



INFLUENCIA DE LA HIDROXIPROPILMETILCELULOSA, EL PSYLLIUM Y SU COMBINACIÓN EN LAS PROPIEDADES MORFOGEOMÉTRICAS Y TEXTURALES DE PANES SIN GLUTEN ELABORADOS CON HARINA DE ARROZ

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso 2012/13

**Alumno: Miguel Angel San Miguel Feroso
Tutor: Manuel Gómez Pallarés**

Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos
E.T.S. Ingenierías Agrarias, Campus de la Yutera

Universidad de Valladolid

Resumen

La elaboración de panes sin gluten de alta calidad, es un importante reto tecnológico, debido a las propiedades viscoelásticas que aporta este compuesto a las masas. Para solucionar estos problemas se ha recurrido al uso combinado de dos polisacáridos: hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y psyllium. Este trabajo está basado en un diseño de experimento de superficie respuesta para comprobar el comportamiento de los hidrocoloides junto con las variaciones de agua. El psyllium ha sido responsable de la formación de una red de gel débil, capaz de atrapar el CO₂ de la fermentación, y el HPMC de los procesos de gelificación inducidos por el calor. El nivel de hidratación de las masas ha representado un aspecto importante desde el punto de vista tecnológico. Después de una evaluación morfogeométrica, un estudio de textura TPA, y una valoración sensorial, los mejores resultados se obtuvieron con niveles de HPMC 3%, psyllium 4% y 110% de agua.

Abstract

The development of high quality gluten-free breads is a major technological challenge, due to the viscoelastic properties of this compound that contributes to the dough. To solve these problems it has resorted to the combined use of two polysaccharides: Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) and psyllium. This study is based on a design experiment of a surface response to check the behavior of these hydrocolloids together with the water variations. Psyllium has been responsible for the formation of a weak gel network, capable of trapping CO₂ from proofing, and HPMC gelation processes induced by heat. The hydration level of the dough has represented an important feature from the technological properties. After evaluation, a study of morphological features, TPA texture and a sensory evaluation, optimum results were obtained with levels of HPMC 3%, 4% and psyllium and 110% water.

I. INTRODUCCIÓN

La celiaquía es una enfermedad autoinmune caracterizada por una intolerancia al gluten, en muchos casos severa, y que afecta aproximadamente al 1% de la población mundial en cualquier rango de edad (Bernardo, van Hoogstraten, Verbeek, Pena, Mearin, Arranz, et al., 2008; Green & Jabri, 2006; Renzetti & Arendt, 2009; Sainsbury, Mullan, & Sharpe, 2013). Al ingerirse alimentos que contienen gluten, el cuerpo ejerce una fuerte respuesta inmune causando daños en las vellosidades intestinales y por lo tanto provocando una mala absorción de nutrientes, como proteínas, grasas, hidratos de carbono, sales minerales y vitaminas (Green & Cellier, 2007; Hill, Dirks, Liptak, Colletti, Fasano, Guandalini, et al., 2005; Mariotti, Pagani, & Lucisano, 2013).

El gluten, es una glicoproteína presente en la semilla de muchos cereales (trigo, cebada, centeno y en menor medida en la avena así como todos sus derivados como almidones, harinas, panes y pastas alimenticias). Parece ser que la gliadina contenida en el gluten es la responsable de estos trastornos que pueden derivar en diarreas, carencias vitamínicas, anemias e incluso puede llegar a ocasionar osteoporosis (Green & Jabri, 2003; Rubio-Tapia & Murray, 2010).

Actualmente, el único tratamiento efectivo contra la enfermedad es seguir una dieta estricta de productos libres de gluten de por vida, permitiendo así la recuperación de la mucosa intestinal. Esto presenta grandes dificultades dado que el gluten está presente en multitud de alimentos, aditivos y conservantes. La ingestión de pequeñas cantidades puede provocar intolerancia, por lo que el paciente tiene que garantizarse la ingesta de alimentos libres de gluten y elaborados en condiciones totalmente controladas (Hager & Arendt, 2013; Lahdeaho, Lindfors, Airaksinen, Kaukinen, & Maki, 2012).

Gran parte de los productos que encontramos en el mercado están elaborados con harinas de trigo u otros cereales que contienen gluten. La sustitución del gluten en productos de panadería es un importante reto tecnológico debido a las interacciones entre las gluteninas (responsables de la elasticidad y de la fuerza) y las gliadinas (responsables del comportamiento viscoso) que se dan en los procesos de panificación. El gluten, por lo tanto, se puede considerar como un componente esencial de la estructura y textura del pan, así como de otros productos de panadería (Mariotti, Lucisano, Pagani, & Ng, 2009; Mariotti, Pagani, & Lucisano, 2013).

Eliminar por completo el gluten en la formulación de este tipo de productos, es una tarea muy exigente que a menudo da lugar a productos de baja calidad y con un escaso índice de aceptación (Gallagher, Gormley, & Arendt, 2004; Ylimaki, Hawrysh, Hardin, & Thomson, 1991). Conseguir variar esa tendencia de consumo de alimentos sin gluten supone invertir en el desarrollo de productos cuyas características sean similares a los de los elaborados con harina de trigo (Gallagher, Gormley, & Arendt, 2003; Sakac, Torbica, Sedej, & Hadnadev, 2011).

Dado que la harina de arroz posee propiedades nutricionales equilibradas, es de carácter hipoalergénico, incoloro y de sabor neutro, es el cereal más adecuado para la elaboración de productos aptos para celíacos (Sanchez, Osella, & de la Torre, 2002). La idoneidad de la harina de arroz se atribuye a sus bajos niveles de prolaminas, causantes de la liberación de toxinas para los individuos que sufren la enfermedad celíaca (Torbica, Hadnadev, & Dapcevic, 2010). Sin embargo, el uso de harina de arroz en procesos de panificación es limitado debido a que las proteínas del arroz son incapaces de retener el gas producido durante los procesos de fermentación (Gujral & Rosell, 2004). Para solucionar estos problemas, se ha recurrido a sustancias poliméricas que recreen las propiedades viscoelásticas del gluten, consiguiendo así reforzar la estructura de los panes y retener el gas que se produce durante la fermentación (Phimolsiripol, Mukprasirt, & Schoenlechner, 2012).

Debido al interés suscitado por este tipo de productos, en los últimos años se ha trabajado con la incorporación de fibras, hidrocoloides, proteínas o almidones para recrear las propiedades tecnológicas del gluten, mejorando así la textura, las sensaciones en boca y la vida útil de estos productos (Lazaridou, Duta, Papageorgiou, Belc, & Biliaderis, 2007). Derivados de la celulosa, así como otros hidrocoloides, tienen la propiedad de mejorar la calidad de los panes sin gluten elaborados con harina de arroz en lo que se refiere a volumen y textura, debido a su alto poder de hidratación así como a su aptitud para formar una red tridimensional capaz de retener el gas producido durante la fermentación.

Las gomas o hidrocoloides son polisacáridos de origen natural o modificado fundamentales para la elaboración de panes sin gluten. Sus propiedades tecnológicas mejoran la textura y la apariencia de los panes sin gluten, llegando incluso a imitar las cualidades del gluten (Mariotti, Pagani, & Lucisano, 2013). Debido a sus propiedades estructurales, su adición asegura mayor consistencia de la masa, aumento de la capacidad de retención de gas y un alargamiento de la vida útil

(Barcenas & Rosell, 2006). Existen multitud de estudios donde se ha comprobado la efectividad de los derivados de la celulosa (hidroxipropilmetilcelulosa, metilcelulosa, carboximetilcelulosa), de las gomas (guar, xantana, locuste) o incluso de fibras como el psyllium (Barcenas & Rosell, 2005; Gallagher, Gormley, & Arendt, 2004; Haque & Morris, 1994; McCarthy, Gallagher, Gormley, Schober, & Arendt, 2005; Toufeili, Dagher, Shadarevian, Nouredine, Sarakbi, & Farran, 1994).

La hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) es una celulosa parcialmente eterificada por grupos metilos y que contiene una pequeña proporción de grupos hidroxipropilos de sustitución. Esta modificación química le convierte en un polímero soluble en agua con una alta capacidad de hidratación, incluso con cambios bruscos de temperatura (Sarkar & Walker, 1995). En el estado de solución a temperaturas más bajas, el HPMC tiene una gran capacidad de retención de agua. Tras someterlo a calentamiento, se forma un gel a la vez que se produce una liberación simultánea del agua. Durante la gelificación, se cree que el HPMC forma enlaces hidrófobos fuertes con otras cadenas de HPMC, dando lugar a redes de gel más fuertes cuando se aplican temperaturas más altas. Las relaciones variables de sustitución de hidroxipropil y metil influye en la solubilidad y en la temperatura de gelificación (Hager & Arendt, 2013).

El psyllium es una fibra alimentaria con propiedades tecnológicas emulsionantes, estabilizantes y espesantes, compuesta de hidratos de carbono complejos, almidones resistentes y lignina. Existen estudios donde se ha evaluado como afecta a las características químicas, nutricionales, tecnológicas y sensoriales de las masas de pan sin gluten el reemplazar el gluten con psyllium (Zandonadi, Assuncao Botelho, & Coelho Araujo, 2009). El psyllium, al igual que el gluten, es estable a distintos niveles de pH y temperatura en los alimentos. Estas propiedades permiten su aplicación en la industria alimentaria, siendo el psyllium un ideal sustituto de las grasas e incluso puede llegar a actuar como un emulsionante o agente espesante (Farahnaky, Askari, Majzoobi, & Mesbahi, 2010).

En las formulaciones de pan sin gluten de Haque y Morris (1994), el uso de HPMC junto con fibra de psyllium, obtuvo buenos resultados en términos de volumen específico. El resultado fue la formación de una red de gel débil, capaz de atrapar el CO₂ debido a la capacidad de gelificación y absorción de agua de fibra de psyllium, y de la gelificación inducida por el calor del HPMC. Adiciones más altas (5%, 7,5%, 10%) de psyllium a un pan sin gluten, determinan un aumento del contenido de fibra

del pan y una miga más suave durante su vida útil (Mariotti, Lucisano, Pagani, & Ng, 2009; Yu, Perret, Parker, & Allen, 2003).

Este trabajo pretende profundizar en los beneficios que puede aportar la fibra de psyllium usada junto con HPMC en la elaboración de panes sin gluten. Dado que el trabajo existente hasta el momento ha utilizado masas elaboradas con un nivel de hidratación a consistencia constante, se considerará importante incluir el efecto de los distintos niveles de hidratación de las masas a la hora de realizar las panificaciones. Existe la posibilidad de que los tiempos de fermentación, puedan verse afectados por la modificación de estos factores, por lo que será otra variable a tener en cuenta.

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia de tres niveles de HPMC (2, 3 y 4%) y de psyllium (0, 2 y 4%) en la elaboración de panes con harina de arroz en tres niveles de hidratación (90, 100 y 110%). También se ajustarán los tiempos óptimos de fermentación en un rango de 60, 105 y 150 minutos. Para ello se evaluarán parámetros morfogeométricos del pan y la pérdida de peso durante el horneado. Se realizará un ensayo TPA para determinar los principales parámetros texturales después del día de elaboración y con un envejecimiento de 8 días. Se analizarán las propiedades de color de la corteza y de la miga, y por último se realizará un análisis de imagen de las rebanadas para obtener datos de densidad alveolar y tamaño del poro. Para completar el trabajo se realizará una evaluación sensorial analizando el aspecto visual, olor, textura, sabor y valoración global de los panes.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Material

Para la elaboración de los panes del presente estudio se ha contado con los siguientes ingredientes:

Harina de arroz de grano grueso con una granulometría entre 132 y 200 micras, suministrada por la Harinera Castellana, Fraga S.A. (Medina del Campo, España), agua procedente de la red local, aceite refinado de girasol Langosta (Daimiel, España), azúcar blanquilla (Acor, Valladolid, España), sal refinada seca (Esco European Salt Company, Niedersachsen, Alemania), levadura Saf-Instant (Lesaffre,

Lille, Francia), Hidroxipropilmetilcelulosa Vivapur® K4M Food grade (JRS, Rosenberg, Alemania) y Vitacel® Psyllium P95 Food grade (JRS, Rosenberg, Alemania).

2.2 Métodos

2.2.1 Elaboración del pan

Para la elaboración del pan se utilizaron los siguientes ingredientes (g/100g en base harina): agua (90/100/110), levadura seca instantánea (3), sal (1.8), aceite (10), azúcar (5), HPMC (2/3/4) y psyllium (0/2/4). La cantidad de agua, HPMC y psyllium ha sido modificada en tres niveles durante este trabajo con el fin de optimizar la variación de estos tres factores.

La temperatura del agua añadida fue constante en todos ensayos, en un rango de $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Esta agua se utilizó para hidratar la levadura antes de incorporarla al resto de ingredientes. Después de mezclar todos los ingredientes durante 8 minutos mediante una batidora Kitchen Aid 5KPM50 (Kitchen Aid, Michigan, Estados Unidos), las masas se dividieron en porciones de 250 gramos. Se colocaron en moldes de aluminio de 233mm de largo, 108mm de ancho y 60mm de alto con un volumen de 1090ml (Gustav Ehlert GmbH & Co, Gütersloh, Alemania) para fermentar a 30°C y 80% de HR durante tres tiempos de fermentación distintos (60, 105 y 150 minutos), con la finalidad de encontrar los tiempos óptimos de fermentación para cada elaboración. La fermentación se realizó en una fermentadora FC-K (Salva, Lezo, España). Tras la fermentación, se hornearon en un horno eléctrico modular (Salva, Lezo, España) durante 40 minutos a 190°C . Las piezas se desmoldaron tras un reposo de 60 minutos. Un pan se utilizó para la determinación de la humedad y los cuatro restantes se pesaron para determinar la pérdida de peso y se envasaron en bolsas de polietileno. Dos se almacenaron en una cámara de conservación a 20°C durante 24 horas para posteriormente realizar medidas morfogeométricas, TPA, medidas de color y análisis de imagen de la rebanada, y otros dos panes se conservaron durante 8 días para obtener datos de envejecimiento.

La determinación de la humedad de la miga de los panes se realizó para comprobar la movilidad del agua durante el tiempo de reposo después del horneado. Para ello, se cortaron dos rebanadas de cada pan, se las retiró la corteza y se dividieron en cuatro cuadrantes. En cada uno de estos cuadrantes se realizaron medidas de

humedad según el método oficial, obteniendo dos medidas de humedad de la parte superior del pan, y dos de la parte inferior.

Las medidas morfogeométricas, el TPA, las medidas de color y el análisis de imagen de la rebanada se realizaron a las 24 horas, obteniendo todas las medidas por duplicado.

2.2.2 Diseño de experimento

Las distintas elaboraciones fueron aleatorizadas mediante un diseño de experimento *Box-Behnken* de superficie respuesta que incluye una ejecución a tres niveles con un subconjunto de pruebas con un factorial completo a tres niveles (tabla I). En este diseño se han realizado variaciones en cuanto al porcentaje de agua utilizado, así como la proporción de HPMC y psyllium. Se modificó el nivel de hidratación de la masa en un 90, 100 y 110% con respecto al porcentaje de harina. La dosificación de HPMC fue de 2, 3 y 4% y de psyllium de 0, 2 y 4%. Se realizaron todas las elaboraciones de manera simple a excepción del punto central del experimento, que se realizó por triplicado, dando lugar a 15 elaboraciones para cada uno de los tiempos de fermentación (60, 105 y 150 minutos).

TABLA I
Diseño del experimento

Tratamiento	Codificación de niveles ^a		
	HPMC	Psyllium	Agua
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	+1	0	-1
4	-1	0	-1
5	+1	0	+1
6	+1	+1	0
7	0	0	0
8	0	+1	-1
9	0	0	0
10	-1	0	+1
11	-1	+1	0
12	0	-1	-1
13	0	+1	+1
14	0	0	0
15	0	-1	-1

^a Variación de niveles (referido en porcentaje de harina):
HPMC: -1 = 2%, 0 = 3%, +1 = 4%, Psyllium: -1 = 0%, 0 = 2%, +1 = 4%; Agua: -1 = 90%, 0 = 100%, +1 = 110%

2.2.3 Calidad de los panes

El volumen del pan fue determinado utilizando un analizador de volumen Volscan Profiler (Stable Micro Systems, Godalming, UK). La medida del volumen se realizó por duplicado, a dos panes de cada elaboración. Los datos se analizaron calculando el volumen específico, dividiendo el volumen en mililitros obtenido por el equipo entre el peso del pan en gramos.

Se midió el largo, ancho y alto de los dos panes de cada elaboración en la recreación tridimensional del Volscan. Posteriormente se calculó la relación alto/ancho para cuantificar la magnitud con la que aumentaba la altura de los panes.

La pérdida de peso se obtuvo calculando la diferencia de peso de los panes elaborados con respecto al peso de la masa que se introdujo en los moldes antes de someterlos al proceso de horneado.

La textura de la miga fue medida por un TA-XT2 texture analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) provisto con el software "Texture Expert". Se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 25 mm de diámetro en un ensayo de doble compresión "Texture Profile Analysis" (TPA) para penetrar un 50% de profundidad a una velocidad de 2mm/s, con un retardo de 30 segundos entre la primera y la segunda compresión. Se obtuvieron datos de dureza, elasticidad y cohesividad a partir del gráfico TPA (Gomez, Ronda, Caballero, Blanco, & Rosell, 2007). Las determinaciones texturales fueron realizadas en rebanadas de 20 mm de espesor al día siguiente y a los 8 días de la elaboración. Se realizaron los análisis en la parte central de dos rebanadas de dos panes para cada tipo de elaboración.

El color se midió a través del espectrofotómetro Minolta CN-508i (Minolta, Co. LTD, Tokio, Japón). Los resultados se obtuvieron usando un iluminador estándar D65 y un observador estándar de 2º, y se expresaron en el espacio de color CIE L*a*b*. El color de la corteza fue medido en dos puntos diferentes de dos panes de cada muestra. De la misma manera, el color de la miga se midió en el punto central de dos rebanadas de cada pan, midiendo dos panes por cada muestra. Cada medida, en todos los casos, estaba integrada por una conjunción de 5 datos proporcionados por el espectrofotómetro.

Para realizar el análisis de imagen, se escanearon en color dos rebanadas de dos panes de cada elaboración en un escáner HP Scanjet G3110 con una configuración de balance neutro de brillo y contraste, y una resolución de 150 ppp. Estas imágenes posteriormente se convirtieron a 8 bits y fueron tratadas con el programa WCIF ImageJ Software v. 1.38c (NIH, Bethesda, USA) tomando una sección de miga de 10x10mm. Mediante la ejecución de una macro preestablecida se realizó la medida de los alveolos del pan obteniendo posteriormente la densidad alveolar de la rebanada y el tamaño medio del poro (Jusoh, Chin, Yusof, & Rahman, 2009).

2.2.4 Evaluación sensorial

Para comprobar la calidad de los panes realizados y obtener información sobre la opinión de los consumidores de estos productos, se realizó una prueba afectiva de grado de satisfacción. En esta evaluación participaron 75 catadores con edades comprendidas entre los 14 y los 60 años.

La prueba se realizó sobre 3 muestras de pan en las que se dejó fijo el nivel de HPMC (3%) y de agua (100%) debido a que con esos parámetros fue con los que mejores resultados se obtuvieron. Se introdujo como variante el nivel de psyllium en 0, 2 y 4% para ver el grado de aceptación de los distintos porcentajes de psyllium en las diferentes elaboraciones. Por último, se añadió la muestra más desfavorable de las tres anteriores (3% HPMC y 4% psyllium) con el nivel máximo de hidratación, para así comprobar el efecto del agua sobre esa formulación. La evaluación sensorial se realizó a través de una escala hedónica de 9 puntos (siendo 1, “me disgusta muchísimo”, 5 “ni me gusta, ni me disgusta” y 9, “me gusta muchísimo”), valorándose el aspecto visual, olor, textura, sabor, persistencia del sabor y otorgando una valoración global del pan catado.

2.2.5 Análisis estadístico

Para el diseño del experimento se utilizó Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies Inc, Warrenton, USA) generando superficies respuesta que permitieron valorar los efectos de las variables independientes en función de las variables dependientes consiguiendo optimizar así los niveles de HPMC, psyllium y agua utilizados en la formulación del pan. De cada variable analizada se obtuvo el polinomio que genera la superficie respuesta, así como un análisis de varianza

(ANOVA para $p < 0.05$) para los efectos principales y sus interacciones para determinar las diferencias significativas entre las distintas formulaciones.

Para el tratamiento de datos del análisis sensorial, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) utilizando el test LSD de Fisher ($p < 0.05$).

III. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Propiedades morfogeométricas del pan y pérdida de peso

La tabla II recoge los coeficientes de regresión que integran las curvas de superficie respuesta de las propiedades morfogeométricas (volumen y factores de forma) y de la pérdida de peso durante el horneado de los panes elaborados.

TABLA II

Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos ajustados mostrando la relación entre los factores HPMC, psyllium y agua (variables independientes) respecto de las propiedades del pan (variables dependientes).

Factor	Propiedades del pan			
	Volumen específico (ml/g)	Pérdida de peso (g)	Ratio H/W	Tiempo fermentación óptimo (min)
constante	27.49	140.599	1.01813	1590
A:HPMC	1.19	4.94875	-0.047125	5.625
B:Psyllium	-5.64417 [*]	-0.974583 [*]	-1.33217 [*]	137.813
C:Agua	-0.471083 [*]	-2.66679 [*]	0.0121792	-32.625
AA	-0.484583	-0.105417	-0.0819583	5.625
AB	-0.05375	-0.5125	-0.0105	-16.875
AC	0.01875	-0.03575	0.005625	0
BB	0.126354	0.689271 [*]	0.00457292	7.03125
BC	0.045125 [*]	-0.01725	0.012175 [*]	-1.125
CC	0.00205417	0.0145458 [*]	-0.00019958	0.16875
R ²	95.85	96.86	84.13	76.97

Significación estadística para los efectos marcados con ^{*} de valor-P menor que 0.05

En los gráficos de superficie respuesta (fig. 1a), se observa que el volumen específico de los panes elaborados con distintos porcentajes de HPMC y psyllium descende cuanto menor es el porcentaje de agua utilizada para su elaboración. También observamos como el incremento del nivel de psyllium disminuye de manera notable su volumen específico. A medida que el porcentaje de agua y psyllium se

incrementan (fig. 1c), esas diferencias se van atenuando debido a una interacción positiva entre los dos factores. Por último el HPMC no parece afectar al comportamiento de los panes en cuanto a este parámetro (fig. 1abc).

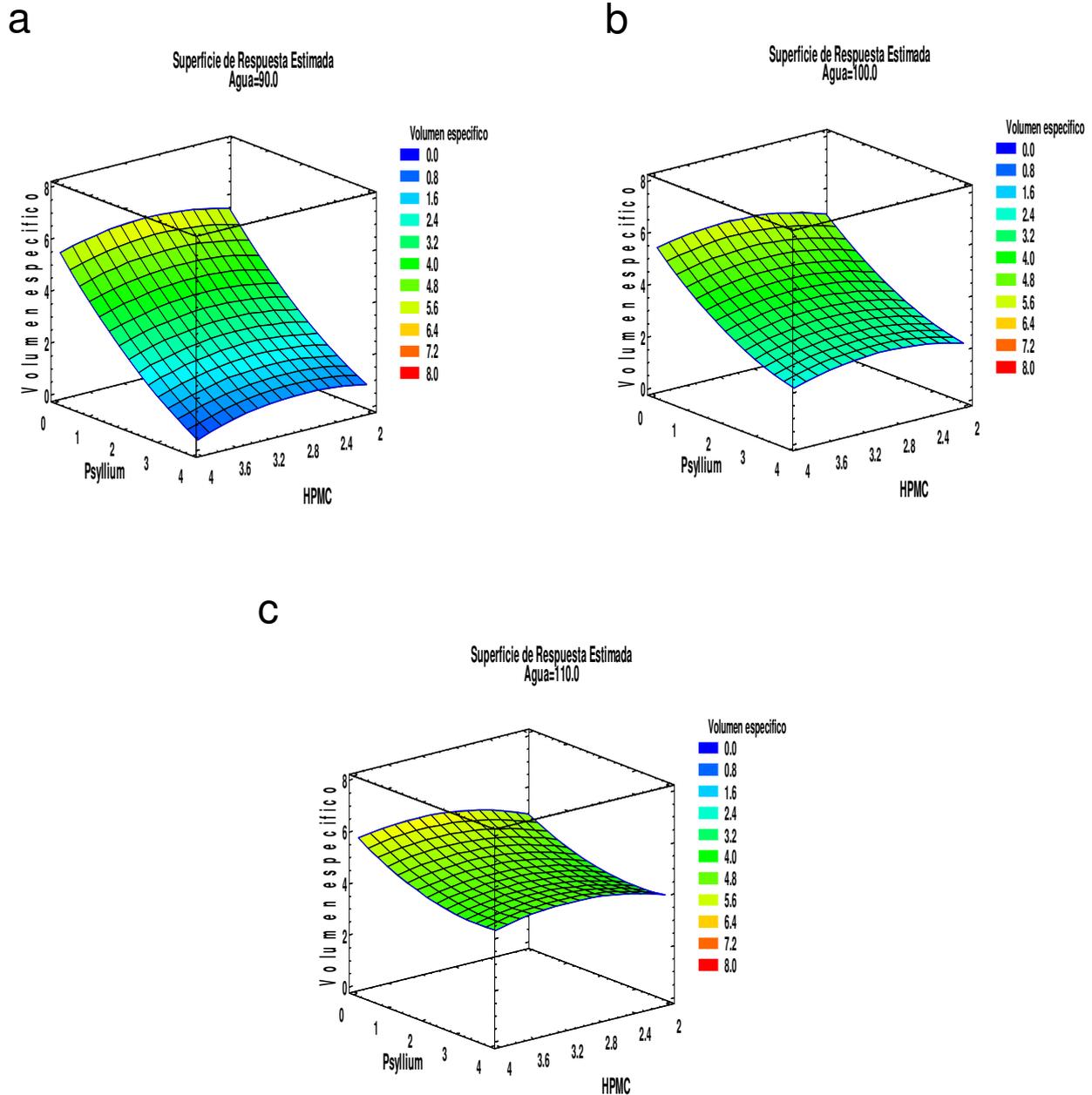


Fig. 1. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en tres niveles de hidratación (90%: a, 100%: b y 110%: c) para el volumen específico

Uno de los principales factores de decisión por parte de los consumidores a la hora de elegir un pan es el volumen específico. Es por esto que es un parámetro fundamental a la hora de evaluar la calidad del pan. Al igual que en los trabajos de

Hager y Arendt (2013), se ha observado que el aumento del nivel de hidratación de las masas tuvo un efecto positivo en todas las formulaciones. Aunque en este trabajo los distintos niveles de HPMC no han aportado una mejoría en el volumen del pan, son de sobra conocidos los efectos de mejora de los derivados de la celulosa en el incremento del volumen específico de los panes sin gluten (Barcenas & Rosell, 2005; Guarda, Rosell, Benedito, & Galotto, 2004; Rosell, Rojas, & de Barber, 2001). Cuando las cadenas hidratadas de HPMC se someten a altas temperaturas, éstas liberan el agua asociada a ellas permitiendo una interacción más fuerte entre sus cadenas. Esto permite que se forme una red capaz de reducir las pérdidas de gas mejorando así el volumen específico del pan (Haque, Richardson, Morris, Gidley, & Caswell, 1993). Elevados niveles de psyllium tuvieron un claro efecto negativo sobre los panes objeto de estudio de igual manera que lo tuvieron en los estudios de Haque y Morris (1994), debido a que un exceso de fibra puede provocar que el pan no leve lo suficiente durante el proceso de fermentación.

Existen diferencias significativas en cuanto a las pérdidas de peso ocasionadas durante el horneado dependiendo del nivel de agua utilizado, así como del tipo y cantidad de hidrocoloide (tabla II). Se acentúa la pérdida de peso cuanto mayor es la cantidad de agua utilizada para la elaboración (fig. 2c), ya que se provoca una mayor condensación de agua en la corteza de los panes durante la fase de enfriamiento y por lo tanto se provoca una mayor evaporación del agua de constitución del pan (Grenier, Monteau, Le Bail, & Hayert, 2002). En cambio, se observa que el psyllium las disminuye cuanto mayor es su dosificación (fig. 2b). El HPMC contribuye ligeramente a disminuir esas pérdidas pero de manera no significativa (fig. 2abc). Esto puede deberse a que el psyllium tiene una capacidad de hidratación y de retención de agua mayor que la del HPMC, por lo que sus efectos predominan en las elaboraciones donde está presente (Haque & Morris, 1994). Después del horneado es normal que se produzcan pérdidas de peso relacionadas con el nivel de hidratación de las masas, incrementándose cuanto mayor sea la cantidad de agua utilizada en el proceso. En este caso, el psyllium juega un papel fundamental minimizando estas pérdidas de peso, lo que hace más rentable el proceso de panificación.

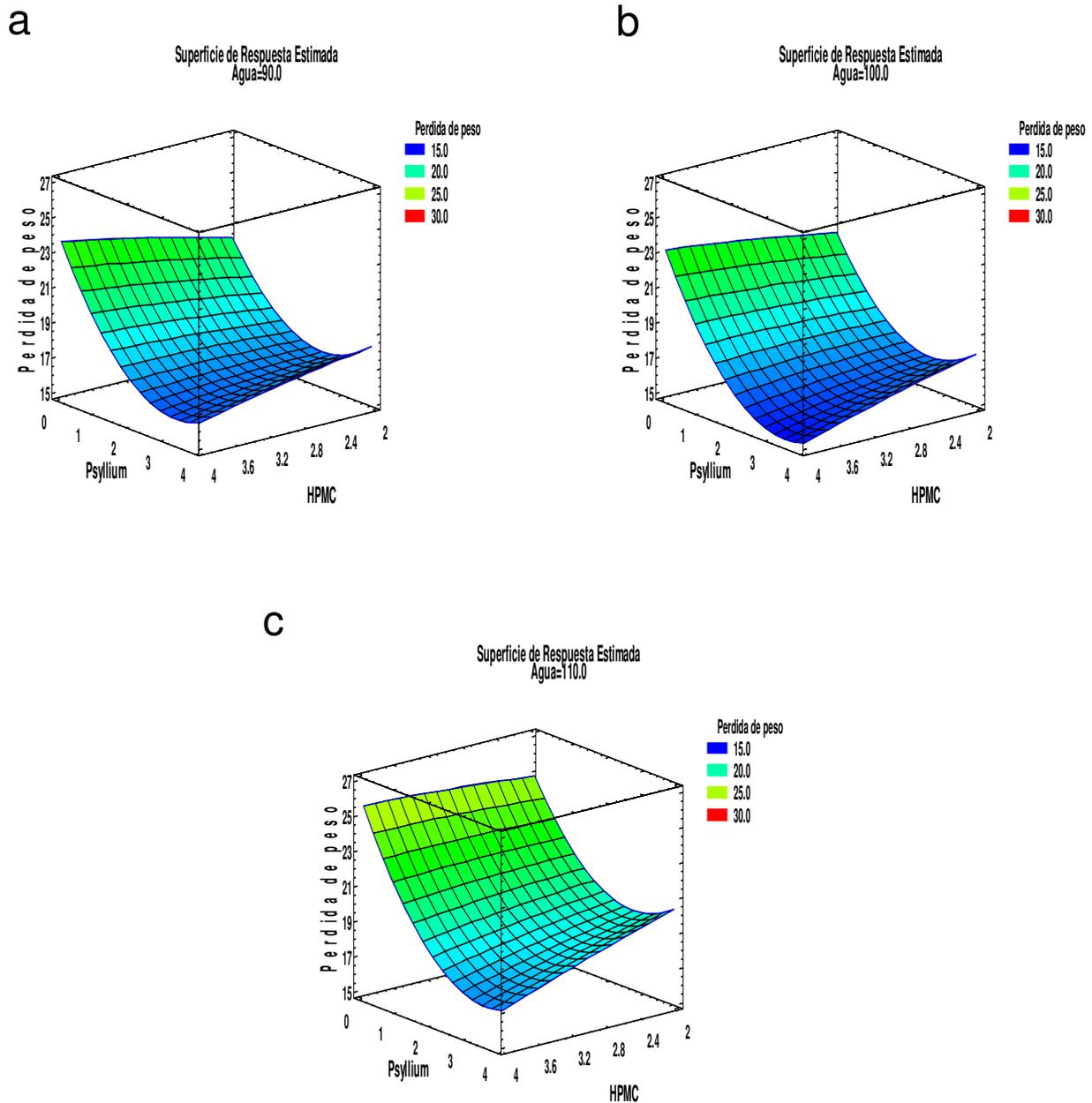


Fig. 2. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en tres niveles de hidratación (90%: a, 100%: b y 110%: c) para la pérdida de peso de los panes después del horneado

En ratio altura:anchura se observa que existen diferencias significativas debido a la influencia del psyllium (tabla II). Cuanto mayor es su dosificación, el ratio altura:anchura disminuye notablemente, debido a que elevadas cantidades de psyllium, puede debilitar la estructura de los panes, y por lo tanto puede impedir el aumento de volumen durante la fermentación y la cocción (Skara, Novotni, Cukelj, Smerdel, & Curic, 2013). Este comportamiento, según observamos en el gráfico de superficie respuesta (fig. 3), se acentúa cuanto menor es la cantidad de agua

utilizada para la elaboración de las masas de pan. De manera contraria, el HPMC no parece modificar el ratio altura:anchura obteniéndose panes con unos coeficientes muy aceptables.

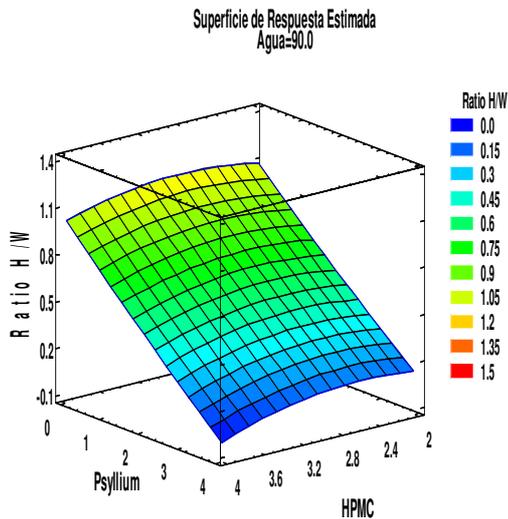


Fig. 3. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (90%) para el ratio H/W

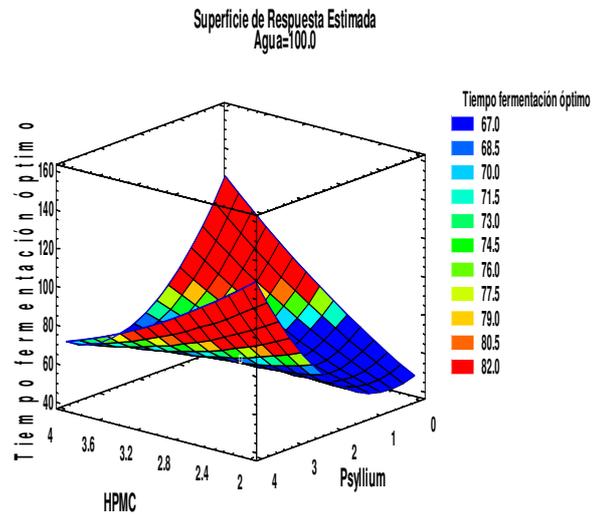


Fig. 4 Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (100%) para el tiempo óptimo de fermentación

En cuanto al tiempo de fermentación óptimo (tabla II), no existe un claro comportamiento de los hidrocoloides estudiados. Definimos tiempo óptimo de fermentación como el tiempo en el que se conseguiría el máximo volumen en relación a una forma aceptable. Durante ese periodo, la masa se expande debido a la generación de CO₂ por parte de las levaduras, estando su producción estrictamente relacionada con el metabolismo de la levadura y con el consumo de azúcares. Todo ese CO₂ producido migra hacia los núcleos de burbujas de aire formadas durante el amasado dando lugar a una estructura similar a la espuma (Romano, Toraldo, Cavella, & Masi, 2007). En este trabajo, el uso de los hidrocoloides estudiados parece que alargan el tiempo de fermentación de manera individual, aunque ese comportamiento no se observa de manera sinérgica entre los dos componentes. Los tiempos más largos se obtienen con porcentajes elevados de psyllium y bajos de HPMC, pero como norma general esos panes carecen de volumen. También se observan tiempos largos de fermentación con niveles altos de HPMC y bajos de psyllium, pero es este caso aunque los volúmenes suelen ser aceptables la apariencia de los panes empeora considerablemente (fig. 4). Por estas

razones no se puede concluir un comportamiento claro para tiempos de fermentación prolongados, y por lo tanto, como era de esperar según los estudios de Haque y Morris (1994), los tiempos de fermentación largos no contribuyen a alcanzar mayor volumen específico.

Por último, en las medidas de humedad de la miga de pan no se observó desequilibrio entre la zona superior, más en contacto con la corteza, y la zona inferior o base del pan. Existe una fuerte correlación entre las dos zonas del pan, notándose un aumento de humedad de la miga en los panes con mayor hidratación. Dada la poca relevancia de estos datos se ha optado por no incluirlos en ninguna tabla de resultados.

3.2 Ensayo de textura TPA

En la tabla III se muestran los resultados del ensayo de textura de los panes elaborados.

TABLA III

Coefficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos ajustados mostrando la relación entre los factores HPMC, psyllium y agua (variables independientes) respecto de los valores obtenidos en el ensayo de textura (variables dependientes).

Factor	Ensayo de textura					
	Dureza	Elasticidad	Cohesividad	Incremento dureza	Elasticidad 8	Cohesividad 8
constante	387.4	0.617625	-2.82112	530.572	2.40088	2.22475
A:HPMC	-19.2899	0.222125 [*]	0.825625	-28.3726	0.40425 [*]	0.043375
B:Psyllium	22.8412 [*]	-0.110208 [*]	-0.106	26.6914 [*]	0.163229 [*]	0.232479 [*]
C:Agua	-7.09612 [*]	0.00112083	0.0423625	-9.48006 [*]	-0.0530792	-0.0498417 [*]
AA	2.46767	0.0209583	-0.030125	5.71054 [*]	0.00470833	-0.00579167
AB	1.07112	0.01925 [*]	-0.00175	2.02088	-0.009	-0.008375
AC	0.03355	-0.004325	-0.006475	-0.0783	-0.0047	0.0001
BB	0.546479	0.00030208	-0.00209375	0.51151	-0.00288542	0.00355208
BC	-0.252288 [*]	0.000825 [*]	0.001275	-0.3049 [*]	-0.0008625	-0.002125 [*]
CC	0.0345417 [*]	4.46E-05	-0.00011125	0.0470279	0.00035958	0.00028958 [*]
R²	70.57	97.77	70.77	95.61	84.73	95.07

Significación estadística para los efectos marcados con ^{*} de valor-P menor que 0.05

Al igual que en los trabajos de Haque y Morris (1994), las gráficas de superficie respuesta muestran que la dureza de los panes está claramente condicionada por la cantidad de agua utilizada en su elaboración. Porcentajes bajos de agua (fig. 5a), y niveles elevados de psyllium han contribuido a aumentar la firmeza de los panes de

manera significativa (Mariotti, Pagani, & Lucisano, 2013). Hager y Arendt (2013), comprobaron, al igual que este trabajo, que el aumento de HPMC en la formulación no ha incrementado la dureza de los panes (fig. 5abc).

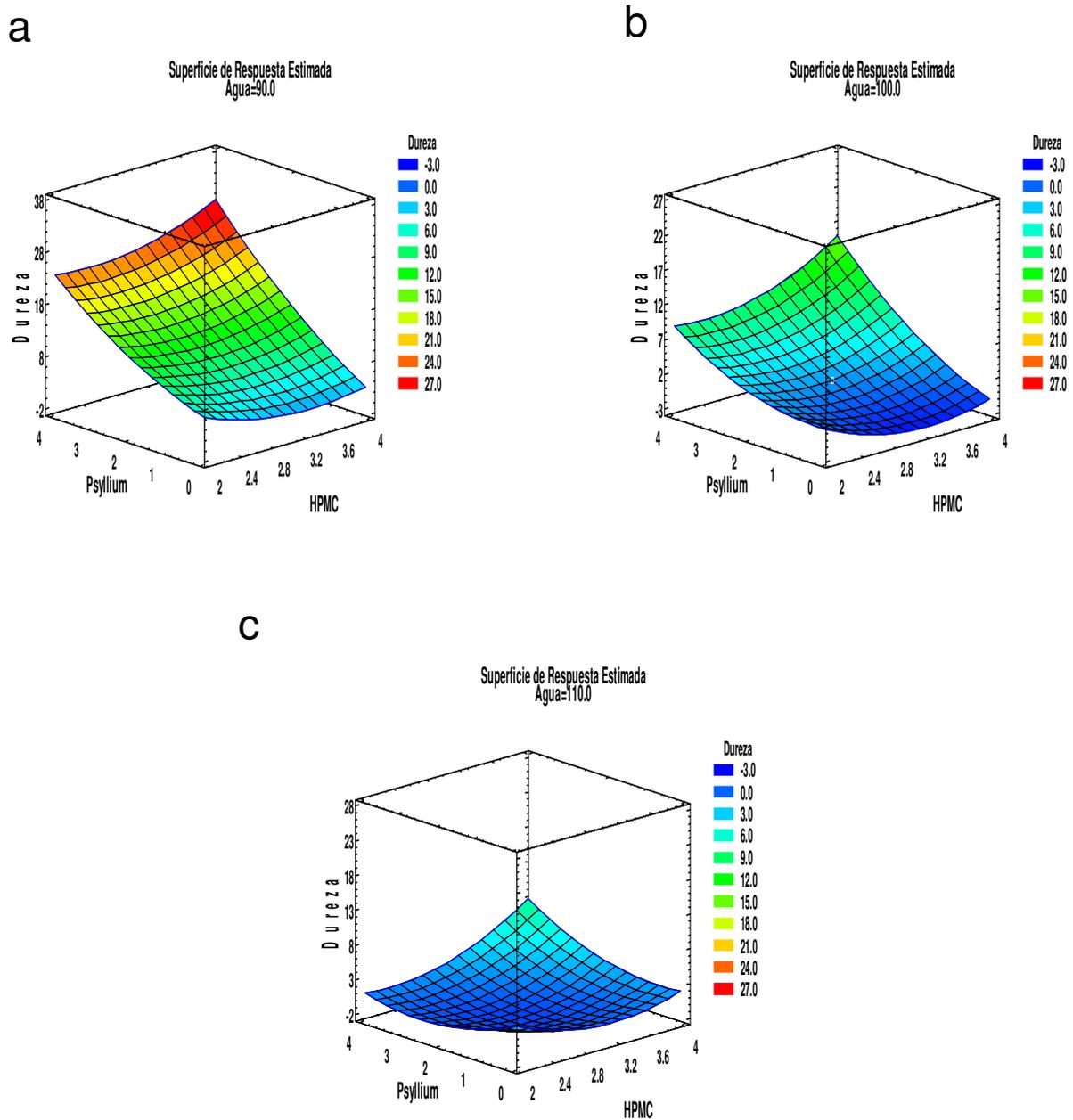


Fig.5. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en tres niveles de hidratación (90%: a, 100%: b y 110%: c) para la dureza

En la medida de la elasticidad observamos de manera significativa como el HPMC disminuye el comportamiento elástico de los panes, mientras que el psyllium lo aumenta. Estas diferencias han sido más acusadas en los panes elaborados con alto nivel de hidratación (fig. 6).

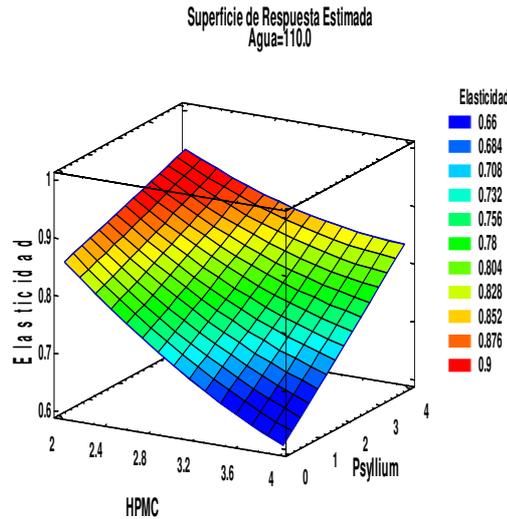


Fig. 6. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (110%) para la elasticidad

La cohesividad de los panes no ha mostrado diferencias significativas en ninguno de los parámetros estudiados. Aun así encontramos ciertas variaciones dependiendo del nivel de agua estudiado. En panes con un 90% de agua (fig.7a), distintos niveles de psyllium no parecen modificar la cohesividad de las elaboraciones, mientras que el aumento de HPMC la incrementa ligeramente dando lugar a panes con una mayor resistencia a la deformación (Martinez, Oliete, & Gomez, 2013). De manera contraria, niveles del 110% de agua y alta dosificación de HPMC tienden a disminuir la cohesividad de los panes, mientras que elevados niveles de psyllium la aumenta ligeramente (fig. 7b).

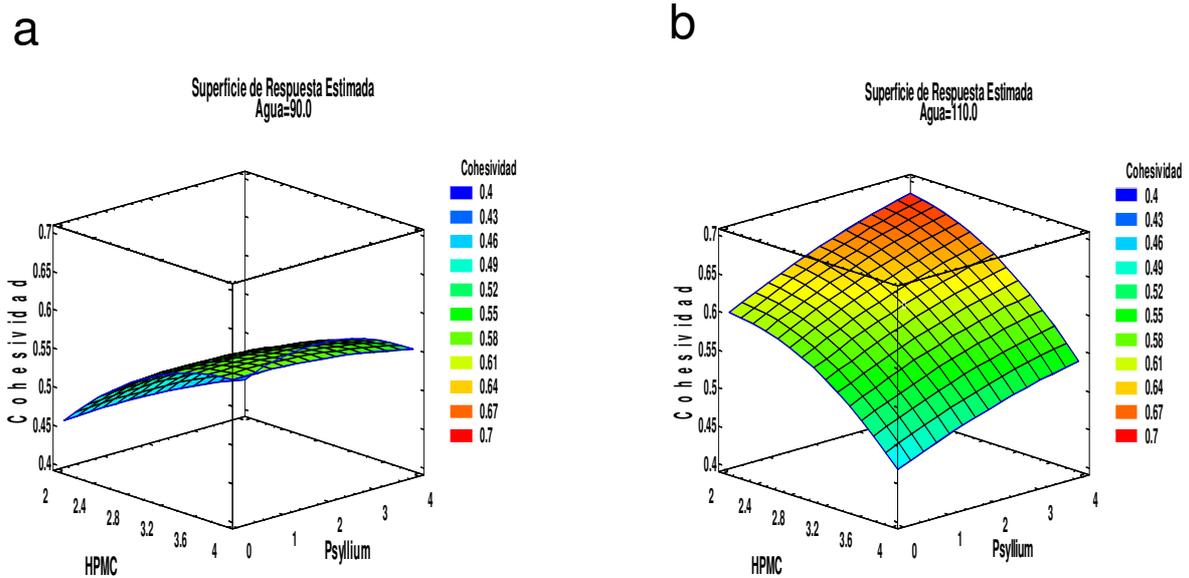


Fig. 7. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en dos niveles de hidratación (90%: a y 110%: b) para la cohesividad

Tras ocho días de conservación a temperatura y humedad controladas, se observa un incremento significativo de la dureza en los panes elaborados. Este aumento se debe al efecto de los factores agua y psyllium, y a la consecuencia directa de la retrogradación del almidón de la harina (Vandeputte, Vermeylen, Geeroms, & Delcour, 2003). En las gráficas de superficie respuesta (fig. 8a) observamos que elevados niveles de psyllium junto con bajos niveles de agua contribuyen a un incremento significativo de la dureza. A medida que se incrementa el nivel de agua esas diferencias dejan de ser tan notables, pero respetando las mismas tendencias (fig. 8bc).

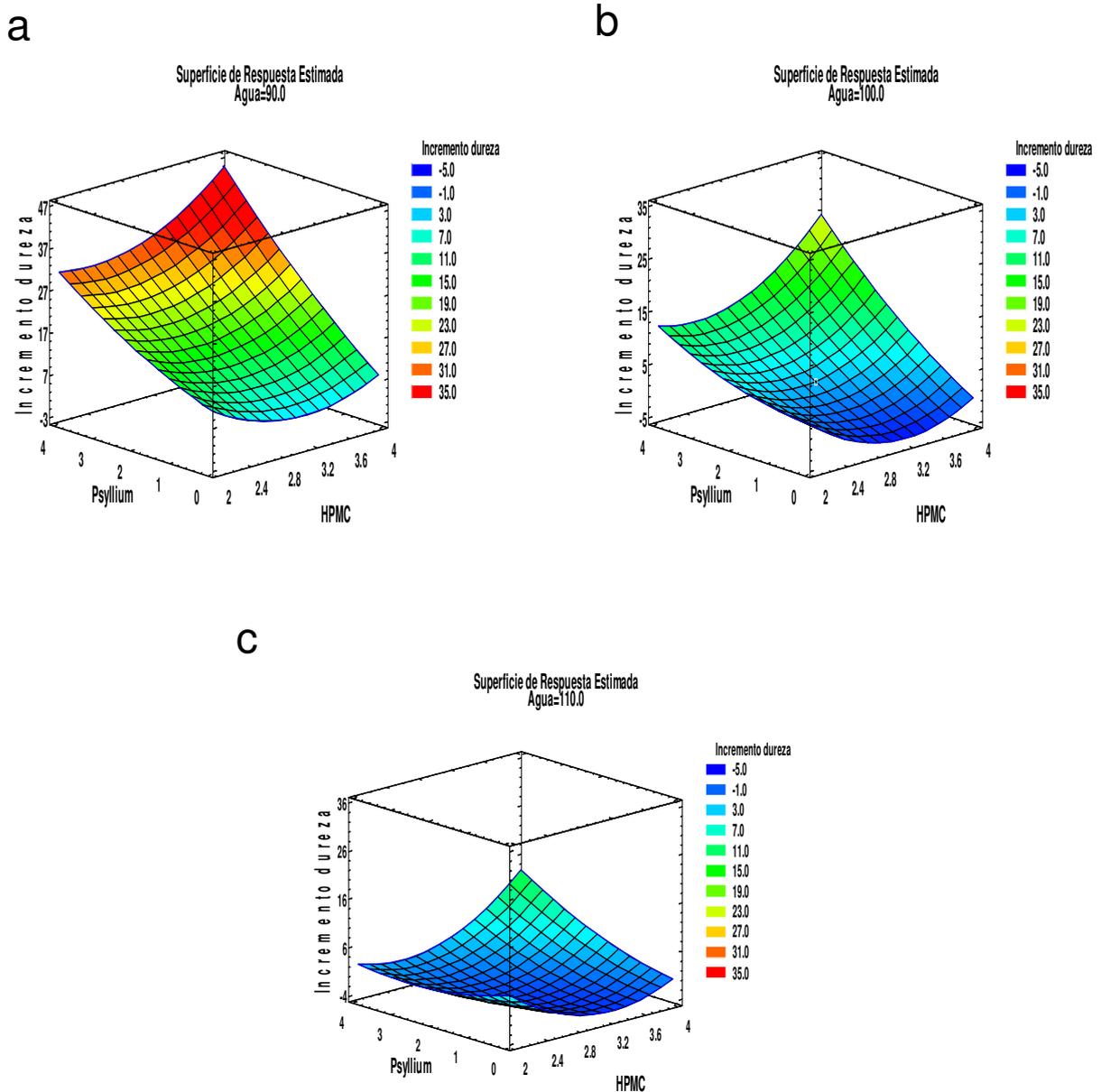


Fig. 8 Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en tres niveles de hidratación (90%: a, 100%: b y 110%: c) para el incremento de dureza después de ocho días de almacenamiento

La elasticidad ha disminuido ligeramente tras ocho días de almacenamiento. Se observa en estos panes, que la cantidad de agua utilizada para su elaboración no ha modificado la estructura elástica de manera significativa. En cambio el uso de psyllium ha provocado un incremento significativo de la elasticidad, mientras que el HPMC la ha reducido ligeramente (fig. 9).

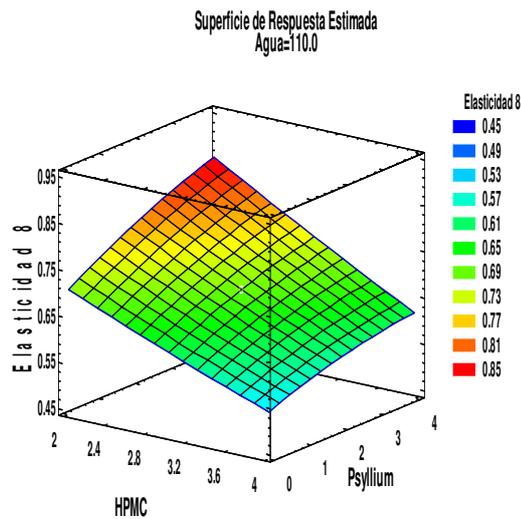
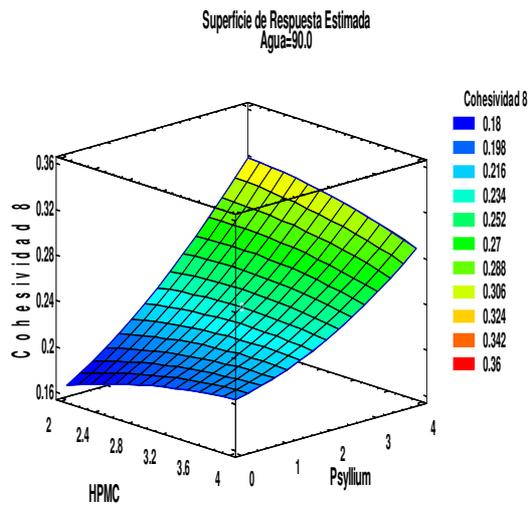


Fig. 9. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (110%) para la elasticidad después de ocho días de almacenamiento

Después de ocho días de almacenamiento, la cohesividad presenta diferencias significativas dependiendo del nivel del agua, así como del factor de psyllium utilizado. La cohesividad aumenta claramente en niveles de hidratación bajos debido al incremento de psyllium (fig. 10a). Por otro lado el incremento de agua es el responsable de ese aumento en niveles de hidratación altos (fig. 10b).

a



b

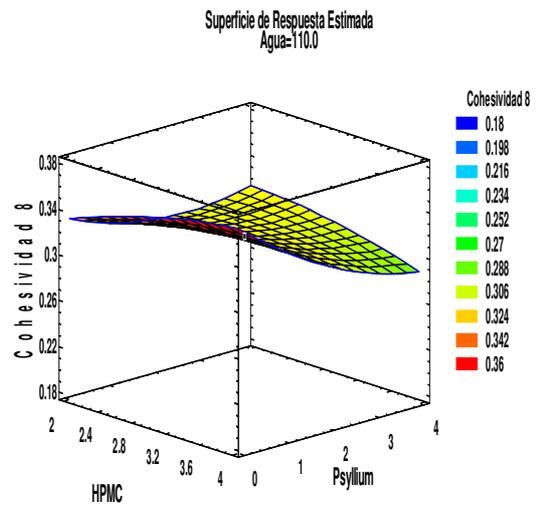


Fig. 10. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en dos niveles de hidratación (90%: a y 110%: b) para la cohesividad después de ocho días de almacenamiento

3.3 Propiedades de color de la corteza y la miga

Se observa en la tabla IV las principales variaciones en la luminosidad de la corteza. Los cambios se deben en mayor medida a la interacción de los tres niveles de variación del agua con las distintas cantidades de psyllium. En las gráficas de superficie respuesta (fig. 11) se observa que mayor cantidad de psyllium ha dado lugar a panes con una corteza más pálida. El HPMC ha contribuido ligeramente en el aporte de luminosidad a la corteza, pero de manera no significativa.

La corteza es la zona del pan expuesta al tratamiento térmico y le da el carácter crujiente dependiendo del tipo de pan del que se trate. Esta zona supera los 100°C y a estas temperaturas se desencadenan las reacciones de Maillard y caramelización de azúcares. El color de la corteza, está estimulado fundamentalmente por estas reacciones, por lo tanto los cambios en el color de la corteza dependen directamente de los niveles del agua estudiados, así como de la presencia de azúcares reductores (Martins, Jongen, & van Boekel, 2000; Purlis, 2010). Por estas razones los cambios de color observados en este trabajo, tal y como podemos ver en las imágenes de la fig. 12, se deben fundamentalmente a los distintos tiempos de fermentación y por lo tanto al agotamiento de los azúcares antes del horneado.

TABLA IV

Coefficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos ajustados mostrando la relación entre los factores HPMC, psyllium y agua (variables independientes) respecto de los valores obtenidos en las medidas de color (variables dependientes).

Factor	Medida de color					
	Lc	ac	bc	Lm	am	bm
constante	165.953	-98.4925	-20.7375	29.9237	-3.5525	-4.945
A:HPMC	5.77875	-0.955	-5.9375	10.125 [*]	-1.195	-3.33875
B:Psyllium	23.3148	-11.9104	-14.9833	3.32271	2.86208 [*]	8.17313 [*]
C:Agua	-2.58142	2.42867	1.43058	0.588542	0.0591667 [*]	0.298
AA	1.32958	-0.568333	-0.384167	-0.733333	0.326667 [*]	0.71625
AB	-1.77375	1.045	0.4725	-0.82125	0.0325	-0.13875
AC	-0.0975	0.022	0.077	-0.01875	-0.0075	-0.0045
BB	0.783646	-0.643333	-0.634792	-0.343958	0.0904167 [*]	-0.0284375
BC	-0.20575 [*]	0.11125	0.153	0.0125	-0.02675 [*]	-0.06575
CC	0.0152208	-0.0131833	-0.00944167	-0.00335833	-3.33E-05	-0.0012625
R ²	85.44	79.33	75.15	85.68	99.09	89.08

Significación estadística para los efectos marcados con * de valor-P menor que 0.05

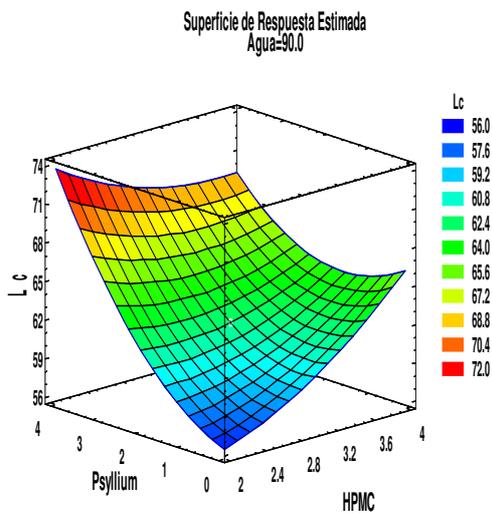


Fig. 11. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (90%) para la luminosidad de la corteza (Lc)

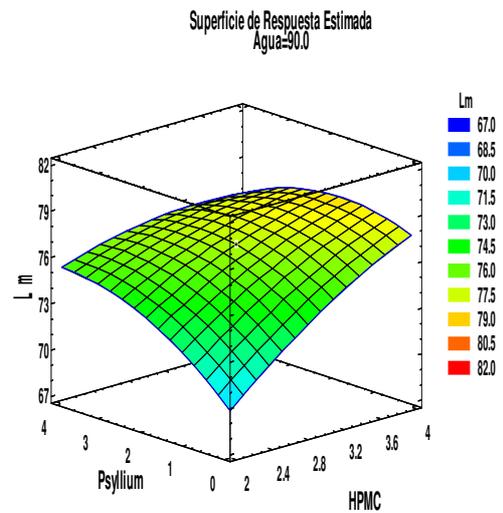


Fig. 13. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (90%) para la luminosidad de la miga (Lm)



Fig. 12. Cambios de color en la corteza para una misma elaboración debidos a distintos tiempos de fermentación. Imagen superior, tiempo de fermentación de 60 minutos. Imagen inferior, tiempo de fermentación de 105 minutos.

Por otro lado, la luminosidad de la miga aumenta significativamente cuanto mayor es el nivel de HPMC (fig. 13) tal y como podemos ver en las imágenes de rebanadas de pan de la fig. 14. En este caso el psyllium contribuyó a la luminosidad final, pero sin ser de manera significativa.



Fig. 14. Cambios de color en la miga debidos al uso de HPMC y psyllium. Izquierda, elaboración realizada con 2% de HPMC y 0% de psyllium. Derecha, elaboración realizada con 3% de HPMC y 4% de psyllium.

3.4 Análisis de imagen

En cuanto al tamaño del poro, no existen diferencias significativas entre tratamientos (tabla V). Aun así se observa que el tamaño del poro tiene una clara tendencia a minimizarse cuanto más psyllium y menos agua se utiliza en las distintas elaboraciones (fig. 15).

La densidad alveolar tampoco muestra diferencias entre tratamientos (tabla V). Pero niveles bajos tanto de HPMC como de psyllium dan lugar a un incremento del porcentaje de alveolos en el pan (fig. 16).

TABLA V

Coefficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos ajustados mostrando la relación entre los factores HPMC, psyllium y agua (variables independientes) respecto de los valores obtenidos en el análisis de imagen (variables dependientes).

Factor	Análisis de imagen	
	Tamaño del poro	Densidad alveolar
constante	2.54136	11.125
A:HPMC	0.153081	7.75
B:Psyllium	-0.198637	-2.10417
C:Agua	-0.0493923	0.504167
AA	-0.0168812	0.979167
AB	0.00214625	0.6875
AC	-0.000524	-0.1625
BB	-0.00626281	0.807292
BC	0.0020065	-0.03125
CC	0.000248513	-0.000208333
R²	54.45	28.88

Significación estadística para los efectos marcados con * de valor-P menor que 0.05

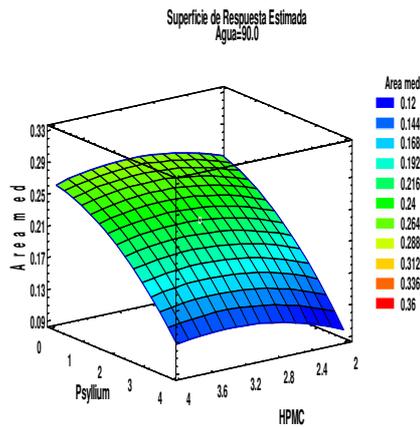


Fig. 15. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (90%) para el área media del poro

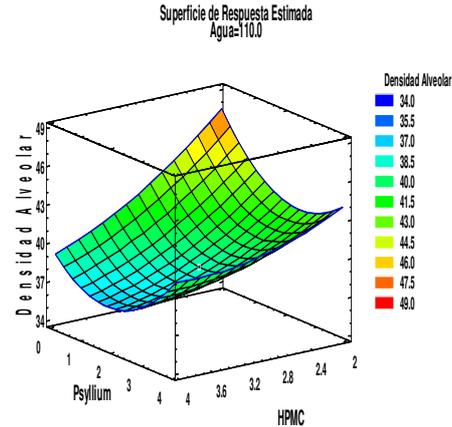


Fig. 16. Influencia de HPMC (2, 3 y 4%) y psyllium (0, 2 y 4%) en un nivel de hidratación (110%) para la densidad alveolar

3.5 Evaluación sensorial

La evaluación sensorial se realizó para los atributos de aspecto visual, olor, textura, sabor, persistencia del sabor y valoración global, mediante un panel de cata de consumidores según se presenta en la fig. 19. De manera contraria a los estudios de Barcenas y Rosell (2005), los panes elaborados exclusivamente con HPMC fueron los peor valorados por los consumidores. En este estudio se observó cómo los panes elaborados con porcentajes del 2% y 4% de psyllium, fueron los mejor valorados por los catadores. En el mismo sentido, se puede ver como la misma formulación pero con mayor índice de hidratación fue la más aceptada. De acuerdo con los resultados del ANOVA (tabla VI), los panes elaborados con cantidades más altas de psyllium obtuvieron mejores resultados que los panes elaborados sin psyllium o con baja cantidad de éste. El color del pan es una característica importante para los consumidores, y en este caso se decantaron por panes ligeramente más claros (Hathorn, Biswas, Gichuhi, & Benjamin, 2008; Ho, Aziz, & Azahari, 2013).

TABLA VI

Influencia de HPMC y psyllium en la evaluación sensorial de la calidad de los panes

Factor	Evaluación sensorial					
	Aspecto visual	Olor	Textura	Sabor	Persistencia del sabor	Valoración global
3 0 100	6.16 ^a	6.25 ^a	6.79 ^{bc}	5.94 ^a	5.98 ^a	6.35 ^a
3 2 100	6.71 ^{ab}	6.59 ^a	7.13 ^{bc}	6.61 ^a	6.56 ^{ab}	7.09 ^b
3 4 100	7.31 ^{cd}	6.27 ^a	5.52 ^a	6.12 ^a	6.33 ^a	6.11 ^a
3 4 110	7.44 ^d	7.46 ^b	7.58 ^c	7.42 ^b	7.14 ^b	7.65 ^b

Superíndices diferentes dentro de la misma columna fueron estadísticamente diferente para un valor-P menor que 0.05

En cuanto al olor, apenas se notaron diferencias en ninguna de las elaboraciones, pero el panel de cata detectó diferencias en el olor de la muestra con 3% de HPMC, 4% de psyllium y 110% de agua, valorándolo como algo positivo.

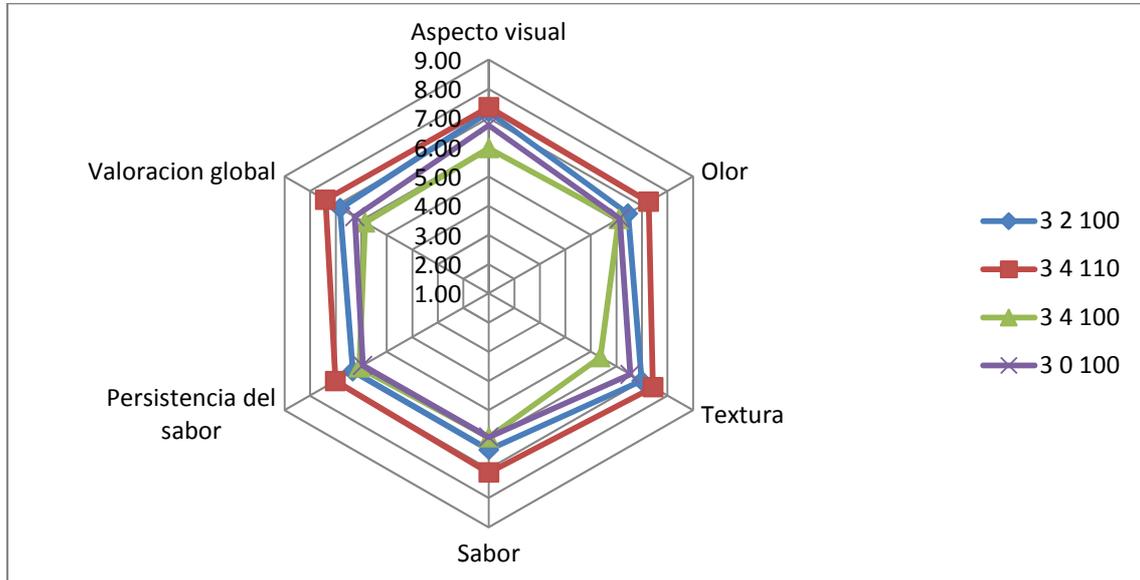


Fig. 19. Evaluación sensorial para la los parámetros aspecto visual, olor, textura, sabor, persistencia del sabor y valoración global, para las cuatro elaboraciones estudiadas (%HPMC, %Psyllium, %Agua).

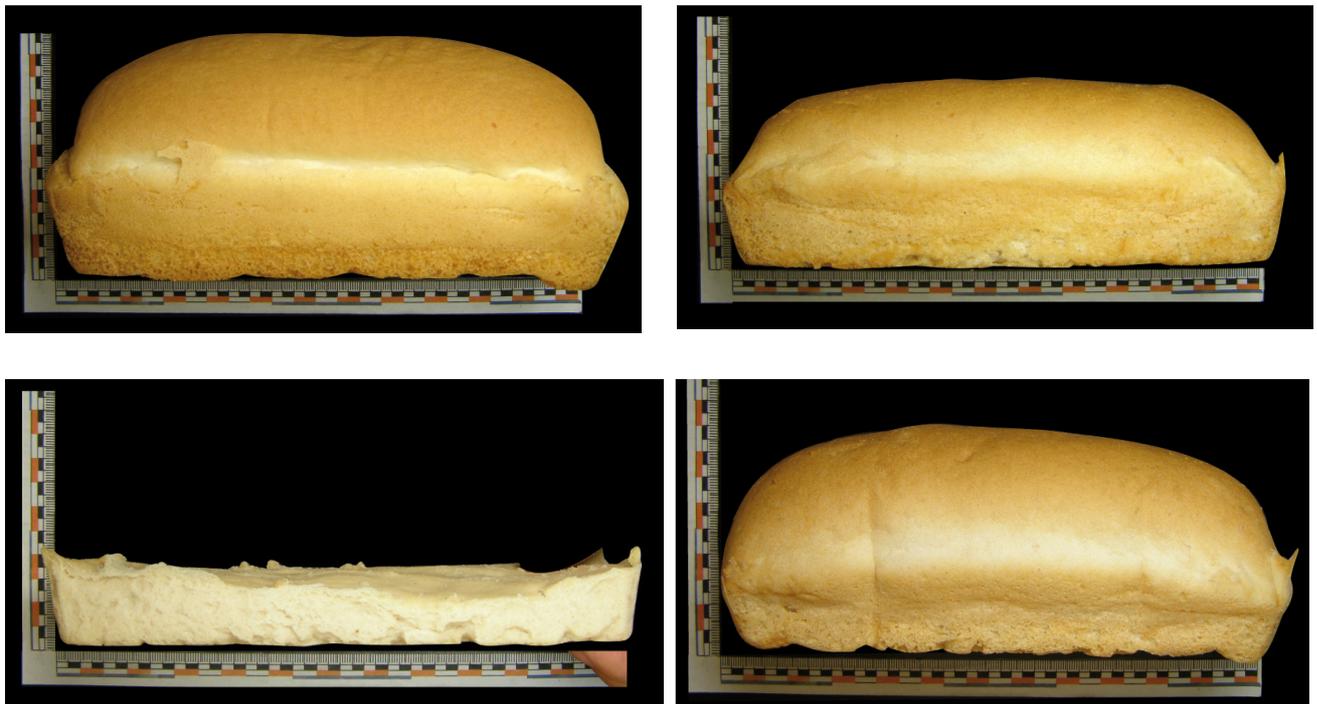


Fig. 20. Imágenes de los diferentes panes sin gluten elaborados con HPMC y psyllium presentados en el panel de cata. De izquierda a derecha, y de arriba a abajo: 3% HPMC 0% psyllium 100% agua (60 min. fermentación), 3% HPMC 4% psyllium 110% agua (60 min. fermentación), 3% HPMC 2% psyllium 100% agua (60 min. fermentación) y 3% HPMC 4% psyllium 90% agua (150 min. fermentación).

En el análisis de la textura es donde se encuentran las mayores diferencias entre los panes. Al igual que en los estudios de Haque y Morris (1994), el psyllium tiene una alta capacidad de retención de agua y tiende a modificar las masas haciéndolas más consistentes. Esa tendencia se nota después del horneado, obteniendo los panes con psyllium una estructura mucho más compacta y desarrollando menor volumen. El nivel de hidratación, por lo tanto, es fundamental a la hora de elaborar esta clase de panes. Por estas razones, la elaboración con 3% HPMC, 4% de psyllium y 100% ha recibido las puntuaciones más bajas por ser un pan muy compacto y de poco volumen. De manera contraria, ese mismo pan pero con un nivel de hidratación del 110% ha sido el mejor valorado por el panel de catadores.

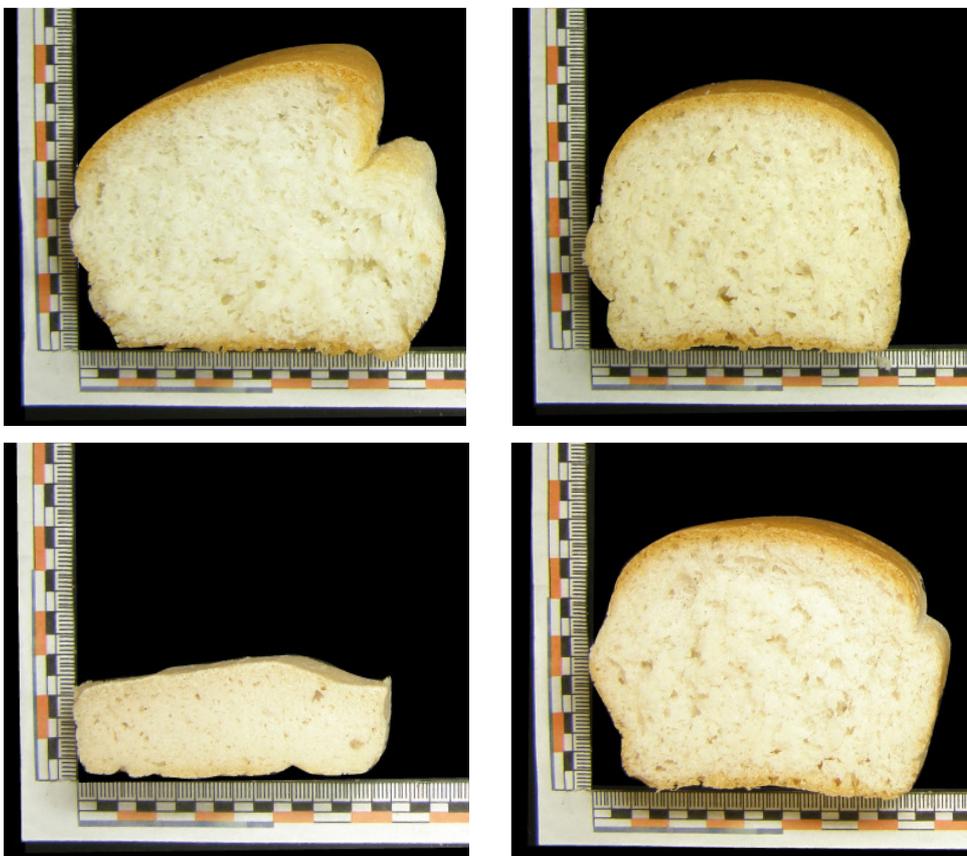


Fig. 7. Imágenes de rebanada de los diferentes panes sin gluten elaborados con HPMC y psyllium presentados en el panel de cata. De izquierda a derecha, y de arriba a abajo: 3% HPMC 0% psyllium 100% agua (60 min. fermentación), 3% HPMC 4% psyllium 110% agua (60 min. fermentación), 3% HPMC 2% psyllium 100% agua (60 min. fermentación) y 3% HPMC 4% psyllium 90% agua (150 min. fermentación).

En cuanto al sabor y su persistencia, el panel de catadores ha determinado que la elaboración que mejor sabor deja en boca es la 3% HPMC, 4% de Psyllium y 110%.

De manera general, en la valoración global de los panes, todas las elaboraciones fueron aceptables, pues obtuvieron puntuaciones superiores a 4. Los panelistas calificaron la elaboración con 3% HPMC, 4% de Psyllium y 110% con la puntuación más alta.

IV. CONCLUSIONES

Sin duda alguna, el uso de fibras e hidrocoloides en la elaboración de panes sin gluten, es necesario para mejorar su calidad y así potenciar su consumo. Se ha comprobado cómo su incorporación da lugar a una estructura física similar al gluten capaz de retener CO₂ producido durante la fermentación.

El comportamiento del HPMC y del psyllium es muy variable dependiendo del nivel de hidratación con el que se esté trabajando. En ese sentido, podemos decir que elaboraciones con un nivel de hidratación alto dan lugar a panes más voluminosos, de menor dureza y con una buena estructura interna. En cambio, en niveles de hidratación medio y bajo, el psyllium provoca un notable descenso en el volumen específico y por lo tanto una mayor dureza de los panes. El HPMC no presenta un efecto claro en sus distintas dosificaciones, pero aun así es necesario para conseguir panes con un volumen comercial óptimo, elásticos y con una buena cohesividad.

El color de la corteza del pan se vio claramente afectado por los tiempos de fermentación. Los panes con tiempos de fermentación elevados han dado lugar a cortezas más blancas y poco uniformes, mientras que con tiempos de fermentación más cortos se han obtenido panes más oscuros. Por otro lado, el color de la miga parece claramente afectado por el nivel de HPMC, ya que el uso de este hidrocoloide da lugar a migas más blancas. Por lo tanto, es conveniente encontrar un equilibrio en su dosificación pues el consumidor final parece rechazar los panes con las migas tan blancas.

En la evaluación sensorial se observa que panes elaborados con dosis elevadas de psyllium han tenido mayor aceptación que el resto. Estos panes son aceptables siempre y cuando se utilicen elevadas dosificaciones de agua, ya que de lo contrario los panes pasan a ser peor valorados debido a su escaso volumen y su gran dureza.

Finalmente, se puede concluir que el uso de psyllium junto con HPMC en su justa medida es una buena alternativa para el desarrollo de panes libres de gluten, siempre y cuando se utilicen las proporciones adecuadas de agua en función del pan que busquemos.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Barcenas, M. E., & Rosell, C. A. (2005). Effect of HPMC addition on the microstructure, quality and aging of wheat bread. *Food Hydrocolloids*, *19*(6), 1037-1043.
- Barcenas, M. E., & Rosell, C. M. (2006). Different approaches for improving the quality and extending the shelf life of the partially baked bread: low temperatures and HPMC addition. *Journal of Food Engineering*, *72*(1), 92-99.
- Bernardo, D., van Hoogstraten, I. M. W., Verbeek, W. H. M., Pena, A. S., Mearin, M. L., Arranz, E., Garrote, J. A., Scheper, R. J., Schreurs, M. W. J., Bontkes, H. J., Mulder, C. J. J., & von Blomberg, B. M. E. (2008). Decreased circulating iNKT cell numbers in refractory coeliac disease. *Clinical Immunology*, *126*(2), 172-179.
- Farahnaky, A., Askari, H., Majzoobi, M., & Mesbahi, G. (2010). The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels. *Journal of Food Engineering*, *100*(2), 294-301.
- Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*, *56*(2-3), 153-161.
- Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, *15*(3-4), 143-152.
- Gomez, M., Ronda, F., Caballero, P. A., Blanco, C. A., & Rosell, C. M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids*, *21*(2), 167-173.
- Green, P. H. R., & Cellier, C. (2007). Medical progress: Celiac disease. *New England Journal of Medicine*, *357*(17), 1731-1743.
- Green, P. H. R., & Jabri, B. (2003). Coeliac disease. *Lancet*, *362*(9381), 383-391.
- Green, P. H. R., & Jabri, B. (2006). Celiac disease. *Annual Review of Medicine*, *57*, 207-221.
- Grenier, A., Monteau, J. Y., Le Bail, A., & Hayert, M. (2002). Effect of external conditions on the rate of post-baking chilling of bread. *Journal of Food Engineering*, *55*(1), 19-24.
- Guarda, A., Rosell, C. M., Benedito, C., & Galotto, M. J. (2004). Different hydrocolloids as bread improvers and antistaling agents. *Food Hydrocolloids*, *18*(2), 241-247.
- Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, *37*(1), 75-81.
- Hager, A.-S., & 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.
- Haque, A., & Morris, E. R. (1994). Combined use of ispaghula and hpmc to replace or augment gluten in breadmaking. *Food Research International*, *27*(4), 379-393.
- Haque, A., Richardson, R. K., Morris, E. R., Gidley, M. J., & Caswell, D. C. (1993). Thermogelation of methylcellulose .2. effect of hydroxypropyl substituents. *Carbohydrate Polymers*, *22*(3), 175-186.
- Hathorn, C. S., Biswas, M. A., Gichuhi, P. N., & Benjamin, A. C. B. (2008). Comparison of chemical, physical, micro-structural, and microbial properties of breads supplemented

- with sweetpotato flour and high-gluten dough enhancers. *Lwt-Food Science and Technology*, 41(5), 803-815.
- Hill, I. D., Dirks, M. H., Liptak, G. S., Colletti, R. B., Fasano, A., Guandalini, S., Hoffenberg, E. J., Horvath, K., Murray, J. A., Pivor, M., & Seidman, E. G. (2005). Guideline for the diagnosis and treatment of celiac disease in children: Recommendations of the North American Society for Pediatric Gastroenterology, Hepatology and Nutrition. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 40(1), 1-19.
- Ho, L.-H., Aziz, N. A. A., & Azahari, B. (2013). Physico-chemical characteristics and sensory evaluation of wheat bread partially substituted with banana (*Musa acuminata* X *balbisiana* cv. Awak) pseudo-stem flour. *Food Chemistry*, 139(1-4), 532-539.
- Jusoh, Y. M. M., Chin, N. L., Yusof, Y. A., & Rahman, R. A. (2009). Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 366-371.
- Lahdeaho, M.-L., Lindfors, K., Airaksinen, L., Kaukinen, K., & Maki, M. (2012). Recent advances in the development of new treatments for celiac disease. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 12(12), 1589-1600.
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1033-1047.
- Mariotti, M., Lucisano, M., Pagani, M. A., & Ng, P. K. W. (2009). The role of corn starch, amaranth flour, pea isolate, and Psyllium flour on the rheological properties and the ultrastructure of gluten-free doughs. *Food Research International*, 42(8), 963-975.
- Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2013). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 393-400.
- Martinez, M., Oliete, B., & Gomez, M. (2013). Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 424-429.
- Martins, S., Jongen, W. M. F., & van Boekel, M. (2000). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 364-373.
- McCarthy, D. F., Gallagher, E., Gormley, T. R., Schober, T. J., & Arendt, E. K. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, 82(5), 609-615.
- Phimolsiripol, Y., Mukprasirt, A., & Schoenlechner, R. (2012). Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 389-395.
- Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products - A review. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 239-249.
- Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2009). Effects of oxidase and protease treatments on the breadmaking functionality of a range of gluten-free flours. *European Food Research and Technology*, 229(2), 307-317.
- Romano, A., Toraldo, G., Cavella, S., & Masi, P. (2007). Description of leavening of bread dough with mathematical modelling. *Journal of Food Engineering*, 83(2), 142-148.
- Rosell, C. M., Rojas, J. A., & de Barber, C. B. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 15(1), 75-81.
- Rubio-Tapia, A., & Murray, J. A. (2010). Celiac disease. *Current Opinion in Gastroenterology*, 26(2), 116-122.
- Sainsbury, K., Mullan, B., & Sharpe, L. (2013). Gluten free diet adherence in coeliac disease. The role of psychological symptoms in bridging the intention-behaviour gap. *Appetite*, 61, 52-58.

- Sakac, M., Torbica, A., Sedej, I., & Hadnadev, M. (2011). Influence of breadmaking on antioxidant capacity of gluten free breads based on rice and buckwheat flours. *Food Research International*, 44(9), 2806-2813.
- Sanchez, H. D., Osella, C. A., & 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.
- Sarkar, N., & Walker, L. C. (1995). Hydration dehydration properties of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, 27(3), 177-185.
- Skara, N., Novotni, D., Cukelj, N., Smerdel, B., & Curic, D. (2013). Combined effects of inulin, pectin and guar gum on the quality and stability of partially baked frozen bread. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 428-436.
- Torbica, A., Hadnadev, M., & Dapcevic, T. (2010). Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 24(6-7), 626-632.
- Toufeili, I., Dagher, S., Shadarevian, S., Noureddine, A., Sarakbi, M., & Farran, M. T. (1994). Formulation of gluten-free pocket-type flat breads - optimization of methylcellulose, gum-arabic, and egg-albumin levels by response-surface methodology. *Cereal Chemistry*, 71(6), 594-601.
- Vandeputte, G. E., Vermeylen, R., Geeroms, J., & Delcour, J. A. (2003). Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *Journal of Cereal Science*, 38(1), 61-68.
- Ylimaki, G., Hawrysh, Z. J., Hardin, R. T., & Thomson, A. B. R. (1991). Response-surface methodology in the development of rice flour yeast breads - sensory evaluation. *Journal of Food Science*, 56(3), 751-&.
- Yu, L. L., Perret, J., Parker, T., & Allen, K. G. D. (2003). Enzymatic modification to improve the water-absorbing and gelling properties of psyllium. *Food Chemistry*, 82(2), 243-248.
- Zandonadi, R. P., Assuncao Botelho, R. B., & Coelho Araujo, W. M. (2009). Psyllium as a Substitute for Gluten in Bread. *Journal of the American Dietetic Association*, 109(10), 1781-1784.