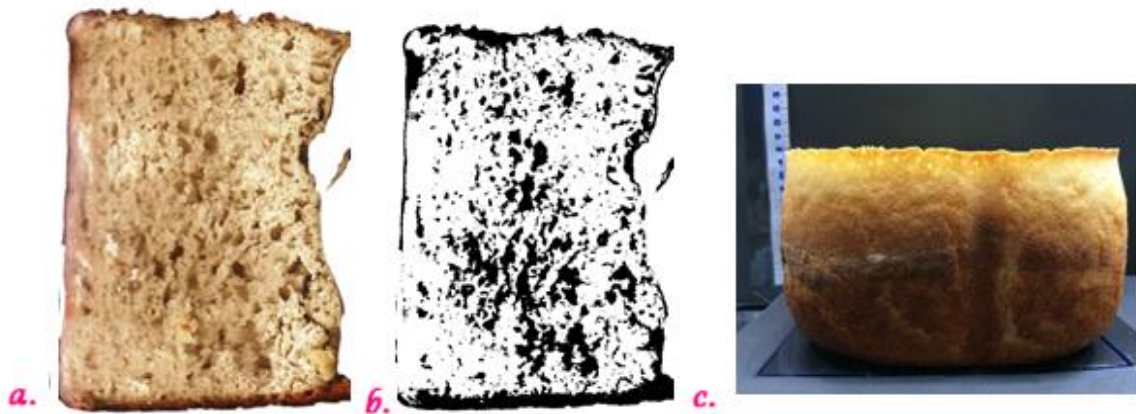
Parámetros de calidad		GX (g)	AL (g)	GG (g)
VP (ml)	máx	1648,78	4,0	0
	min	1086,78	1,45	2,55
A (%)	max	25,32	4,0	0
	min	12,91	0	4,0

GX: goma xántica, AL: alginato de sodio, GG: goma guar,  
VP: volumen del pan, A: porcentaje del área alveolar.

Los resultados encontrados reflejan la eficacia del uso de la harina gelatinizada como ingrediente funcional en panificados, la cual es capaz de potenciar la acción de los sustitutos de gluten tradicionales. Esta harina gelatinizada, obtenida a partir de arroz parbolizado (arroz tratado hidrotérmicamente), se presenta como una alternativa al uso de almidones modificados químicamente, los cuales han sido propuestos como sustitutos de gluten por Ziobro y colaboradores (2012) para la elaboración de panes sin gluten.

Para verificar el óptimo se repitió la elaboración de pan de molde con 4 g de goma xántica obteniéndose un volumen de 1565 ml y 25 % para el porcentaje del área alveolar. De esta forma se corroboraron satisfactoriamente los valores predichos mediante el método de diseño de mezclas.

En la Figura 4.42 se exhibe el aspecto del pan obtenido, así como la apariencia de la miga a partir de la imagen escaneada y la imagen binarizada correspondiente.



**Figura 4.42.** Imágenes del pan obtenido con la formulación óptima del Diseño II. a) Corte transversal del pan (rodaja); b) Imagen binarizada de la rodaja de pan; c) Pan de molde.

#### 4.5.3. Caracterización de los panes óptimos obtenidos en los Diseños I y II

Con el propósito de conocer en forma más detallada la calidad de los panes de molde obtenidos en las condiciones óptimas, los mismos se sometieron a diferentes análisis complementarios, a fin de determinar el color de la corteza, la humedad y la textura de la miga.

#### 4.5.3.1. Color de la corteza

Se analizó el color de la corteza de los panes obtenidos mediante las formulaciones óptimas predichas de cada uno de los diseños de mezcla (Diseño I, GX: 3,3 g y GG: 4,67 g; Diseño II, GX: 4 g), utilizando un fotocolorímetro. En la Figura 4.43 se representa la percepción del color del ojo humano en términos de dos parámetros CIE, x e y, encontrándose en la gama del naranja-rosado el color de la corteza de ambos óptimos.

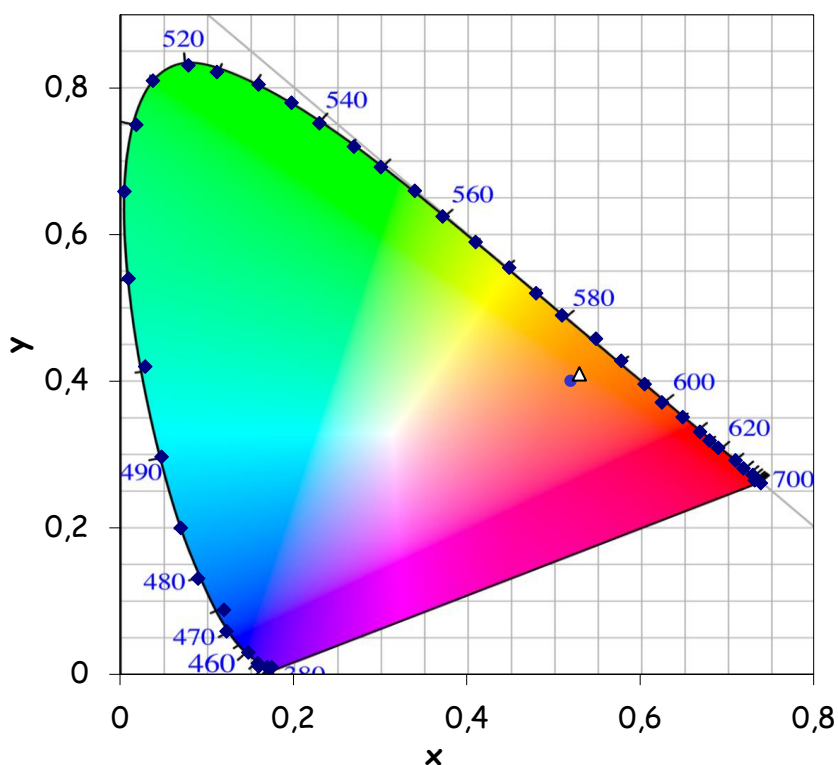


Figura 4.43. Diagrama de cromaticidad CIE (L\*a\*b\*). Diseño I (●) y Diseño II (Δ)

En la Tabla 4.26. se muestran los resultados de la determinación del color de los panes del Diseño I y del Diseño II, donde se evidencia que los valores de L\*, a\* y b\* del Diseño I son menores en comparación con los del Diseño II, siendo la corteza del primero más oscura.

El oscurecimiento de la corteza, que se debe a las reacciones de Maillard y de caramelización, influenciadas con la presencia de azúcares reductores y aminoácidos, es un efecto deseado en el producto final (Kent y Evers, 1994), ya que los panes sin

gluten tienden a obtener valores de luminosidad mayores ( $L^*$ ), es decir una corteza más clara que los panes elaborados con trigo (Gallagher y Gormley, 2002).

**Tabla 4.26.** Propiedades del color de la corteza de los panes de molde de las formulaciones óptimas predichas del Diseño I y II.

Diseño	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^*$
I	$24,53 \pm 0,78^a$	$17,72 \pm 0,25^a$	$25,51 \pm 0,71^a$	$31,07 \pm 0,69^a$	$55,16 \pm 0,51^a$
II	$31,97 \pm 0,72^b$	$21,22 \pm 0,29^b$	$33,64 \pm 0,41^b$	$39,77 \pm 0,48^b$	$55,31 \pm 0,57^a$

Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

El valor de la saturación o croma ( $C^*$ ) de la corteza fue significativamente menor en el Diseño I, lo que representa un color más apagado (menos brillante). Valores similares a los del Diseño I fueron obtenidos por Martínez (2012), quien empleó harinas de arroz extruidas a diferentes temperaturas, humedad y granulometría.

Sin embargo, no se evidenció diferencia en el matiz ( $\Delta h \approx 0$ ), lo que sugieren que tanto el óptimos del Diseño I como el del Diseño II presentaron el mismo tono.

#### 4.5.3.2. Contenido de humedad de la miga

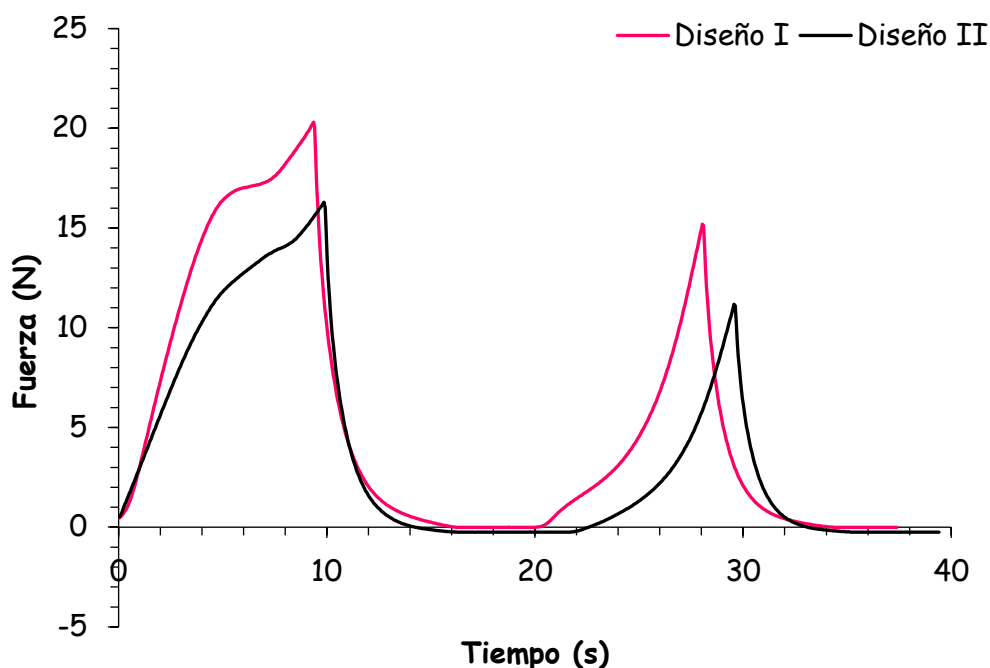
La humedad de la miga del Diseño I fue de  $53,247 \pm 1,041$  b.s. y la del Diseño II de  $60,837 \pm 4,410$  b.s., encontrándose una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ). La miga del Diseño II conservó mayor humedad debido a que la formulación contiene harina de arroz gelatinizada (12,5 %), la cual presenta una capacidad de absorción de agua superior, por consiguiente, la masa se elaboró con un 24,25 % más de agua (Diseño I: 400 ml de agua; Diseño II: 497 ml de agua).

Los valores de humedad de la miga encontrados en el presente trabajo son similares a los informados en bibliografía para panes libres de gluten (Ronda y col., 2015; Gambús y col., 2007).

#### 4.5.3.3. Perfil de textura de la miga

El análisis del perfil de textura (TPA) es un método objetivo, correlacionado con el análisis sensorial de la textura. El ensayo comprende la compresión de la miga del pan dos veces seguidas, imitando el proceso de masticación.

En la Figura 4.44, se muestra el perfil de textura de las migas de los panes óptimos del Diseño I y del Diseño II, observándose perfiles similares con diferentes intensidades de fuerza. Asimismo, puede apreciarse ausencia de adhesividad en ambos casos (ausencia de fuerza negativa).



**Figura 4.44.** Perfil de textura de la miga del pan de los óptimos correspondientes a cada diseño de mezclas.

En la Tabla 4.27 se muestran los parámetros de textura característicos de la miga, correspondientes a los óptimos predichos del Diseño I y del Diseño II.

**Tabla 4.27.** Análisis del perfil de textura de la miga del pan de los óptimos de cada diseño de mezclas.

Diseño	Dureza 1	Dureza 2	Elasticidad	Cohesividad	Gomosidad	Masticabilidad
I	20,96 ± 0,85 <sup>b</sup>	15,22 ± 0,66 <sup>b</sup>	0,81 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,29 ± 0,01 <sup>b</sup>	6,01 ± 0,28 <sup>b</sup>	4,89 ± 0,24 <sup>b</sup>
II	16,90 ± 0,79 <sup>a</sup>	11,38 ± 0,49 <sup>a</sup>	0,75 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,24 ± 0,01 <sup>a</sup>	3,98 ± 0,19 <sup>a</sup>	3,00 ± 0,16 <sup>a</sup>

Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ( $p < 0,05$ ).

Los valores medios de los parámetros de TPA fueron analizados estadísticamente, hallándose que la dureza de la miga del pan óptimo del Diseño II fue menor en relación con el Diseño I, esto se puede atribuir al mayor porcentaje de humedad presente en la miga del Diseño II (Ronda y col., 2015).

Otros investigadores (Gómez y col., 2008) encontraron una correlación entre la dureza de los panes y su volumen. No obstante, en este trabajo ambos diseños presentaron volúmenes similares, aunque difirieron en dureza, posiblemente debido a las diferencias en la composición de la mezcla (contenido de harina gelatinizada, contenido de agua y contenido de goma).

A su vez, se evidenció que la miga del Diseño II presentó menores valores de elasticidad y de cohesividad en comparación al Diseño I.

En este sentido, McCarthy y colaboradores (2005) relacionaron un pan de alta calidad y buen grado de frescura con una mayor elasticidad de la miga, puesto que un pan con valores bajos de elasticidad tiende a desmigajarse, similar a lo que ocurrió con la miga del pan óptimo del Diseño II.

De igual modo, la gomosidad y la masticabilidad del óptimo del Diseño II fueron considerablemente menores, puesto que la primera es el producto entre la dureza y la cohesividad y la segunda entre la gomosidad y la elasticidad, siendo todas estas propiedades texturales inferiores a las del Diseño I.

En resumen, los panes de molde elaborados con reemplazo parcial de la harina nativa por harina gelatinizada y goma xántica (GX: 4 g) manifiestan una corteza más clara y una miga con mayor humedad y menor dureza, aunque con tendencia a desmigajarse, en relación con los panes de moldes elaborados íntegramente con harina nativa y una combinación adecuada de gomas (GX: 3,3 g y GG: 4,67 g). Los resultados hallados reflejan la eficacia del uso de la harina gelatinizada como ingrediente funcional en panificados, la cual es capaz de potenciar la acción de los sustitutos tradicionales del gluten. Esta harina gelatinizada se presenta como una alternativa al uso de almidones modificados químicamente.

## 5. Conclusiones

*“Hay que luchar por los sueños, pero hay que saber también que, cuando ciertos caminos resultan imposibles, es mejor conservar las energías para recorrer otros caminos.”*

Paulo Coelho.

### **5.1. Caracterización de las harinas de arroz estudiadas**

- Cuando las harinas se evaluaron por tamizado (D50) se halló que SM y HM550 presentaron baja granulometría (135-156  $\mu\text{m}$ ), SP y K presentaron granulometría intermedia (177-220  $\mu\text{m}$ ), mientras que GE presentó la mayor granulometría (313  $\mu\text{m}$ ). Salvo SM todas mostraron distribuciones multimodales más o menos dispersas.
- Se encontró una correspondencia entre los parámetros de la distribución del tamaño de partículas obtenidos por tamizado y por difracción láser. Esta última técnica permitió detectar fracciones de menor tamaño (D50 = 75  $\mu\text{m}$ ), debido al efecto desaglomerante provocado por la dispersión húmeda de la muestra.
- De las propiedades térmicas se pudo inferir que se trata de harinas nativas (SM, SP, K) y parcialmente gelatinizada (HM550), con baja temperatura de gelatinización (menor a 70 °C), o totalmente gelatinizada (GE).
- Las propiedades de hidratación mostraron diferencias significativas al comparar las harinas de arroz nativas y las harinas de arroz gelatinizadas. Las harinas gelatinizadas presentaron mayor capacidad de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento.

### **5.2. Efecto de la granulometría sobre el alveolado y el volumen del pan de molde**

- Los resultados demostraron que la calidad del pan de molde depende significativamente de la granulometría de la harina, obteniéndose los mejores resultados con las harinas que presentaron distribuciones multimodales de mayor dispersión.
- El análisis digital de imágenes permitió cuantificar satisfactoriamente el porcentaje alveolar, constituyendo un método rápido y fácil de implementar, que puede resultar de interés para la industria panadera.
- Por proporcionar mayores valores de volumen (1362 ml) y de alveolado del pan (33,4 %), la harina comercial Kapac (K) resultó la más apta para la elaboración de un pan de molde de calidad satisfactoria, por lo que fue seleccionada para los estudios posteriores.



### **5.3. Efecto de la sustitución parcial de la harina nativa con harina gelatinizada sobre el volumen y el alveolado del pan de molde**

- De los resultados obtenidos se concluyó que el porcentaje más conveniente de sustitución con harina gelatinizada es 12,5 %; dado que proporciona: a) un volumen de masa compatible con la capacidad del horno eléctrico; b) un volumen de pan aceptable; c) un pan sin irregularidad de forma, perfectamente cocido y homogéneo, con coloración y apariencia satisfactorias; d) un buen porcentaje de área alveolar y un alveolado uniforme.

### **5.4. Selección de los sustitutos del gluten y su efecto sobre la calidad de los panes**

- Entre los seis sustitutos del gluten evaluados la HPMC y la goma espina corona no fueron aceptables, por producir una estructura colapsada y una miga con alveolado heterogéneo.
- Por su efecto positivo en el volumen del pan y en los parámetros característicos del alveolado, se seleccionaron la goma xántica (adoptada como referencia) y la goma guar. Asimismo, se escogió alginato de sodio, por proporcionar la mayor área alveolar promedio.
- Con respecto a la harina de arroz gelatinizada (GE), fue elegida por su bajo costo y por su aptitud para promover, en ausencia de hidrocoloides, un buen volumen del pan y una densidad alveolar elevada.

### **5.5. Optimización de las formulaciones de acuerdo con la reología de la masa y la calidad del pan**

#### **5.5.1. Diseño I**

- La evaluación reológica de las masas, mediante el barrido de frecuencia, evidenció el carácter elástico de todas las muestras, y el efecto significativo de la composición de la mezcla sobre el espectro mecánico de estas. Dicho efecto refleja las interacciones específicas entre cada sustituto y los componentes de la harina.

- Los resultados señalaron que las masas con menor resistencia, y por lo tanto menor capacidad para producir una estructura firme y retener gas, fueron las elaboradas con alginato de sodio; mientras que las que ofrecieron mayor resistencia fueron las masas con goma xántica y la mezcla binaria goma xántica-goma guar.
- El comportamiento viscoelástico de la masa durante el ensayo de creep-recovery pudo simularse satisfactoriamente para ambas fases de la prueba, mediante el modelo de Burger. También en este ensayo la formulación con goma xántica fue la más elástica, encontrándose el siguiente orden:  $GX > GX+GG > GG > GX+AL$ ,  $GX+AL+GG > AL+GG > AL$ .
- Del análisis de optimización mediante el diseño de mezclas resultó que la formulación óptima correspondió a una combinación de goma xántica (3,33 g) y goma guar (4,67 g). Este resultado evidenció el efecto sinérgico al combinar las gomas. En contraste, la incorporación de alginato de sodio en la mezcla no fue beneficiosa para el producto. La mezcla óptima produjo los máximos valores de volumen (1563 ml) y alveolado (29 %). La calidad tecnológica del pan obtenido a partir de la mezcla óptima resultó satisfactoria, en términos de color de la corteza, humedad y perfil de textura de la miga.
- Se encontró una relación cuadrática entre el volumen del pan y la viscosidad estacionaria de la masa. El volumen aumentó al incrementar la viscosidad, alcanzando un valor máximo para una viscosidad estacionaria de ~60000 Pa.s. Esta relación entre el volumen y la viscosidad puede ser de utilidad para determinar la aptitud de la masa cruda y seleccionar aquella que permita maximizar el volumen del pan.

### 5.5.2. Diseño II

- Con base en la caracterización reológica de la masa (barrido de frecuencia) se determinó que el módulo elástico resultó independiente de la frecuencia, predominando el carácter elástico en todas las formulaciones. La mezcla ternaria ( $GX+GG+AL$ ) presentó mayor carácter elástico que las demás

combinaciones (unitarias y binarias). El aporte funcional de la harina gelatinizada fue dependiente de los sustitutos del gluten presentes en las mezclas.

- Los resultados del ensayo de creep-recovery señalaron que la masa con goma guar ofreció la menor resistencia, mientras que las masas correspondientes a goma xántica, goma xántica + alginato de sodio y la mezcla ternaria exhibieron mayor resistencia a la deformación. En comparación con el Diseño I (porcentaje de deformación menor al 7 %) se obtuvieron con el Diseño II porcentajes de deformación comprendidos entre 3 % y 35 %.
- Del análisis de optimización mediante el diseño de mezclas resultó que la formulación óptima correspondió a la formulación con goma xántica (4,0 g). La mezcla óptima produjo un volumen de pan similar al del Diseño I y un porcentaje alveolar del 25 %. La presencia de harina gelatinizada en la mezcla complementó el efecto funcional de la goma, permitiendo reducir a la mitad la cantidad de hidrocoloide, sin perjuicio de la calidad en términos de volumen y de alveolado. Sin embargo, la evaluación de la textura de la miga reveló mayor tendencia a desmigajarse en el caso del pan óptimo del Diseño II.
- Se encontró una correlación significativa y positiva entre el volumen del pan (VP) y la viscosidad estacionaria de la masa, existiendo un valor crítico de viscosidad (~60000 Pa.s) en el que VP es máximo, cuando se combinan los datos hallados con los del Diseño I.
- Los resultados encontrados reflejan la eficacia del uso de la harina gelatinizada como ingrediente funcional en panificados, la cual es capaz de potenciar la acción de los sustitutos tradicionales del gluten. Esta harina gelatinizada se presenta como una alternativa al uso de almidones modificados químicamente.

## 6. Bibliografía

*“Nadie está a salvo de las derrotas. Pero es mejor perder algunos combates en la lucha por nuestros sueños, que ser derrotado sin saber siquiera por qué se está luchando.”*

Paulo Coelho.

## A

- Alvarado J. D., y Aguilera J. M. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*. Huesca: Acribia, S.A.
- AACC, (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. (10th ed.)*. The Association: Saint Paul, Minnesota.
- Alier, M., y Casañ, M. J. (2016). *Pan Sin Gluten: Principios, Técnicas y Trucos para Hacer Pan, Pizza, Bizcochos, Cupcakes y Otras Recetas Sin Gluten*. North Charleston: Createspace Independent Publishing Platform.
- AOAC, (2000). Solids (total) and moisture in flour. *Official methods of analysis, (17th ed.)*. Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, MD.
- Aoki, N., Umemoto, T., Okamoto, K., Suzuki, Y., y Tanaka, J. (2015). Mutants that have shorter amylopectin chains are promising materials for slow-hardening rice bread. *Journal of Cereal Science*, 61, 105-110.
- Arendt, E. K., y Moore, M. M. (2007). Gluten-free cereal products as functional food. En Y.H., Hui (Ed.), *Handbook of Food Products Manufacturing* (pp. 1017-1036). New Jersey: Editorial John Wiley & Sons.
- ATMA (n.d.). *Manual de instrucciones, horno de pan HP 4040*. Disponible en: [www.atma.com.ar](http://www.atma.com.ar). Último acceso: 11 de abril de 2014.

## B

- Başaran, A., y Göçmen, D. (2003). The effects of low mixing temperature on dough rheology and bread properties. *European Food Research and Technology*, 217 (2), 138-142.
- Bello, M. (2009). *Procesamiento hidrotérmico de arroz cáscara. Efecto de las condiciones de hidratación y cocción en el rendimiento, textura y propiedades térmicas del grano elaborado*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Bello-Pérez, L., Roger, P., Baud, B., y Colonna, P. (1998). Macromolecular features of starches determined by aqueous high performance size exclusion chromatography. *Journal of Cereal Science*, 267-278.

Bourne, M. C. (1978). Texture profile analysis. *Food Technology*, 32, 62-66, 72.

Burger, J. M. (1935). *First report on viscosity and plasticity*. Nordemann publishing company, Nueva York.

## C

Calderón de la Barca, A. M., Rojas-Martínez, M. E., Islas-Rubio, A. R., y Cabrera-Chávez, F. (2010). Gluten-Free Breads and Cookies of Raw and Popped Amaranth Flours with Attractive Technological and Nutritional Qualities. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65, 241-246.

Calderón Domínguez, G., Vera Domínguez, M., Ferrera Rebollo, R., Arana Errasquin, R., y Mora Escobedo, R. (2004). Rheological changes of dough and bread quality prepared from a sweet dough: effect of temperature and mixing time. *International Journal of Food Properties*, 7 (2), 165-174.

Casellas, K., Lema, D., Brescia, V., y Berges, M. (2012). Disposición a pagar por una nueva tecnología genética: el caso del arroz resistente a Herbicidas. Asociación Argentina de Economía Política (XLVII Reunión Anual).

Cajas Locke, J. E, Loubes, M. A, y Tolaba, M. P. (2015). Evaluación de sustitutos de gluten en la formulación de pan de molde a base de harina de arroz. En Libro de Actas del XV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (XV CYTAL). Buenos Aires, Argentina.

Callejo González, M. (2010). *Molinería y panadería: Revista profesional de panadería y pastelería*. Barcelona: Montagud Editores.

Cedeño, V., y Galarza, A. (2013). *Efecto del tipo de variedad de arroz ecuatoriano en las características de hidratación de la harina y el gel*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Cerny, C. (2008). The aroma side of the Maillard reaction. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1126 (1), 66-71.

CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical (1981). Programa del CIAT para la investigación en Arroz de Secano en América Latina. Caso: estrategia de investigación y políticas Agrícolas. Cali, Colombia: CIMMYT, CIAT, CIP, Fundación Charles F. Kettering.

Chiang, P. Y., y Yeh, A. I. (2002). Effect of Soaking on Wet-milling of Rice. *Journal of Cereal Science*, 35, 85-94.

Código Alimentario Argentino (2017). *Capítulo IX: Alimentos Farináceos - Cereales, Harinas Y Derivados*. Disponible en: [http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas\\_alimento\\_caa.asp](http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimento_caa.asp). Último acceso: 10 de octubre de 2017.

Colonna, P., Tayeb, J., y Mercier, C. (1989). *Extrusion cooking*. Saint Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

Cornejo, F., y Rosell, C. M. (2015). Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 1203-1210.

## D

De Escalada Pla, M. (2006). *Caracterización, procesamiento y optimización del aprovechamiento industrial de la calabacita Cucurbita moschata Duchesne ex Poiret*. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

De la Hera, E., Gómez, M., y Rosell, C. M. (2013). Particle size distribution of rice flour affecting the starch enzymatic hydrolysis and hydration properties. *Carbohydrate Polymers*, 98 (1), 421-427.

De Peña, M. P. (2003). Cereales y Derivados. En I., Astiasarán y A., Martínez (Eds), *Alimentos. Composición y propiedades* (pp. 135-154). España: McGraw-Hill-Interamericana.

Degiovanni, V., Berrío, L. E., y Charry, R. E. (2010). Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.). En V., Degiovanni, C. P, Martínez y F., Motta (Eds.), *Producción Eco - Eficiente del arroz en*

*América Latina* (pp. 35-59). Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Demirkesen, I., Mert, B., Summu, G., y Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of food Engineering*, 96 (2), 295-303.

Díaz, S. H., Castro, R., y Morejón, R. (2000). Caracterización Morfoagronómica de Variedades de Arroz (*Oryza Sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 21 (3), 81-86.

Ding, Q. B., Ainsworth, P., Tucker, G., y Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 66, 283-289.

Doescher, L. C., Hosney, R. C., y Milliken, G. A. (1987). A mechanism for cookie dough setting. *Cereal Chemistry*, 64, 158-163.

Doublier, J. L., y Cuvelier, G. (1996). Gums and Hydrocolloids: Functional Aspects. En A. C. Eliasson (Ed). *Carbohydrates in Food* (283-318). New York: Marcel Dekker, Inc.

## E

Edwards, N. M., Peressini, D., Dexter, J. E., Y Mulvaney, S. J. (2001). Viscoelastic properties of durum wheat and common wheat dough of different strengths. *Rheologica Acta*, 40, 142-153.

Encina-Zelada, C. R., Cadaveza, V., Monteiro, F., Teixeirab, J. A., y Gonzales-Barrona, U. (2018). Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. *Food Research International*, 111, 544-555.

## F

FADE, Federación de Asociaciones de Celiacos en España (2016). *La enfermedad celíaca*. Disponible en: <https://www.celiacos.org/blog/item/949-enfermedad-celiaca.html>. Último acceso: 19 de mayo de 2018.



Fan, J., y Marks, B. P. (1998). Retrogradation kinetics of rice flours as influenced by cultivar. *Cereal Chemistry*, 75, 153-155.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (2017). Seguimiento del mercado del arroz de la FAO (SMA). <http://www.fao.org/economic/est/publications/publicaciones-sobre-elarroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>. Último acceso: 2 de agosto de 2017.

Figoni, P. (2008). *How baking works*. New Jersey: John Wiley y Sons, INC.

Fiset, J., y Blais, E. (2007). *El libro del pan*. Barcelona: Robinbook.

Flores, M. (2007). *Estudio de factibilidad para instalar una planta procesadora de harina de arroz como sustituto de la harina de trigo para elaborar sub productos*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil.

Franco, M., y Wenzel de Menezes, E. (2006). *Carbohidratos en alimentos regionales iberoamericanos*. San Pablo: Editorial de la universidad de Sao Paulo.

Fu, J., Mulvaney, S. J., y Cohen, C. (1997). Effect of added fat on the rheological properties of wheat flour doughs. *Cereal Chemistry*, 74 (3), 304-311.

## G

Gallagher, E., y Gormley, T. R. (2002). The quality of gluten free breads produced at retail outlets. *Research Report*. Dublin: Teagasc.

Gallagher, E., Gormley, T., y Arendt, E. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*. 56, 153-161.

Gallagher, E., Gormley, T. R., y Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 143-152.

- Gambús, H., Marek, S., y Ziobro, R. (2007). The effect of composition of hydrocolloids on properties of gluten-free bread. *Acta Scientiarum Polonorum-Technologia Alimentaria.*, 6 (3) 61-74.
- García-Villanova Ruiz, B., y Guerra Hernández, E. J. (2010). Cereales y productos derivados. En A., Gil Hernández (Ed), *Tratado de Nutrición Tomo 2 composición y calidad nutritiva de los alimentos 2da ed.* (pp. 109). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Gatto, A. (2016). *Almidón y sus geles*. Disponible en: <http://aulas.uruguayeduca.edu.uy/mod/page/view.php?id=25310>. Último acceso: 28 de abril del 2018.
- Godfray, H. C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327 (5967), 812-818.
- Gomez, M., Oliete, B., Pando, V., Ronda, F., y Caballero, P. A. (2008). Effect of fermentation conditions on bread staling kinetics. *European Food Research and Technology*, 226,1379-1387.
- Gómez Pallarés, M., León, A. E., y Rosell, C. M. (2007). Trigo. En A. E., León, y C. M., Rosell (Eds.), *De tales harinas, tales panes* (pp. 17-71). Córdoba: CYTED.
- Gujral, H. S., y Rosell, C. M. (2004). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, 37, 75-81.

## H

- Hager, A. S., y Arendt, E. K. (2013). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32 (1), 195-203.
- He H., y Hosney R. C. (1991). Gas retention of different cereal flours. *Cereal Chemistry*, 68, 334-336.
- Hernández-Estrada, Z. J., Rayas-Duarte, P., Figueroa, J. D. C., y Morales-Sánchez, E. (2014). Creep recovery tests to measure the effects of wheat glutenins

on doughs and the relationships to rheological and breadmaking properties. *Journal of Food Engineering*, 143, 62-68.

Huang, R., Chang, W., Chang, Y., y Lii, C. (1994). Phase transitions of rice starch and flour gels. *Cereal Chemistry*. 71 (2), 202-207.

Huang, J. C., Knight, S., y Goad, C. (2001). Model prediction for sensory attributes of nongluten pasta. *Journal of Food Quality*, 24 (6), 495-511.

## I

INTA, Instituto Nacional de Tecnología de Agropecuaria (2016). *La Argentina lidera la producción de arroz de la región*. Disponible en: <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=32396>. Último acceso: 10 de octubre de 2017.

## J

Juliano, B. O. (1994). *El arroz en la nutrición humana*. Roma: FAO.

Joyce, A. (2010). *Sanyo's Rice-Bread Maker Rises to The Occasion*. Disponible en: <https://blogs.wsj.com/japanrealtime/2010/11/25/sanyo%E2%80%99s-rice-bread-maker-rises-to-the-occasion/>. Último acceso: 19 de mayo de 2018.

## K

Karim, A. A., Norziah, M. H., y Seow, C. C. (2000). Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 71, 9-36.

Kawamura-Konishi, Y., Shoda, K., Koga, H., y Honda, Y. (2013). Improvement in gluten-free rice bread quality by protease treatment. *Journal of Cereal Science*, 58, 45-50.

Kent, N. L., y Evers, A. D. (1994). Bread made with gluten substitutes. *Technology of cereals*, 215.

Khatkar, B. S., y Schofield, J. D. (2002). Dynamic rheology of wheat flour dough. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82, 827-829.

Krupa, U., Rosell, C. M., Sadowska, J., y Soral-Śmietana M. (2010). Bean starch as ingredient for gluten-free bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34 (2), 501-518.

## L

LaCIE (n.d.). *Libro blanco de la gestión del color 3 espacios de color y conversión de colores*. Disponible en: [lacie.com/download/whitepaper/wp\\_colormangement\\_3\\_es.pdf](http://lacie.com/download/whitepaper/wp_colormangement_3_es.pdf). Último acceso: 16 de septiembre de 2015.

Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., y Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79, 1033-1047.

Light, S. (1990). Modified food starches: why, what, were. *Cereal Foods World*, 35 (2), 1081-1092.

Lindbloom, B. J. (2012). *CIE color calculator*. Disponible en: [Brucelindbloom.com](http://Brucelindbloom.com). Último acceso: 12 de septiembre de 2015.

Livore, A. (2015). *Varietades de arroz*. Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Loubes, M. A., y Tolaba, M. P. (2013). Arroz: rendimiento de molienda mediante análisis de imágenes. *La Alimentación Latinoamericana*, 308, 44-49.

Loubes, M. A., y Tolaba, M. P. (2014). Thermo-mechanical rice flour modification by planetary ball milling. *LWT - Food Science and Technology*, 57, 320-328.

Loubes, M. A. (2015). *Molienda seca y húmeda de arroz en molino planetario. Cinética de la molienda, efecto de las condiciones de molienda en las propiedades funcionales de la harina y del almidón y diseño de mezclas para pastas sin gluten*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

López, B., Pérez, S., Fuertes, D., Castillo, A., Hernández, O., y Díaz, A. (1996). Obtención de harinas de arroz: influencia de dos variedades y tres

diagramas de molienda sobre algunas propiedades funcionales. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 6 (2), 17-21.

Lumdubwong N., y Seib P. A. (2000). Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. *Journal of Cereal Science*, 31, 6374.

## M

Macosko, C. (1994). *Rheology: Principles and measurements*. New York: VCH Publishers, Inc.

Magaña, E. M., Ramírez, B., Torres, P. I., Sánchez, D. I., y López J. (2011). Efecto del contenido de proteína, grasa y levadura en las propiedades viscoelásticas de la masa y la calidad de pan tipo francés. *Ciencia y tecnología de América o Interciencia*, 36 (4), 248-255.

Mahapatra, A. K., y Lan, Y. (2007). Postharvest handling of grains and pulses En M. S., Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation* (pp. 73-129). Boca Ratón: CRC Press.

Manzatti Machado Alencar, N., Joy Steel C., Dutra Alvim, I., Carvalho de Morais, E., y Bolini, H. M. A. (2015). Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 62 (2), 1011-1018.

Mao, C., y Rwei, S. (2006). Cascade analysis of mixed gels of xanthan and locust bean gum. *Polymer*, 47 (23), 7980-7987.

Martínez, D. (2010). *Guía para celíacos*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Andromeda.

Martínez, M. (2012). *Influencia de la adición de harinas extruídas en la elaboración de panes de arroz*. Tesis de máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid.

- McCarthy, D., Gallaguer, E., Gormley, T., Schober, T., y Arendt, E. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten free bread. *Cereal Quemistry*, 82, 609-615.
- McWatters, K. H. (1983). Compositional, physical, and sensory characteristics of akara processed from cowpea paste and Nigerian cowpea flour. *Cereal Chemistry*, 60, 333.
- Meadows, F. (2002). Pasting process in rice flour using Rapid Visco Analyser curves and first derivatives. *Cereal Chemistry*, 79, 559-562.
- Méndez del villar, P. (2008). *Análisis del mercado mundial del arroz*. Disponible en: <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/02125.pdf>. Último acceso: 23 de abril de 2018.
- Mesas, J. M., y Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3 (5), 307-313.
- Molina-Rosell, C. (2013). Alimentos sin gluten derivados de cereales. En L., Rodrigo y A. S., Peña (Eds.), *Enfermedad celíaca y sensibilidad al gluten no celíaca* (pp. 447-461). España: Omnia Publisher.
- Morán, K. M. (2013). *Efecto de la goma xanthan y la hidroxipropilmetilcelulosa en las características físicas y reológicas del pan de arroz libre de gluten tipo molde*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politecnica del Litoral.

## N

- Nadal, X. L., y Fornos, X. P. (2004). Pan de molde. En J., Boatella Riera, R., Codony Salecedo y P., López Alegret (Eds.), *Química y Bioquímica de los alimentos II* (pp. 91-106). Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Naturen (2017). *New Research Connects Gut Microbiota & Gluten Sensitivities*. Disponible en: <https://www.natren.com/blog/new-research-connects-gut-microbiota-gluten-sensitivities/>. Último acceso: 19 de mayo de 2018.

Newberry, M. P., Phan-Thien, N., Larroque, O. R., Tanner, R. I., y Larsem, N. G. (2002). Dynamic and elongation rheology of yeasted bread doughs. *Cereal Chemistry*, 70 (6), 874-879.

## O

Ospina, J. (2001). *Características físico-Mecánica y Análisis de calidad de granos*. Bogotá, Colombia : Universidad Nacional de Colombia.

## P

Parra, A., Cajiao, E. S., Cerón, A. R., y Villada, H. S. (2016). Efecto del método de pre-gelatinización de harina de yuca sobre propiedades mecánicas de matrices moldeadas. *Agronomía Colombiana*, 34 (1), 89-91.

Pérez, A. y Tripaldi, P. (2012). Aplicación del Creep-Recovery Test para estudiar el Comportamiento Reológico del Queso Mozzarella. En Libro de Actas del IV Congreso Ecuatoriano de Ingeniería en Alimentos y las XIII Jornadas de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Riobamba, Ecuador.

Piedra, S. E. (2010). *Mejoramiento de control de la etapa de pulido mediante el analisis de regresion de las variables que inciden en el proceso del pilado del arroz*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Picón, J. (2014). *Estudio de la influencia del tipo de harina en el desarrollo de galletas sin gluten*. Tesis de máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid.

Pongjaruvat, W., Methacanon, P., Seetapan, N., Fuongfuchat, A., y Gamonpilas, C. (2014) Influence of pregelatinized tapioca starch and transglutaminase on dough rheology and quality of gluten-free jasmine rice breads. *Food Hydrocolloids*, 36, 143-150.

Prandi, B., Mantovani, P., Galaverna, G., y Sforza, S. (2014). Genetic and environmental factors affecting pathogenicity of wheat as related to celiac disease. *Journal of Cereal Science*, 59, 62-69.

## R

Ramirez Ascheri, D. P., Dias Pereira, L., Zaczuk Bassinello, P., Piler Carvalho, C. W., y Ramírez Ascheri, J. L. (2010). Calidad de Arroz de Tierras altas en funcion del tiempo de cocción y del cultivas de arroz. *Scientia Agraria*, 11 (2), 163-173.

Rawle A. (n.d.). *Principios básicos del análisis del tamaño de partículas*. Disponible en: <http://www.iesmat.com/iesmat/upload/file/Malvern/Productos-MAL/DIF-Principios%20basicos%20Analisis%20Tam.%20Particula.pdf>. Último acceso: 25 de marzo 2015.

Rivera, J. O. (2015). *Cambios microestructurales y reológicos de masas y panes sin gluten*. Tesis de máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid.

Rodríguez, D. (2015). *Potencial Agroalimentario del Almidón de Arroz de Tres Variedades cultivadas en el Departamento de Tolima*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima.

Rodríguez, G., y Uriarte, A. (2009). Laser diffraction and dry - sieving gran size analyses undertaken on fine - and medium - grained sandy marine sediments. *Journal of Coastal research*, 25 (1), 257-264.

Rodríguez, M. (2007). *Determinación de la Composición Química y Propiedades Físicas y Químicas del Pulido de Arroz (Oryza sativa L.)*. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile.

Ronda, F., Perez-Quirce, S., Lazaridou, A., y Biliaderis, C. (2015). Effect of barley and oat  $\beta$ -glucan concentrates on gluten-free ricebased doughs and bread characteristics. *Food Hydrocolloids*, 48, 197-207.



- Rooney, L. W., y Huang, D. P. (2001). Starches for snack foods. En E. W., Lusas y L. W., Rooney (Eds.), *Snack foods processing* (pp. 115-130). Boca Raton: CRS press LLC.
- Rosell, C. M., Brites, C., Pérez, E., y Gularte, M. (2007). Arroz. En A. E., León y C. M., Rosell (Eds.), *De tales harinas, tales panes* (pp. 123-160). Córdoba: CYTED.
- Rosell, M., y Marco, C. (2008). Rice. En E. K., Arendt y F., Dal Bello (Eds.), *Gluten - Free Cereal Products and Beverages* (pp. 81-96). Cambridge: Academic Press.
- Rosentrater, K. A., y Evers, A. D. (2018). Bread-baking technology. En K. A., Rosentrater y A. D., Evers, *Kent's Technology of Cereals. An Introduction for Students of Food Science and Agriculture* (pp. 565-622). United States: Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition.
- Ruales, J., Valencia, S., y Nair, B. (1993). Effect of processing on the physico-chemical characteristics of quinoa flour (*Chenopodium quinoa*, Willd.). *Starch/Stärke*, 45, 13-19.

## S

- SAG, Secretaría de Agricultura y Ganadería (2003). *Manual técnico para el cultivo de arroz (Oryza Sativa)*. Comayagua: Secretaría de Agricultura y Ganadería, Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria de Honduras.
- Saif, S. M. H., Lan, Y., y Sweat, V. E. (2003). Gelatinization properties of rice flour. *International Journal of Food Properties*, 6, 531-542.
- Sanint, R. (2010). Nuevos retos y grandes oportunidades tecnológicas para los sistemas arroceros, producción, seguridad alimentaria y disminución de la pobreza en América Latina y el Caribe. En V., Degiovanni, C. P., Martínez y F., Motta (Eds.), *Producción Eco - Eficiente del arroz en América Latina* (pp. 3-13). Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

- Sánchez, H. D., González, R. J., Osella, R. L., Torres, C. A., y de la Torre, M. A. G. (1999). Comportamiento de variedades de arroz en la elaboración de pan sin gluten. *Archivo latinoamericanos de Nutrición*, 49 (1), 162-165.
- Sánchez, H. D., González, R. J., Osella, C. A., Torres, R. L., y de la Torre M. A. G. (2008). Elaboración de pan sin gluten con harinas de arroz extrudidas. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 6 (2), 109-116.
- Sánchez, H. D., Osella, C. A., y de la Torre, M. A. (1996). Desarrollo de una fórmula para Pan sin Gluten. *Información Tecnológica*, 7 (2), 35-42.
- Sánchez, H. D., Osella, C. A., y de la Torre, M. A. (2002). Optimization of Gluten-Free Bread Prepared from Cornstarch, Rice Flour, and Cassava Starch. *Journal of food science*, 67 (1), 416-419.
- Sandoval, A. A., Rodríguez, S. E., y Fernández, Q. A. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *DYNA*, 72 (146), 45 - 53.
- Scheffé, H. (1958). Experiments with mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 20, 344-360.
- Singh, V., Okadome, H., Toyoshima, H., Isobe, S., y Ohtsubo, K. (2000). Thermal and physicochemical properties of rice grain, flour and starch. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 48, 2639-2647.
- Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., y Chattopadhyay, P. K. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62, 37-45.
- Slade, L., y Levine, H. (1994). Structure-function relationships of cookie and cracker ingredients. En H., Faridi (Ed.), *The Science of Cookie and Cracker Production* (pp. 23-241). Nueva York: Chapman and Hall.
- Stanley, D. W., Stone, A. P., y Tung, M. A. (1996). *Handbook of food analysis*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Suksomboon, A., y Naivikul, O. (2006). Effect of dry- and wet-milling processes on chemical, physicochemical properties and starch molecular structures of rice starches. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 40 (Suppl.), 125-134.

Sozer, N. (2009). Rheological properties of rice pasta dough supplemented with proteins and gums. *Food Hydrocolloids*, 23, 849-855.

## T

Tran, T. B., Shelat, K. J., Tang, D., Li, E., Gilbert, R. G., y Hasjim, J. (2011). Milling of rice grains: The degradation on three structural levels of starch in rice flour can be independently controlled during grinding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (8), 3964-3973.

Toufeili, I., Dagher, S., Shadadarevian, S., Nouredine, A., Sarakbi, M., y Farran, M. T. (1994). Formulation of gluten-free pocket-type flat breads: optimization of methylcelluloses, gum arabic, and egg albumen levels by response surface methodology. *Cereal Chemistry*, 71, 594-600.

## U

Universidad Politécnica de Madrid (n.d.). *Diseño Cartográfico, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía Universidad Politécnica de Madrid*. Disponible en: <http://redgeomatrica.rediris.es/cartto2/arbolB/img/5-9-3-b-n.gif>. Último acceso: 27 de agosto 2015.

Upadhyay, R., Ghosal, D., y Mehra, A. (2012). Characterization of bread dough: Rheological properties and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 109, 104-113.

## V

Van Bockstaele, F., De leyn, I., Eeckhout, M., y Dewettinck, K. (2011). *Journal of Food Engineering*, 107, 50-59.

Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J., y Delcour, J. A. (2003). Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. *Journal of Cereal Science*, 38, 53-59.

## W

Wagner, M. J., Lucas, T., Le Ray, D., y Trystram, G. (2007). Water transport in bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 78 (4), 1167-1173.

Wang, L. Z., y White, P. J. (1994). Structure and properties of amylose, amylopectin and Intermediate materials of oat starches. *Cereal Chemistry*, 71 (3), 263-268.

Wang, F., Wang, Y. J., y Sun, Z. (2002). Conformational Role of Xanthan Gum in its Interaction with Guar Gum. *Food Chemistry and Toxicology*, 67 (9), 3289-3294.

Wannerberger, L., y Eliasson, A. C. (1993). Differential scanning calorimetry studies on rye flour milling streams. *Cereal chemistry*, 70 (2), 196-198.

Weipert, D. (1990). The benefits of basic rheometry in studying dough rheology. *Cereal Chemistry*, 67, 311-317.

Whitson, M. E., Miracle, R. E., y Drake, M. A. (2010). Sensory characterization of chemical components responsible for cardboard flavor in whey protein. *Journal of Sensory Studies*, 25, 616-636.

## Y

Yeh, A. I. (2004). Preparation and applications of rice flour. En E. T., Champagne (Ed.), *Rice: chemistry and Technology* (pp. 495-539). St. Paul: American Association of Cereal Chemists.

## Z

Zhang, Z., Zhao, S., y Xiong, S. (2010). Morphology and physicochemical properties of mechanically activated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 79, 341-348.

Ziobro, R., Korus, J., Witczak, M. y Juszcak, L. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 29, 68-74.