



# **EFFECTO DE LA FUERZA DE GEL DEL HIDROXI-PROPILO-METIL CELULOSA (HPMC) SOBRE LA CALIDAD DEL PAN SIN GLUTEN.**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Curso 2013/14**

**Alumna: Sandra Pérez Quirce  
Tutora: Felicidad Ronda Balbás**

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

## **RESUMEN**

Uno de los principales problemas de los enfermos celíacos es la disponibilidad de productos libres de las proteínas que desencadenan su intolerancia y de adecuada calidad. En la actualidad, los panes sin gluten disponibles en el mercado son de calidad sensiblemente inferior a la del pan tradicional de trigo. Los panes sin gluten se elaboran con hidrataciones notablemente superiores a los panes ordinarios de trigo y con la incorporación de hidrocoloides que mimeticen la acción del gluten. Es razonable pensar que las condiciones de procesado sean también sensiblemente diferentes de las habituales. En este trabajo se estudió el efecto sobre la calidad del pan de la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) con distintas fuerzas de gel en función de su grado de hidratación y las condiciones tecnológicas de procesado como fueron la humedad relativa aplicada durante la fermentación de las masas y el efecto de la aplicación de vapor durante el horneado de panes realizados con harina de arroz. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto la diferente actuación de ambos tipos de HPMC en el proceso de panificación, a pesar de contribuir con un aporte de estructura y consistencia a las masas de forma similar. El HPMC NE dio lugar a panes de menor volumen y un alveolado más abierto a diferencia de los panes con SFE que presentaron mayor volumen con un alveolado más fino y de mayor densidad. Se obtuvieron panes con mayor volumen y menor dureza cuando procedieron de masas con hidrataciones medias o altas y fermentadas con humedad relativa elevada y en ausencia de vapor. El empleo de vapor en el horneado produjo una mejora sustancial en la apariencia visual de los panes, a pesar del descenso del volumen, lo que le hace una alternativa interesante en la elaboración de pan sin gluten.

## **ABSTRACT**

One of the main problems for celiac patients is the availability products free of proteins that trigger their intolerance and appropriate quality. Nowadays, the quality of gluten-free breads commercially available in the market are significantly lower than the traditional wheat bread. Gluten-free breads are made with higher hydrations than typical wheat breads and with addition of hydrocolloids that mimic the gluten action. The processing conditions are also significantly different from the usual. In this work the effect of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) gel with different forces depending on its degree of hydration and technological processing conditions such as relative humidity applied during dough fermentation and the effect of the steam application during baking were studied on breads made with rice flour. The results obtained showed the different performance of both types of HPMC in the baking process, despite its similar contribution to the structure and consistency of the doughs. The HPMC NE resulted in lower volume breads and higher crumb holes as opposed to the SFE breads, which had higher volume with a finer and higher crumb density. Breads obtained from doughs with medium or high hydration, fermented at high relative humidity and baked in the absence of steam had higher volume and lower hardness. Despite the decline in the bread volume, the use of steam in baking resulted in a substantial improvement in the visual appearance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La enfermedad celiaca es un trastorno inflamatorio crónico del intestino delgado debido a una respuesta inmunológica inadecuada tras la ingestión de gluten. Esta enfermedad se debe a una intolerancia permanente a las gliadinas presentes en ciertos cereales como el trigo, el centeno, la cebada y la avena. La ingestión de estas sustancias provoca daños en la mucosa intestinal y una reducción en la absorción de nutrientes como proteínas, grasas, hidratos de carbono, sales minerales y vitaminas (Mariotti et al., 2013). Su incidencia estimada se sitúa entorno al 1-2% de la población, afectando únicamente a individuos genéticamente predispuestos y siendo una de las dolencias más extendidas en la actualidad (Cabrera-Chavez y Calderón de la Barca, 2010). El único tratamiento efectivo es mantener una estricta dieta exenta de gluten, lo que conduce a una recuperación de la mucosa intestinal (Farrell y Kelly 2002; Green y Jabri 2003).

El gluten es una mezcla de proteínas que se dividen en dos grupos: gliadinas (prolaminas) que son solubles en la mezcla alcohol-agua y gluteninas que son polímeros insolubles estabilizados por enlaces disulfuro (Cabrera-Chavez y Calderón de la Barca, 2010). Las gliadinas son las responsables de la viscosidad y extensibilidad de la masa, mientras que las gluteninas la aportan fuerza y estabilidad, siendo las responsables de las propiedades elásticas y cohesivas (Gujral y Rosell, 2004; Mariotti et al., 2013). En consecuencia, la ausencia de gluten causa problemas asociados con falta de viscoelasticidad de la masa, mala extensibilidad, falta de resistencia al estiramiento y baja capacidad de retención de gas producido durante la fermentación, lo que resulta en defectos en la obtención de la estructura y textura del pan (Dobraszczyk, 2004; Gujral y Rosell, 2004; Kittisuban et al., 2014; Mariotti et al., 2013). Por tanto, la ausencia de estas proteínas cuya función es esencial en el desarrollo de panes sin gluten supone un obstáculo en la obtención de alimentos libres de gluten de suficiente calidad. En consecuencia los alimentos disponibles en el mercado son caros y con un escaso índice de aceptación, por lo que mejorar su calidad supone un importante reto tecnológico (Gallagher et al., 2004).

A pesar de la amplia variedad de alimentos a base de cereal sin gluten existentes en el mercado, éstos presentan una calidad fisicoquímica y sensorial reducidas y son generalmente bajos en fibra, vitaminas y minerales, lo que deriva en una dieta desequilibrada para las personas que sufren la enfermedad celíaca (Thomson, 2009). Existen multitud de estudios sobre la elaboración de panes sin gluten. La mayoría de ellos se han concentrado en la preparación de productos sin gluten a partir de

sustitución de la harina de trigo por distintas mezclas de harinas de cereales sin gluten, almidones, hidrocoloides, fibra dietética e ingredientes proteicos (Gallagher et al., 2004; Marco & Rosell, 2008; Kittisuban et al., 2014; Schober, 2009). Uno de los cereales más empleados es el arroz, que presenta propiedades nutricionales equilibradas, ya que es incoloro, de sabor neutro, hipoalergénico, presenta bajos niveles de sodio, grasa y fibra y una alta cantidad de carbohidratos de fácil digestión, por lo que resulta una harina deseable y apropiada para la elaboración de productos aptos para celíacos (Gujral & Rosell, 2004; Marco & Rosell, 2008). Sin embargo, su empleo es limitado, ya que únicamente contiene una pequeña cantidad de prolamina de 2,5-3,5% por lo que es incapaz de constituir una estructura que retenga el gas producido durante los procesos de fermentación y el horneado dando lugar a importantes defectos en la calidad del pan (Gujral & Rosell, 2004; Marco & Rosell, 2008). Es necesario el uso de algún tipo de hidrocoloide, emulsionante, enzima o producto lácteo que proporcione una mezcla viscoelástica deseada (Demirkesen et al., 2010), es decir, emplear otros ingredientes capaces de imitar las propiedades del gluten.

Es ya conocido el efecto mejorador de los hidrocoloides, tales como hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), carboximetilcelulosa (CMC), goma de algarrobo, goma guar,  $\kappa$ -carragenano, goma xantana,  $\beta$ -glucano y goma de psilio en el volumen del pan en formulaciones sin gluten (Demirkesen et al., 2010; Gallagher et al., 2004; Gujral et al., 2003; Haque et al., 1994; Lazaridou et al., 2007; McCarthy et al., 2005; Pérez-Quirce et al., 2013; Sivaramakrishnan et al., 2004; Ylimaki et al., 1988). La mayoría de ellos muestran que el uso de hidrocoloides mejoró el volumen y la textura de los panes sin gluten (Nishita et al., 1976; Kang et al., 1997; Cato et al., 2004; Sivaramakrishnan et al., 2004; Lazaridou et al., 2007 entre otros). Las investigaciones realizadas hasta la fecha sugieren que, entre todos ellos, el HPMC es uno de los mejores sustitutos en fórmulas realizadas con harina de arroz debido a su alta capacidad de retención de agua y de formación de gel que da lugar a un aumento de la viscosidad de la masa y una mejora de su estructura y, por tanto, una gran capacidad de retención de gas y propiedades estructurantes en la constitución de la miga (Ahlborn et al., 2005; Marco & Rosell, 2008; McCarthy et al., 2005; Nishita et al., 1976; Sabanis y Tzia, 2011; Sivaramakrishnan et al., 2004). Sin embargo, muchas de estas investigaciones no especifican el tipo de HPMC empleado, a pesar de conocerse la existencia de distintas variedades en función de la concentración, viscosidad y fuerza de gel que pueden presentar y, en consecuencia, sus distintos comportamientos en panificación (Pérez-Quirce et al., 2013). Según los proveedores,

el HPMC más recomendado en panificación libre de gluten es aquel que presenta altas viscosidades del orden de 4000 cP, contenidos en grupos metoxilo entorno al 27-30 % que dan origen a geles de fuerza media y unas dosis aproximadas del adición del 1-2 % en base harina (Shin-Etsu®). Esto no concuerda con el tipo más empleado en investigaciones previas, en las cuales el HPMC más empleado, en los casos en los que se especificó el tipo, se caracterizó por contenidos en grupos metoxilo entorno al 19-24 % que dan lugar a geles de fuerza débil. Por tanto, es de suma importancia seleccionar el HPMC más adecuado y realizar una correcta optimización de la hidratación para la elaboración de panes sin gluten de calidad mejorada.

Derivado de estudios previos se conoce también la necesidad de realizar una correcta optimización de la hidratación para la elaboración de panes sin gluten de calidad mejorada. Se requiere una hidratación elevada para estas masas, ya que la disponibilidad de agua tiene un papel relevante en la formación del gel y la consiguiente funcionalidad de los hidrocoloides (Antón, 2008; de la Hera et al., 2013; Ronda et al., 2013), aunque no excesiva, ya que podría derivar en defectos indeseables desde un punto de vista organoléptico (Mc Carthy et al., 2005; Pérez-Quirce et al., 2013).

Existen otras condiciones de procesado que influyen de manera considerable en la constitución del pan. Las condiciones de mezcla de ingredientes y el amasado, la temperatura y el nivel de humedad en la cámara de fermentación, el tiempo de cocción y la aplicación de vapor resultan ser parámetros cruciales a considerar, ya que es razonable pensar que estas condiciones sean también sensiblemente diferentes de las comúnmente empleadas en la elaboración de pan de trigo. Recientes estudios como el de Gómez et al. (2013) han evaluado el efecto del amasado en panes sin gluten, pero son escasas las investigaciones realizadas en las etapas posteriores.

La fermentación de la masa de pan es una de las operaciones clave en la elaboración del pan. La levadura metaboliza los azúcares de la harina en CO<sub>2</sub> que se difunde hacia las pequeñas burbujas de aire que fueron incorporadas a la masa durante la etapa de mezclado y amasado. El volumen final de gas atrapado en la masa y su tamaño y densidad dan lugar a grandes diferencias en volumen, textura y propiedades sensoriales del producto final (Scanlon y Zghal 2001). Ese CO<sub>2</sub> producido a partir de la fermentación de levadura que queda atrapado sólo es capaz de mantenerse y originar un aumento del volumen del pan si tiene una estructura que lo mantiene (Balaji, 1991), lo cual supone uno de los mayores desafíos en formulaciones sin gluten.

La siguiente etapa de horneado también resulta un paso clave. La masa cruda se transforma en un producto ligero, poroso, fácilmente digerible y sabroso bajo la influencia del calor. Durante el horneado, las interacciones más aparentes son la expansión de volumen, la formación de costras, la inactivación de la levadura y las actividades enzimáticas, la coagulación de proteínas y la gelatinización parcial del almidón en la masa (Pylar, 1988). En esta etapa, la temperatura de cocción en el horno y la cantidad de vapor que se encuentra en él en los primeros minutos del horneado son esenciales en la obtención de un alveolado más o menos abierto, en la expansión del volumen del pan y en los efectos sobre la corteza, principalmente espesor y color (Altamirano-Fortoul et al., 2012). Estas condiciones del proceso también resultan decisivas en la elaboración de productos sin gluten, ya que panes realizados con harinas sin gluten suelen caracterizarse por significativamente menores volúmenes y migas más firmes en comparación con sus homólogos de trigo (Hager et al., 2012) y de tonalidades excesivamente claras.

Como consecuencia, el objetivo del presente trabajo fue el esclarecimiento del efecto de la fuerza de gel del hidrocoloide HPMC sobre la calidad del pan sin gluten que no ha sido establecida de forma clara hasta ahora. Dada la importancia que el contenido en agua tiene sobre la actuación de este hidrocoloide se ha decidido incluir la hidratación de la masa como un factor de estudio de gran relevancia. También se han incluido como factores de estudio dos parámetros de procesado que influyen en la humedad de la corteza y/o del pan, y que pueden tener, por lo tanto, un efecto sobre la actuación del HPMC: la humedad relativa durante la fermentación de las masas y la aplicación de vapor en las primeras etapas del horneado. El objetivo último del trabajo, es obtener panes sin gluten de calidad mejorada.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materias primas

Para la elaboración de los panes, se emplearon los siguientes ingredientes: harina de arroz (12.5% humedad, 0.46% ceniza, 7.5% proteína, 0.49% grasa y 79.1% almidón, tamaño de partícula: 6%>150  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ >63.2%> 100  $\mu\text{m}$ , 30.8%<100  $\mu\text{m}$ ) suministrada por Herba Ricemills S.L.U (Sevilla, España), agua procedente de la red local, aceite de girasol, azúcar y sal provenientes del mercado local y levadura seca instantánea de Dosu Maya Mayacilik, A.S. (Ümraniye-Istanbul, Turquía). Además, se utilizaron dos tipos de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) (E464) suministrados por Shin - Etsu Chemical Co. Ltd. (Japón): HPMC SFE 4000<sup>®</sup> (27-30 % de contenido de metoxilo, 4.0-7.5 % de contenido de hidroxipropilo) codificado como SFE y HPMC NE 4000<sup>®</sup> (19-24 % de contenido de metoxilo, 4.0-12 % de contenido hidroxipropoxilo) codificado como NE. De acuerdo con el fabricante, ambos tipos de HPMC (10% de humedad) desarrollan la misma viscosidad aparente ( $4300 \pm 1300$  cP) en solución acuosa al 2% a 20°C, pero la fuerza de gel después del tratamiento térmico es diferente. El HPMC SFE 4000 forma un gel semi-firme (temperatura de gelificación de 58 a 63°C), mientras que el HPMC NE 4000 forma un gel débil y pegajoso (temperatura gelificación de 61 a 65°C).

### 2.2. Proceso de elaboración

Para el proceso de realización de las masas se emplearon los siguientes ingredientes en base harina: 6% aceite de girasol, 5% de azúcar, 3% de levadura y 1.8% de sal. Además, dos variables en la formulación y dos en el procesado de panes fueron incorporadas en este estudio. Se adicionaron dos tipos de HPMC en una dosis constante del 2%, resultando en dos niveles, y se establecieron tres niveles de hidratación de las masas en dosis de 80, 95 y 110%. Las dosis de agua ensayadas se eligieron a partir de ensayos preliminares y por la experiencia alcanzada en trabajos previos (Ronda et al. 2013, Pérez-Quirce et al., 2013).

Se han considerado también dos variables en el procesado de panes sin gluten: la humedad relativa (HR) durante la fermentación y el empleo de vapor en el proceso de horneado en dos niveles respectivamente. A partir de las combinaciones de niveles de cada uno de los cuatro factores mostrados en la tabla 1 se generó un factorial completo de 24 elaboraciones.

Tabla 1: Niveles de los factores considerados en el estudio.

Nivel	Tipo HPMC	Hidratación (% base harina)	HR (%)	Vapor horneado
1	SFE	80	70	NO
2	NE	95	90	SI
3		110		

Se entiende por SFE al HPMC SFE 4000 y por NE al HPMC NE 4000.

Dichos ingredientes se mezclaron en una batidora Kitchen-aid profesional KPM5 (St. Joseph, Michigan, USA) empleando una cubeta y un brazo de varillas, a velocidad 2 durante 7 minutos, con una parada a los 2 minutos para remover los ingredientes asegurando una mezcla homogénea. Posteriormente se amasó durante 8 minutos a velocidad 4 tras incorporar el agua con la levadura previamente hidratada. La temperatura del agua añadida se ajustó a la siguiente fórmula:

$$T^a \text{ agua} = 57 - T^a \text{ harina} - T^a \text{ ambiente}$$

A continuación se colocaron 200 g de masa en moldes de aluminio de 430 cm<sup>3</sup> de capacidad, y se introdujeron en la cámara de fermentación (marca Salva, Lezo, España), durante 50 minutos a 28°C en las condiciones de humedad descritas en la tabla 2. Posteriormente, se llevaron al horno marca Salva (Lezo, España) durante 40 minutos a 190°C, con adición o no de vapor según el diseño experimental de la tabla 2, y se dejaron enfriar durante una hora a temperatura ambiente antes de la medida de sus propiedades físicas. De cada batida se obtuvieron 3 panes.

### 2.3. Evaluación de la calidad de los panes

Se emplearon dos panes de cada elaboración para hacer las mediciones a día cero descritas a continuación.

#### Aspecto visual

Se tomaron fotografías del pan en posición frontal y lateral, así como de una rebanada central con la cámara Olympus SP 510VZ; 10x optical zoom. Las fotografías se realizaron con iluminación artificial de luz blanca sobre fondo negro.

#### Volumen

El volumen de pan se determinó por duplicado utilizando un analizador de volumen Volscan Profiler (Stable Microsystems, Surrey, Reino Unido). Los datos se analizaron calculando el volumen específico, es decir, dividiendo el volumen obtenido en el equipo entre el peso del pan en gramos, recogido en el parámetro anterior.

### Pérdida de peso

Transcurrida una hora de enfriamiento desde que los panes se sacaron del horno, se midió el peso de los mismos mediante una balanza Sartorius TEG 101, obteniendo la pérdida de peso relativa de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Pérdidade\ peso = \frac{(pesoinicial - pesofinal)}{pesoinicial}$$

Siendo el peso inicial el de la masa depositada en el molde antes de la fermentación (200g). De este modo se puede estimar una pérdida de peso por gramo de masa depositada en el molde.

### Color

Se utilizó un colorímetro Minolta CN 508i (Minolta, Co. LTD, Tokio, Japón) para la medida del color de la corteza de los panes, realizando 4 medidas en cada pan y sobre dos panes de cada elaboración. De cada una de las medidas el espectrofotómetro realiza 5 disparos y muestra el resultado de un promedio interno de los datos. 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\*.

A partir de estos valores, se obtuvieron la luminosidad (L\*), el tono (h) y la saturación o croma (C\*), calculados del siguiente modo:

- Croma o saturación (C\*): Indica la viveza del color.

$$Saturacion = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

- Tono (h): Informa del atributo según el cual se dice del color de que se trata.

$$Tono = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

### Textura

La determinación de la textura de la miga se realizó con el texturómetro universal TA-XT2 (Stable Microsystems, Surrey, Reino Unido) controlado con el software "Texture Expert". Para la realización del ensayo denominado "Análisis del perfil de textura" (TPA) de doble compresión se empleó una sonda cilíndrica de aluminio P/20 de 20 mm de diámetro y un área de contacto de 316,16 mm<sup>2</sup> para penetrar a un 50 % de profundidad, con una velocidad de ensayo de 1 mm/s y un tiempo de espera de 30 segundos entre la primera y segunda compresión. El análisis se llevó a cabo a 20±2°C sobre dos rebanadas de pan centrales de 20 mm de espesor y de dos panes de cada elaboración. Los parámetros texturales obtenidos fueron: dureza (fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares), elasticidad (tasa a la cual un material

deformado regresa a su condición inicial después de retirar la fuerza deformante), masticabilidad (energía necesaria para masticar un alimento hasta que pueda deglutirse) y cohesividad (resistencia de la estructura interna del alimento).

### **Estructura alveolar**

La imagen obtenida del escaneado en escala de grises de las rebanadas con un escáner HP Scanjet G3110 se procesó con el programa WCIF ImageJ, tomando una sección de la miga de 20 x 40 mm<sup>2</sup> o 25 x 40 mm<sup>2</sup> en función del tamaño de la rebanada. Los parámetros obtenidos fueron: radio medio equivalente (mm), área media alveolar (mm<sup>2</sup>) y densidad alveolar (nº alveolos/cm<sup>2</sup>). Las medidas se realizaron sobre dos rebanadas de pan centrales y en dos panes de cada elaboración.

### **2.4. Tratamiento estadístico de los datos**

El diseño estudiado fue un factorial completo generado a partir de la combinación de los niveles de cada factor, resultando un modelo de 24 elaboraciones que se llevaron a cabo de modo aleatorizado.

Una vez obtenidos los datos experimentales se realizó un ANOVA Multifactorial para analizar los efectos simples, dobles y triples de los factores de estudio sobre los parámetros en estos panes sin gluten. Así mismo, se ha empleado el test post-hoc LSD de Fisher para describir las diferencias significativas existentes entre las medias para cada parámetro en función de los factores de estudio a un nivel de significancia del  $p < 0.05$ . En ambos casos se ha empleado el programa estadístico Statistica 6.0. (StatSoft Inc, Tulsa, USA).

Se empleó el programa Statgraphics Centurion v.XVI (Cambridge, USA) para realizar la tabla de correlaciones. Los coeficientes de Pearson, que pueden variar desde -1 a 1 se muestran como una medida de la fuerza de las relaciones lineales entre los pares de variables estudiadas.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los valores medios y grupos homogéneos obtenidos a partir del Anova Multifactorial se presentan en las tablas 2 y 3. Los valores de significación ( $p < 0.05$ ) relativos a estos parámetros y las fotos obtenidas a partir de las 24 elaboraciones se recogen en el anexo 1, aunque no resultan necesarios para un adecuado seguimiento del estudio.

Tabla 2: Valores medios y grupos homogéneos obtenidos para el volumen específico, pérdida de peso y atributos de color.

HPMC	Hidratación (%bh)	HR (%)	Volumen específico (ml/g)	Pérdida peso (%)	L* corteza	Tono corteza
<b>Sin vapor</b>						
SFE	80	70	2.021 c	18.35 defgh	70.10 h	66.758 h
SFE	80	90	2.383 f	17.93 cde	65.11 e	63.236 g
SFE	95	70	2.780 kl	18.40 defghi	72.95 i	69.668 ij
SFE	95	90	3.269 o	19.15 hi	70.52 h	67.783 hi
SFE	110	70	2.974 m	18.93 ghi	67.51 f	52.719 cde
SFE	110	90	3.566 p	21.33 k	67.82 fg	52.719 cde
NE	80	70	1.997 bc	18.35 defgh	70.62 h	68.043 hij
NE	80	90	2.028 c	18.60 efghi	69.79 gh	67.581 h
NE	95	70	2.721 jk	19.25 i	67.60 fg	69.949 j
NE	95	90	3.267 o	20.55 jk	67.03 ef	67.055 h
NE	110	70	2.458 g	18.83 fghi	58.50 cd	52.719 cde
NE	110	90	2.607 i	18.83 fghi	58.50 cd	52.719 cde
<b>Con vapor</b>						
SFE	80	70	2.148 d	17.15 bc	55.91 ab	49.319 a
SFE	80	90	2.533 h	15.50 a	55.79 ab	52.007 bcd
SFE	95	70	2.771 kl	18.03 def	58.96 d	54.232 ef
SFE	95	90	3.082 n	18.25 defg	58.02 bcd	53.572 def
SFE	110	70	2.698 j	18.30 defgh	57.39 abcd	55.493 f
SFE	110	90	3.119 n	20.33 j	58.81 d	52.719 cde
NE	80	70	1.742 a	16.50 b	56.46 abc	50.819 abc
NE	80	90	1.948 b	17.10 bc	55.82 ab	52.719 cde
NE	95	70	2.796 l	17.65 cd	55.69 a	51.527 bc
NE	95	90	2.563 hi	18.58 efghi	56.23 ab	50.664 ab
NE	110	70	2.257 e	18.83 fghi	58.50 cd	52.719 cde
NE	110	90	2.392 f	18.93 ghi	58.53 cd	52.719 cde
<b>Error Estándar</b>			0.022	0.297	0.803	0.699
<b>Radio Intervalo de Confianza</b>			0.044	0.613	1.586	1.379

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). SFE: HPMC del tipo SFE o de media fuerza de gel; NE: HPMC del tipo NE o de fuerza de gel débil; HR: Humedad relativa durante la etapa de fermentación. Error estándar e intervalo de confianza obtenidos del ANOVA.

Tabla 3: Valores medios y grupos homogéneos obtenidos para los parámetros de textura y estructura alveolar.

HPMC	Hidratación (%b.harina)	HR (%)	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad (N)	Area media (mm <sup>2</sup> )	Radio equiv. Medio (mm)	Densidad alveolar (n° alveolos/cm <sup>2</sup> )
<b>Sin vapor</b>									
SFE	80	70	6.734 k	0.75 def	0.463 bcd	3.114 jk	1.012 abc	0.497 abc	17.93 j
SFE	80	90	3.724 i	0.71 cd	0.480 bcdefg	1.785 h	1.030 abcd	0.511 abcde	17.43 ij
SFE	95	70	2.328 fgh	0.65 b	0.486 cdefgh	1.129 def	1.087 abcde	0.507 abcd	13.70 efgh
SFE	95	90	1.273 ab	0.56 a	0.459 abc	0.582 ab	0.961 ab	0.483 a	13.40 defgh
SFE	110	70	1.378 abc	0.76 defg	0.494 efghi	0.687 ab	1.345 fghi	0.566 fghij	12.25 abcde
SFE	110	90	0.941 a	0.83 hi	0.551 lm	0.517 a	1.077 abcde	0.507 abcd	13.48 defgh
NE	80	70	7.033 kl	0.72 cd	0.432 a	3.033 j	1.084 abcde	0.523 abcdef	13.97 efgh
NE	80	90	7.288 kl	0.81 ghi	0.456 abc	3.307 k	1.106 abcde	0.521 abcde	13.25 defg
NE	95	70	2.530 gh	0.74 de	0.473 bcde	1.195 defg	0.920 a	0.484 ab	14.78 hij
NE	95	90	1.654 bcde	0.79 efgh	0.493 defghi	0.815 bc	1.451 ghij	0.588 hijk	12.18 abcde
NE	110	70	2.494 fgh	0.74 de	0.504 fghij	1.255 defg	1.421 ghi	0.585 hijk	10.03 a
NE	110	90	2.093 defg	0.79 efgh	0.519 ijk	1.087 de	1.658 j	0.622 k	10.55 ab
<b>Con vapor</b>									
SFE	80	70	5.099 j	0.78 efgh	0.510 hijk	2.604 i	1.161 bcdef	0.528 bcdefg	15.15 ghi
SFE	80	90	3.416 i	0.64 b	0.517 ijk	1.763 h	1.123 abcdef	0.518 abcde	12.73 bcdef
SFE	95	70	2.199 efgh	0.75 de	0.525 jkl	1.155 def	1.112 abcde	0.525 abcdef	17.63 j
SFE	95	90	1.592 bcd	0.67 bc	0.505 ghij	0.786 b	1.131 abcdef	0.524 abcdef	12.95 cdefg
SFE	110	70	1.924 cdef	0.83 hi	0.535 kl	1.030 cd	1.254 efgh	0.548 defgh	10.28 a
SFE	110	90	1.248 ab	0.81 ghi	0.579 m	0.725 ab	1.194 cdef	0.536 cdefg	11.30 abcd
NE	80	70	10.235 m	0.76 defg	0.452 ab	4.625 l	1.233 cdefg	0.553 efghij	14.78 fgh
NE	80	90	7.342 l	0.75 de	0.450 ab	3.296 k	1.237 defg	0.550 defghi	13.06 cdefg
NE	95	70	1.728 bcde	0.80 fgh	0.474 bcdef	0.818 bc	1.468 hij	0.593 ijk	10.88 abc
NE	95	90	2.776 h	0.79 efgh	0.485 cdefgh	1.345 fg	1.343 fghi	0.572 ghij	15.00 fgh
NE	110	70	2.599 gh	0.86 i	0.540 kl	1.404 g	1.498 ij	0.597 jk	10.35 a
NE	110	90	2.569 gh	0.86 i	0.496 efghij	1.277 efg	1.446 ghij	0.591 hijk	10.20 a
<b>Error Estándar</b>			0.208	0.019	0.011	0.086	0.079	0.016	0.835
<b>Radio Intervalo de Confianza</b>			0.414	0.039	0.021	0.172	0.388	0.032	1.665

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). SFE: HPMC del tipo SFE; NE: HPMC del tipo NE; HR: Humedad relativa durante la etapa de fermentación. Error estándar e intervalo de confianza obtenidos del ANOVA.

### 3.1. Propiedades morfogeométricas y de pérdida de peso

#### 3.1.1. Volumen específico

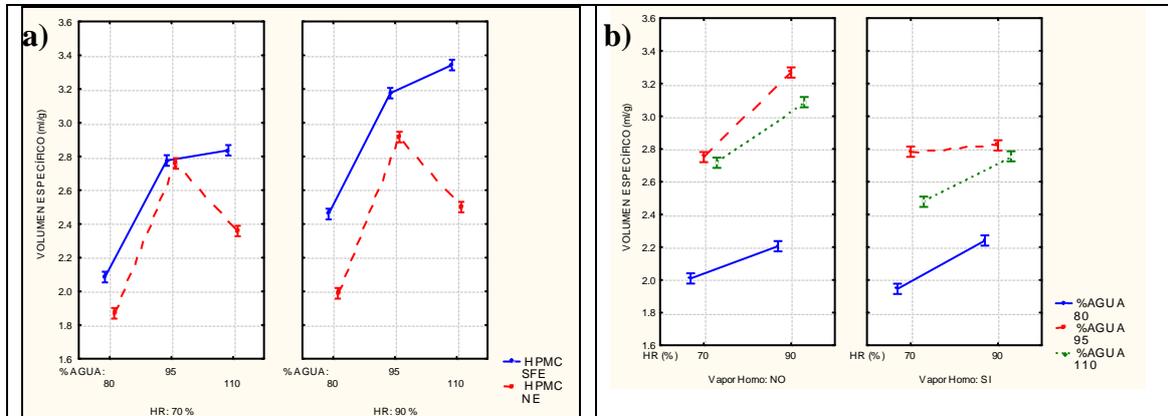


Figura 1a: Evolución del volumen específico del pan con el tipo de HPMC, hidratación y humedad relativa. b: Evolución del volumen específico del pan la hidratación, la humedad relativa y el vapor.

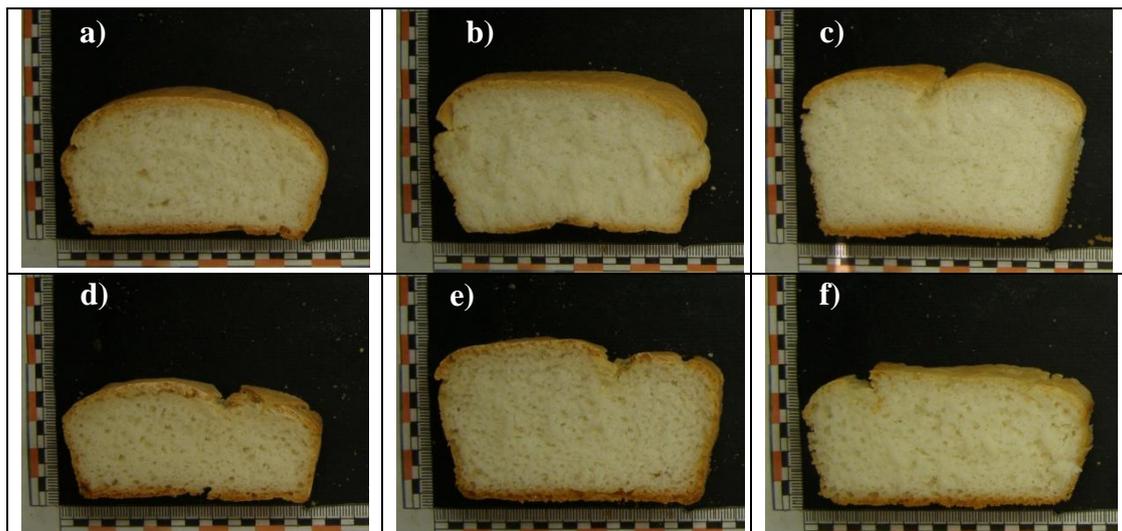


Figura 2. Rebanadas más representativas de ambos HPMC (arriba SFE y abajo NE) en función de su hidratación: a), d), 80%; b), e), 95%; c), f), 110%, obtenidas para unas condiciones de HR = 90 % y en ausencia de vapor.

La tabla 2 muestra el efecto de los dos factores de formulación y los dos de procesado sobre el volumen específico. La influencia de los cuatro factores de estudio y sus posibles interacciones resultaron significativas en las variaciones de este parámetro. Se observó una diferencia en la actuación de los dos tipos de HPMC. Los volúmenes alcanzados por panes con NE, de fuerza de gel débil, resultaron en promedio un 14 % menores que los de panes con SFE, de fuerza de gel media.

Al mismo tiempo, el nivel de hidratación sobre el volumen específico ejerció un efecto significativo destacado sobre la calidad de estos panes sin gluten. Este efecto fue significativamente dependiente de la fuerza de gel del HPMC. En panes con SFE el volumen aumentó conforme lo

hizo el nivel de hidratación, aunque no proporcionalmente. Un aumento de hidratación del 80% al 95% (base harina) representó un aumento del volumen del 31%, mientras que del 95% al 110% sólo aumentó en un 3,7%. Las condiciones de procesado optimizadas, como máxima humedad relativa y ausencia de vapor, junto con una máxima hidratación, llegaron a mejorar el volumen hasta un 61 % en panes con SFE. Sin embargo, el NE mostró un comportamiento diferente, alcanzando un volumen máximo a contenidos intermedios de hidratación en que el volumen se incrementó en un 47 % en promedio en los panes realizados con HPMC NE respecto a hidrataciones bajas para posteriormente descender de nuevo un 14 %, lo que pudo deberse a un aporte excesivo de agua que disminuyó en exceso la consistencia de la masa reduciendo con ello la capacidad de retención del gel formado. Las imágenes de las rebanadas representativas de las condiciones más idóneas de procesado, en función del tipo de HPMC e hidratación se recogen en la figura 2.

Estos resultados ponen de manifiesto la diferente actuación de ambos tipos de HPMC en panificación, a pesar de que estudios previos observaron que el aporte de estructura y consistencia a la masa, concretamente en los módulos elástico y viscoso de las masas a frecuencias de 1Hz, resultaban ser muy similares para ambos tipos de hidrocoloides (Ronda et al., 2013). Esto sugiere que las diferencias en comportamiento podrían ser atribuidas a la etapa de horneado y en consecuencia a la formación de gel por parte del HPMC. El SFE podría continuar esa tendencia de incremento de volumen, siendo capaz de admitir más agua, mientras que el NE no mostró esa capacidad de retención de estructura o de formación de gel que el SFE (Figura 1a).

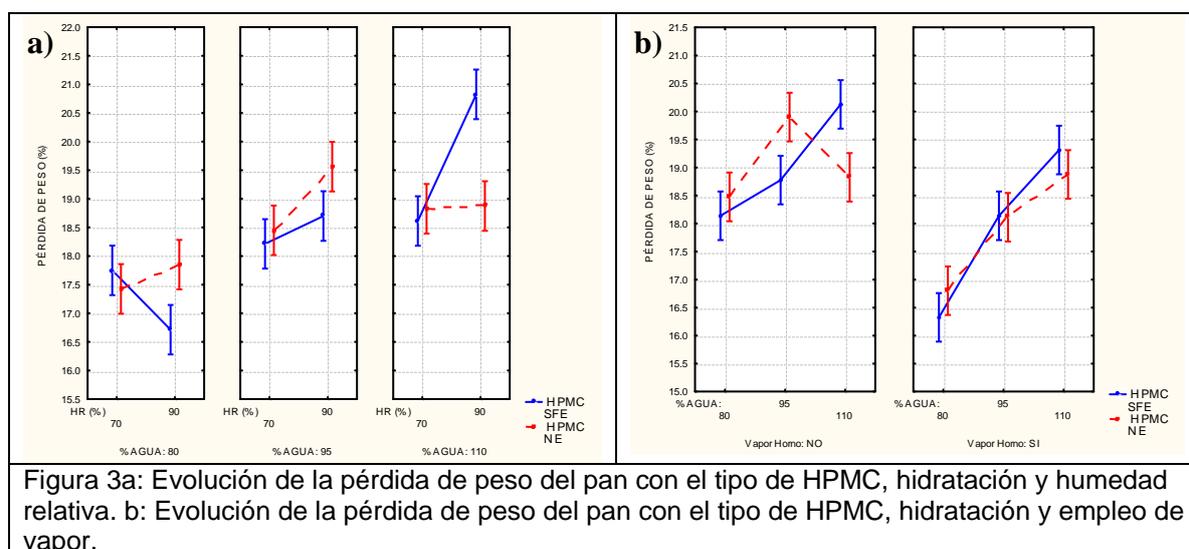
Estos resultados coinciden con estudios previos realizados en pan sin gluten que ponen de manifiesto la necesidad de hidrataciones superiores a las empleadas en panes de trigo (de la Hera et al., 2013). Hager y Arendt (2013) sugirieron que el contenido de agua óptimo se situaría alrededor del 90 a 110%, dependiendo del HPMC empleado, ya que un exceso de agua causa una expansión excesiva con presencia de grandes agujeros en la miga, como ya constataron Mc Carthy et al. (2005), Nishita et al. (1976), Sabanis y Tzia (2011b) y Ronda et al. (2013). Asimismo, ésta puede ser la justificación de los resultados diferentes obtenidos por Haque y Morris (1994) quienes estudiaron la incorporación de K4M y F4M, análogos al NE y SFE respectivamente, a panes sin gluten. Las condiciones de hidratación, en su caso del 90%, fueron menores que las hidrataciones a partir de las cuales se potencian las diferencias de ambos HPMC en este estudio, ya que, a niveles bajos, resultan ser parecidos. A su vez, las condiciones de horneado con una temperatura 30°C superior a la empleada pudieron ser la causa de estas discrepancias.

El empleo de humedad relativa (HR) elevada (90%) en la fermentación aumentó significativamente el volumen específico del pan. Este incremento se vio significativamente afectado por el tipo de HPMC empleado, el nivel de hidratación y el empleo de vapor (Figuras 1ab). En panes con SFE el empleo de una HR más alta permitió un aumento del volumen del pan de hasta un 15 %, mientras que en los panes con NE el efecto de la HR solo se tradujo en un aumento del 6%. Una humedad relativa más alta se traduce en un menor secado de la capa externa de la masa durante la fermentación y una mayor facilidad para su expansión por efecto del CO<sub>2</sub> producido, tanto en la

fermentación como en el horneado. Esta retención de humedad fue más importante para el SFE, de mayor fuerza de gel que para el NE, que demostró menores necesidades de hidratación.

La presencia de vapor en el horneado generalmente condujo a un descenso del volumen del pan, salvo en la formulación con HPMC SFE y 80% de hidratación, en la que el vapor condujo a una expansión del volumen del pan. Esto pudo deberse a hidrataciones insuficientes a las requeridas por estos panes para lograr un mejor desarrollo. El efecto del vapor sobre el volumen del pan mostró una interacción significativa con el tipo de HPMC, la hidratación y la humedad relativa de los panes. La reducción de volumen que provocó el vapor en los panes con NE fue cercana al 9%, mientras que en el SFE se situó entre 3 y 11%. En panes con trigo, Altamirano-Fortoul et al. (2012), Le-Bail et al. (2011) y Zhang et al. (2007) que concluyeron que el empleo de vapor favorecía la expansión del pan durante el horneado, lo opuesto a lo observado en panes sin gluten. Estas diferencias podrían explicarse en base a que la corteza, bajo condiciones de empleo de vapor, tarda más en formarse y, por tanto, en oponer resistencia a la liberación del gas atrapado en el interior del pan, de modo que éste se libera y, consecuentemente, el volumen del pan disminuye.

### 3.1.2. Pérdida de peso



La pérdida de peso varió entre un 15.5 y un 21.3 % respecto a la masa inicial. Esta pérdida de peso, que en realidad también incluye la que pueda tener lugar durante la fermentación, da cuenta de la humedad perdida por el pan fundamentalmente durante el proceso de cocción y, en general, depende del contenido inicial de agua del pan y del tipo de ingredientes y de su capacidad para retenerla (Purli et al., 2007 y Vulicevic et al., 2004). El factor de estudio que más influyó en la pérdida de peso fue, efectivamente, la hidratación de la masa. A medida que se incrementó la hidratación, lo hizo también la pérdida de peso. Este aumento fue más acusado para hidrataciones

bajas. Así al pasar de 80 a 95 % de hidratación se incrementó un 7 %, mientras que el paso de 95% a 110% sólo aumentó en un 3 % adicional.

El HPMC individualmente no mostró efecto significativo sobre la pérdida de peso, pero sí en su interacción con la hidratación y con las condiciones de procesado. Ambos productos mostraron comportamientos similares hasta el 95 % de hidratación. En niveles superiores, la pérdida de peso de los panes con SFE siguió aumentando mientras que en aquellos elaborados con NE la pérdida de peso se mantuvo en un valor medio de 19 %.

El efecto de la humedad relativa (HR) en la fermentadora sobre la pérdida de peso del pan dependió de la hidratación de la masa y del tipo de HPMC utilizado. La Figura 3a muestra el efecto de estas interacciones. En promedio, el empleo de una HR del 90% condujo a unas pérdidas de peso un 3% mayor que cuando se utilizó una HR del 70%. Una HR elevada debería evitar el secado de la masa durante la fermentación y por lo tanto conducir a una menor pérdida de peso global si esa mayor humedad superficial en la masa fermentada no afectase a la cantidad de agua perdida durante el horneado. Sin embargo, se comprobó en los panes elaborados con SFE que la aplicación de una HR del 90% reducía las pérdidas de peso de panes procedentes de masas con una deficiente hidratación (80%) en un 7 %, mientras que apenas afectaba a las de hidratación intermedia (95%) y las aumentaba muy significativamente en las de máxima hidratación (110%). Probablemente un contenido de humedad superficial en la masa más elevado en el momento de su introducción en el horno puede retrasar la formación de la corteza y facilitar la transmisión de calor y la evaporación de agua durante un período más dilatado, incluso desde capas más internas del pan, lo que explicaría unas mayores pérdidas de peso de estos panes. La diferente fuerza de gel entre el SFE y el NE explicaría su diferente comportamiento en el horneado y su diferente interacción con la hidratación de la masa. La pérdida de peso máxima, cercana al 21 %, se alcanzó con SFE y los niveles más elevados de hidratación y humedad. Las pérdidas de peso más bajas del orden de 15.5 % correspondieron a los panes con el mismo HPMC y humedad relativa para los niveles más bajos de hidratación.

El empleo de vapor en el horneado produjo un descenso de la pérdida de peso en promedio del 6 % (ver Figura 3b). Estos resultados coincidieron con las observaciones previas realizadas en panes de trigo, en que explicaron que la mayor pérdida de peso en ausencia de vapor podría deberse a que el espesor de la corteza de pan se incrementó en ausencia de vapor y generó cortezas más gruesas, mientras que la presencia de vapor modificó la penetración del calor en el pan de la superficie hacia las partes internas (Altamirano-Fortoul et al., 2012).

## 3.2. Color

### 3.2.1. Luminosidad corteza (L\*)

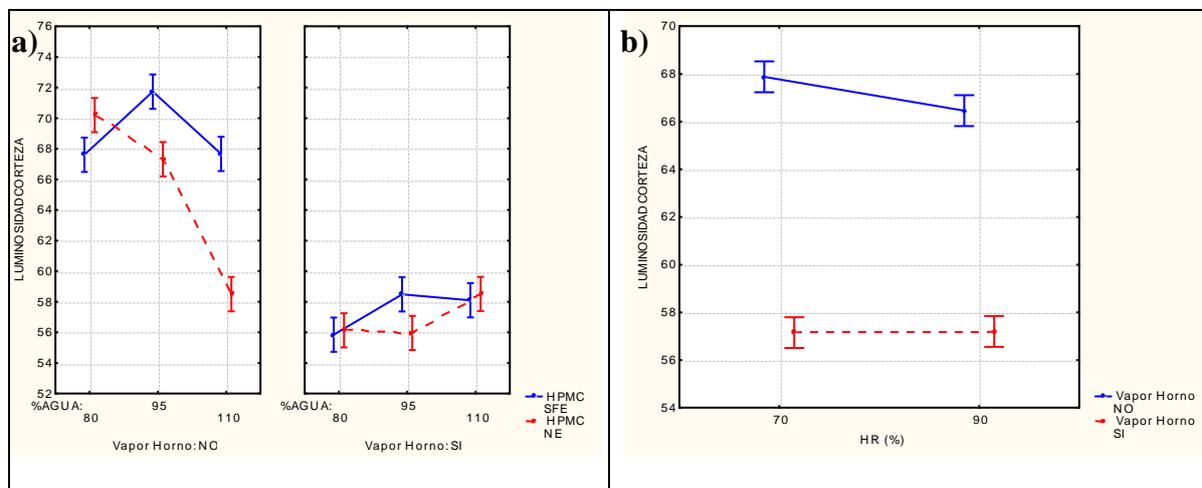


Figura 4a: Evolución de la luminosidad de la corteza del pan con el tipo de HPMC, la hidratación y el empleo de vapor. b: Evolución de la luminosidad de la corteza del pan con la humedad relativa y el empleo de vapor.

El color de la corteza del pan, junto con su textura y sabor, son las principales características a tener en cuenta en las preferencias del consumidor (Purlis, 2007). Los panes sin gluten, por lo general, presentan cortezas más claras que los panes de trigo (Gallagher et al., 2004; Haque y Morris, 1994; Lazaridou et al. 2007; Mandala et al., 2007; Sabanis y Tzia, 2011a) tendiendo a un color menos deseable (Mezaize et al., 2009). Los valores de luminosidad de la corteza se situaron en un amplio rango entre 55,7 y 72,9. El factor que presentó una importancia más acusada fue el vapor aplicado durante los primeros minutos del horneado (véase Figura 4ab). El vapor tiene una influencia directa en tres características del pan: su desarrollo, la obtención de una corteza crujiente y su color final. Su incorporación descendió los valores de luminosidad de la corteza en promedio un 15 %, es decir, hizo las cortezas más oscuras, con mayor coloración. Sin embargo, en menor medida, los demás factores de estudio también intervinieron en el análisis de la luminosidad.

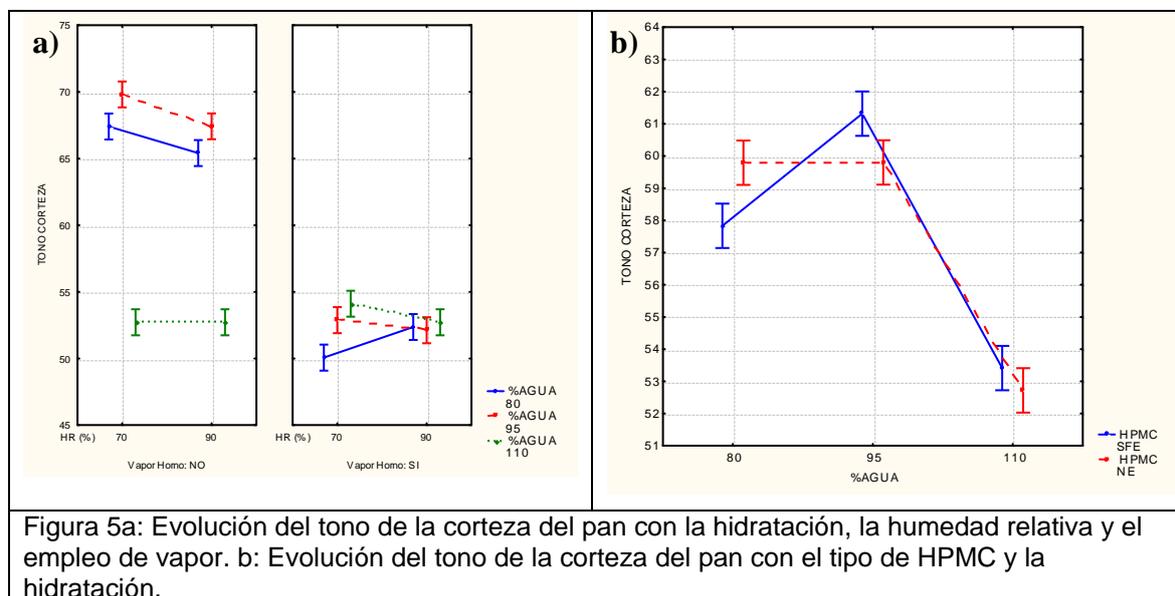
El efecto producido por el tipo de HPMC también resultó significativo, aunque de un modo menos importante. El empleo de NE dio lugar a panes en promedio un 3 % más oscuros (menor luminosidad) que aquellos elaborados con SFE. Estas variaciones se vieron afectadas por el nivel de hidratación de los panes y el empleo de vapor fundamentalmente. Varios autores han estudiado anteriormente la evolución del color con el HPMC y la hidratación, obteniendo resultados muy diversos, probablemente debidos a las diferencias en las características de la masa (contenido de agua, el pH, contenido de azúcar y de proteínas) y las condiciones de procesado aplicadas durante el horneado (temperatura, humedad relativa, modos de transferencia de calor) (Sabanis et al., 2009). Algunos de ellos obtuvieron un aumento de la luminosidad el HPMC y la hidratación

(Marco & Rosell, 2008; McCarthy et al., 2005; Kittisuban et al., 2014; San Miguel, 2013) y otros disminución (Sabanis y Tzia, 2011) o ausencia de efectos. A mayor nivel de hidratación mayor es la dilución de los precursores de la reacción de Maillard, responsables del oscurecimiento de la corteza de los panes durante el horneado, lo que haría esperar cortezas más claras con valores más altos de luminosidad (Sivaramakrishnan et al., 2004). Sin embargo, las reacciones de pardeamiento no enzimático como la de Maillard presentan un óptimo en el cual las reacciones se desarrollan a una gran velocidad y que se sitúa en actividades del agua de 0.5 a 0.8. Actividades del agua menores o mayores a ese rango se desarrollan más lentamente, dando lugar a panes con menor oscurecimiento de la corteza (Pylar, 1988).

En ausencia de vapor, se apreció una disminución de la luminosidad de la corteza de hasta el 17 % en aquellos panes elaborados con NE a medida que se incrementó la hidratación de las masas. El SFE mostró un comportamiento diferente mostrando un máximo de luminosidad, es decir, cortezas más claras, para valores intermedios de agua (95 %). En cambio, en presencia de vapor, las tendencias de ambos HPMC cambiaron sustancialmente, dando lugar a cortezas mucho más oscuras que las obtenidos en ausencia de vapor,

La variación en las condiciones de humedad relativa en presencia de vapor no cobró importancia, resultando una influencia de tan solo un 1% (Figura 4b).

### 3.2.2. Tono corteza



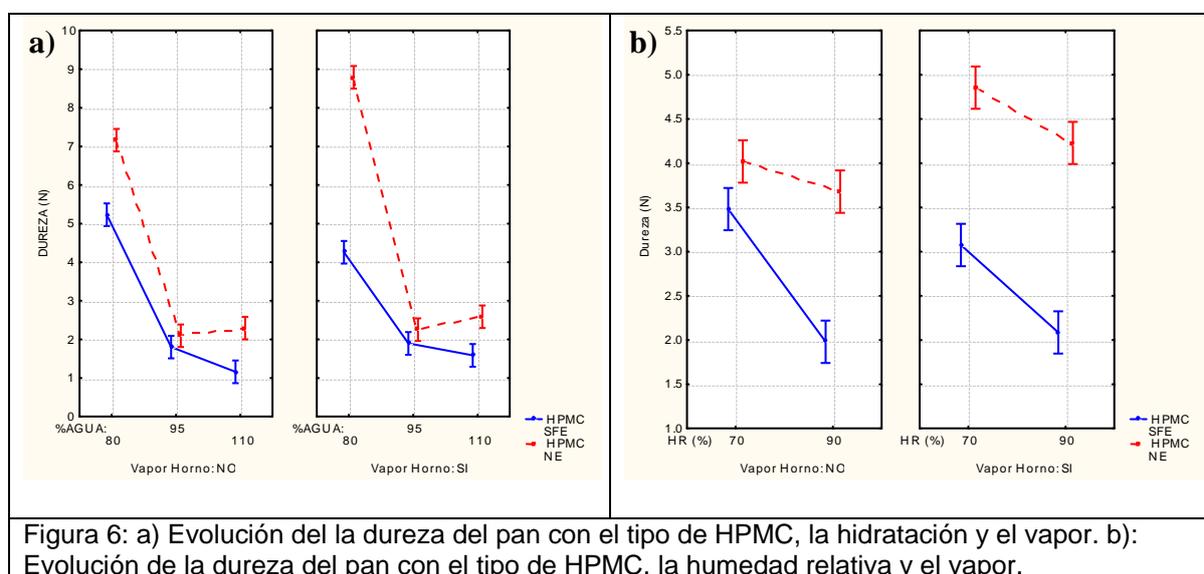
El tono y la saturación de los panes se calcularon a partir de las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  del sistema CIELAB, siguiendo las fórmulas recogidas en el apartado de materiales y métodos. El tono de la corteza de todos los panes analizados presentaron coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  positivas, lo que indica que todos los colores quedaron representados en el primer cuadrante del diagrama cromático  $a^*$ -

b\*, lo que corresponde a tonos que van desde el rojo (para un valor del tono igual a 0 grados) al amarillo (para un valor de tono igual a 90 grados). Debido a una mayor proximidad de los tonos obtenidos al 90 que al 0 se supo que las cortezas de los panes presentaron tonos más amarillentos que rojizos.

Los principales factores que intervinieron en el tono fueron la hidratación y el empleo de vapor, tal y como se muestra en la Figura 5a. Se pudo observar a partir de sus efectos significativos que los panes realizados en ausencia de vapor y a hidrataciones elevadas fueron los que mostraron menores valores en el tono (más rojizos), lo que coincidió con los que dieron lugar a una menor luminosidad (más oscuros). En presencia de vapor los tonos resultaron ser más rojizos y muy similares a los mínimos obtenidos en ausencia de vapor. La humedad relativa de la etapa de fermentación mostró un leve efecto a hidrataciones mínimas, no así la actuación de los HPMC, que para este parámetro resultaron muy similares (Figura 5b). Estos resultados se debieron fundamentalmente a la reacción de Maillard, ya que el color de la corteza se encuentra estimulado por estas reacciones y, 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 et al., 2010).

### 3.3. Propiedades texturales

#### 3.3.1. Dureza



La textura es otra característica importante en el estudio de la calidad en el pan, donde una miga blanda y flexible resulta más deseable (Crockett et al., 2011). Las durezas obtenidas variaron en un amplio rango entre 1 y 10 N. Las mayores durezas obtenidas coincidieron con aquellos panes que mostraron un menor volumen, por lo que concuerdan con las correlaciones obtenidas en

estudios previos que explican una relación inversamente proporcional entre el volumen y la dureza (de la Hera et al., 2014; Kittisuban et al., 2014, Marco y Rosell, 2008, Mezaize et al., 2009; Perez-Quirce et al., 2013). En el estudio de la dureza, todos los factores y sus interacciones resultaron significativos, salvo las interacciones dobles en las que no intervenía el tipo de HPMC y la triple HPMC\*Hidratación\*Humedad.

Se observaron efectos significativos del tipo de HPMC empleado, que resultaron dependientes a su vez de otros factores de estudio como la hidratación y las condiciones de procesado. La dureza promedio de los panes elaborados con HPMC NE fue un 37 % mayor que la alcanzada por los panes elaborados con HPMC SFE.

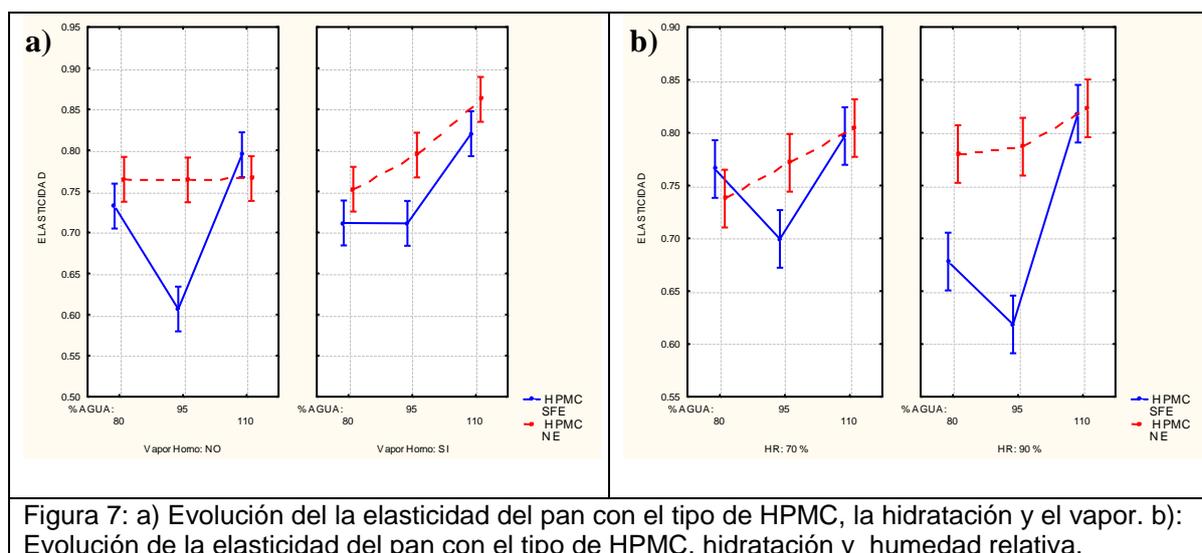
El nivel de hidratación también ejerció un notable efecto sobre la dureza, aunque este dependió del tipo de HPMC utilizado (ver Figura 6a). Un aumento de hidratación en el intervalo de 80 a 110% ocasionó un descenso mantenido en la dureza de los panes elaborados con HPMC SFE pero condujo a la obtención de un mínimo de dureza en los panes elaborados con HPMC de fuerza de gel débil. Se observó una miga significativamente más blanda cuando se incrementó la hidratación de 80% a 95%, reduciéndose la dureza en un 61 % en panes con SFE y en un 73% en panes con NE. El aumento de la hidratación hasta el 110 %, supuso en los panes con SFE una reducción adicional de un 26% en la dureza mientras que en los panes con NE repercutió con un aumento de la dureza cercano al 12%. Probablemente la menor fuerza de gel del HPMC NE y la mayor temperatura requerida para su formación fue responsable de una menor capacidad para retener el gas expansionado durante el horneado del pan, lo que se tradujo en un menor volumen de los panes elaborados con una excesiva hidratación y una mayor dureza como consecuencia de un menor contenido de aire en su estructura. Este comportamiento denota la importancia de realizar una optimización más exhaustiva de la hidratación de las masas para los panes elaborados con HPMC NE. Estudios previos evidenciaron la importancia de hidrataciones elevadas con el fin de disminuir la firmeza de la miga y aumentar su suavidad, así como los efectos adversos derivados de una adición en exceso (de la Hera et al., 2013; Mc Carthy et al., 2005, Sabanis et al., 2011), aunque no consideraron las diferentes capacidades de formación de estructura que los distintos tipos de HPMC pueden presentar. Según Bell (1990), que estudió la actuación del HPMC sobre las masas de pan y su mejora en la textura, la sustitución de los grupos hidroxilo por metoxilo e hidroxipropilo en la celulosa aumentó la solubilidad en agua y aportó cierta afinidad por la fase no polar, lo que permite mantener la uniformidad de la masa de pan y dotarla de una mejor estabilidad durante la panificación.

El empleo de una humedad relativa (HR) elevada durante el proceso de fermentación también mostró un efecto significativo en la dureza, dando lugar a panes con migas más blandas (Figura 6b). En promedio, el empleo de una HR del 90% redujo la dureza de los panes en un 23% respecto a la obtenida con una HR del 70%. Este efecto puede deberse a que la capa superior de la masa, en contacto con una humedad relativa baja, se seca y le impide expandirse con facilidad dando lugar a panes con menor volumen y mayor firmeza. A su vez, este factor presentó una interacción doble significativa con el tipo de HPMC, y la hidratación. El empleo de una elevada HR

durante la fermentación tuvo una mayor repercusión en la dureza del pan elaborado con SFE que cuando se empleó NE. En el primer caso, los panes fermentados a una baja HR tuvieron una dureza un 61% mayor que los panes fermentados a una HR del 90%, mientras que en los panes con NE, de por sí más duros, el empleo de una HR alta sólo redujo su dureza en un 11%. La hidratación de la masa también influyó en el efecto de la HR durante la fermentación sobre la dureza del pan. El efecto más acusado se apreció en las masas con una hidratación menor. Así las masas con 80% de hidratación experimentaron un endurecimiento de un 25% cuando se fermentaron a un 70% de HR mientras que los panes con hidrataciones mayores sólo aumentaron la dureza en un 18% como consecuencia de una inadecuada humedad durante la fermentación.

El empleo de vapor en el horneado también influyó en la calidad de los panes resultantes, tal y como se recoge en las Figuras 6a y 6b. En promedio, su empleo supuso un aumento de la dureza del 8 %, aunque su efecto dependió significativamente del HPMC empleado. En presencia de HPMC SFE, el empleo de vapor redujo la dureza en promedio un 6 %, mientras que el NE la aumentó un 15 %, puede que debido a la menor tolerancia a hidrataciones elevadas que ya se apreció anteriormente. La condensación del vapor que se produce en la masa tiene un efecto plastificante que permite al CO<sub>2</sub> liberarse al medio con mayor facilidad que en los panes elaborados sin vapor, en los cuales la superficie exterior en contacto con la elevada temperatura de horneado hace que la masa fermentada se seque y se endurezca muy rápidamente, dando lugar a la formación de una concha o cáscara, conocida en pan de trigo como “efecto hongo o champiñón” que bloquea ese posible escape del gas (Le-Bail et al., 2011).

### 3.3.2. Elasticidad

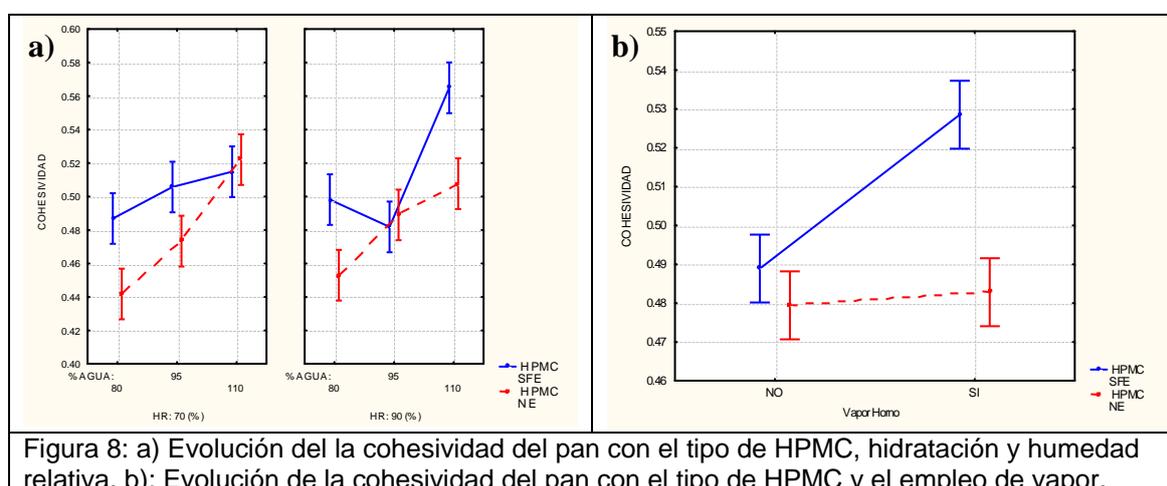


La elasticidad, que cuantifica la capacidad de la miga de recuperar su tamaño original tras una compresión, resultó estar fundamentalmente afectada por la hidratación de la masa aunque también se observaron diferencias significativas en función del HPMC empleado y las condiciones

tecnológicas de procesado del pan, HR del fermentador y empleo de vapor en el horneado. Se observó un aumento de la elasticidad con el empleo de HPMC NE, resultando en promedio un 6 % mayor que la obtenida a partir de panes elaborados con SFE. El empleo de vapor también dio lugar a un aumento de la elasticidad del 5 %.

El nivel de hidratación, en función del tipo de HPMC y las condiciones de humedad relativa durante la fermentación produjeron un efecto variable sobre la elasticidad. Los panes elaborados con HPMC NE dieron lugar a mayores valores de elasticidad a medida que se incrementaron la hidratación y la humedad. Sin embargo, el HPMC SFE mostró un comportamiento diferente, alcanzando valores mínimos a hidrataciones intermedias (95 %). Pese a esta variabilidad, a niveles máximos de agua las diferencias entre los dos HPMC desaparecen, equiparándose ambos valores, y alcanzándose el máximo de elasticidad.

### 3.3.3. Cohesividad



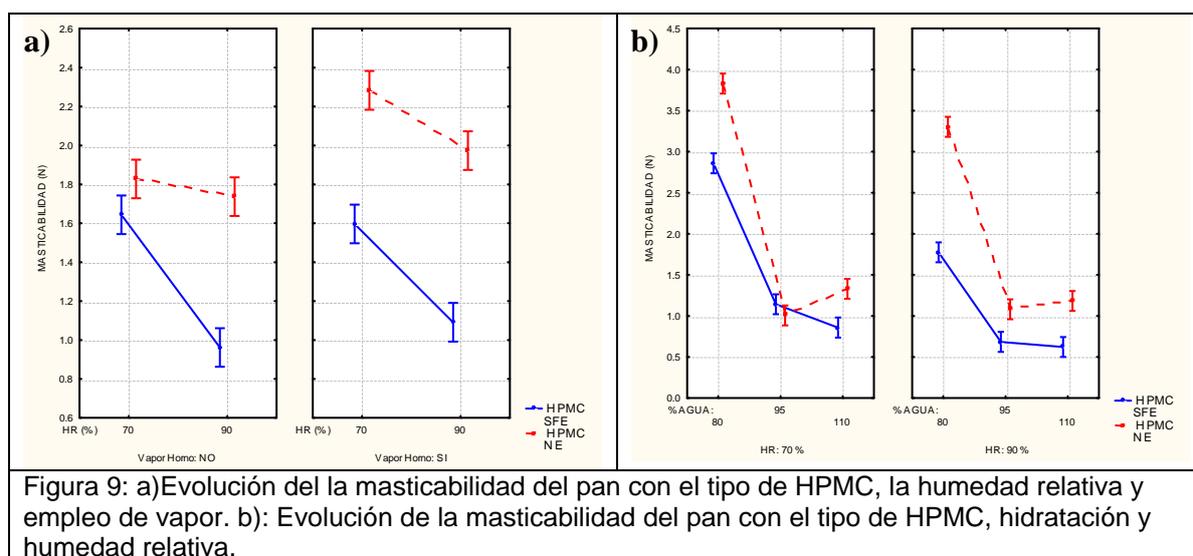
Los valores de cohesividad obtenidos se situaron en un rango de 0.43 a 0.58. En este parámetro la única interacción triple que resultó significativa fue la formada por HPMC\*Hidratación\*Humedad relativa. Los valores de cohesividad generalmente aumentaron con la hidratación y la humedad relativa.

El HPMC SFE mostró en promedio valores de cohesividad un 6 % superiores a los del HPMC NE. El efecto doble de HPMC\*Hidratación arrojó un aumento de la cohesividad proporcional al aumento del nivel de hidratación, salvo para hidrataciones bajas en que el SFE no se vio significativamente afectado. El incremento máximo de cohesividad alcanzado debido a la hidratación fue de un 11 %. Esta observación coincide con la realizada por San Miguel (2013) que obtuvo efectos similares como consecuencia del incremento en la hidratación de panes sin gluten.

Sin embargo, las condiciones de fermentación destacaron de nuevo la diferente actuación de los tipos de HPMC como se observa en la Figura 8a. Aquellos panes realizados con NE no resultaron significativamente afectados por la humedad relativa en el proceso de fermentación,

contrariamente a lo observado por el SFE que, en condiciones de humedad relativa elevada, presentó un mínimo de cohesividad en hidrataciones intermedias, para posteriormente aumentar de forma acusada hasta 0.58, identificado como el máximo valor alcanzado en todas las elaboraciones. Dicho máximo resultó un 17 % mayor respecto a los mínimos obtenidos.

### 3.3.4. Masticabilidad



La masticabilidad de la miga refleja la energía necesaria para masticarla hasta un estado listo para tragar. Es producto de la dureza, cohesividad y elasticidad, por lo tanto está fuertemente relacionada con los valores de estos parámetros, en especial con la dureza debido a su rango de datos, de modo que presenta efectos muy similares.

Los valores de masticabilidad del NE fueron en promedio un 32 % superiores a los del SFE. En el caso del NE el rango de masticabilidad se situó entre un 1.26 y 3.57, lo que representó una variación del 65 %. Los valores obtenidos en el caso de panes elaborados con SFE presentaron una variación de 0.74 a 2.32, que supuso un 68% aunque en cifras inferiores a las mostradas por el NE. A su vez, el aumento del nivel de hidratación se presentó como uno de los factores con mayor influencia, generando una reducción de la masticabilidad para ambos tipos de HPMC hasta en un 66 %. El descenso más acusado se observó al alcanzar dosis intermedias de hidratación, es decir, de 80 a 95 % de hidratación. Un incremento adicional del 15% no mostró diferencias significativas respecto al 95%. Este descenso de la masticabilidad para hidrataciones medias y altas coincidió con las menores durezas, que fueron obtenidas fruto de las mediciones físicas de los panes más hidratados. Esta similitud en las tendencias de fuerza y masticabilidad puede corroborarse con el estudio previo realizado por Kittisuban et al. (2014) quienes apreciaron estos mismos comportamientos paralelos.

A su vez, la humedad relativa de la fermentación también redujo la masticabilidad en promedio en un 22 %, mientras que el empleo de vapor mostró un efecto contrario, aumentándola en promedio en un 12 % y, específicamente, un 16 % para el NE y un 3 % para el SFE (ver Figuras 9a y 9b).

### 3.4. Alveolado

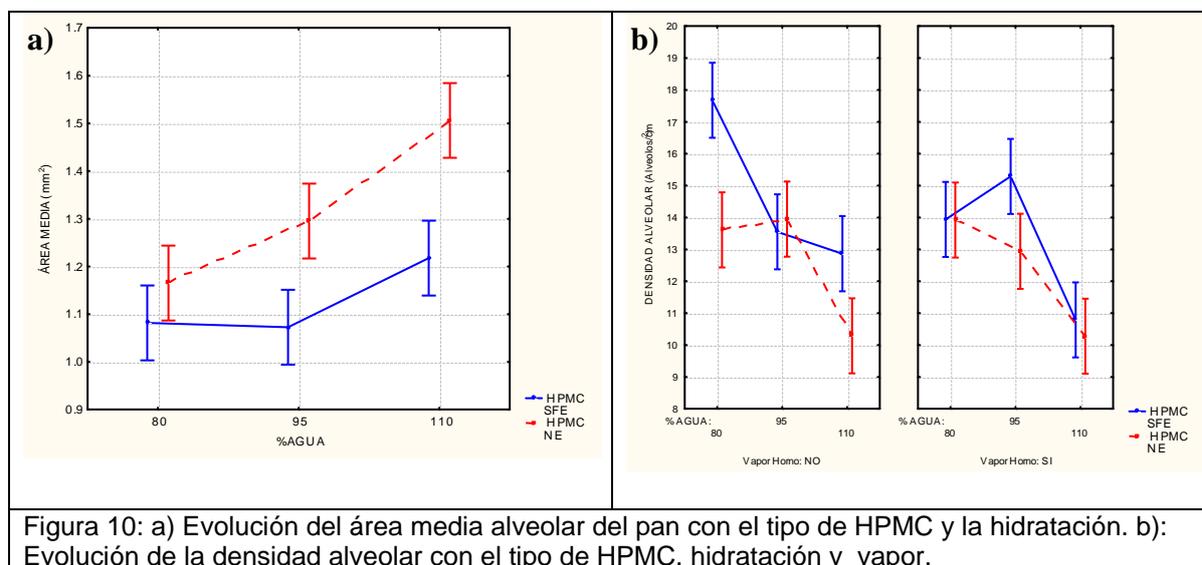


Figura 10: a) Evolución del área media alveolar del pan con el tipo de HPMC y la hidratación. b) Evolución de la densidad alveolar con el tipo de HPMC, hidratación y vapor.

El área media de los alveolos presentes en la miga, que fluctuó entre 0.92 y 1.66 mm<sup>2</sup>, siguió una evolución totalmente paralela a la observada para el radio medio equivalente. Su valor se vio afectado significativamente por el tipo de HPMC, la hidratación de la masa y la humedad relativa durante la etapa de fermentación.

Los dos HPMC mostraron comportamientos diferentes. El HPMC NE dio lugar a alveolos con áreas un 15 % mayores que las obtenidas con SFE. Es decir, el NE dio lugar a un alveolado más abierto que el SFE. Por su parte, el empleo de hidrataciones elevadas incrementó el tamaño de los alveolos hasta en un 18 %. De 80 a 95 % de hidratación, las áreas de los alveolos se incrementaron en promedio en un 5 %, mientras que un incremento adicional de la hidratación, de 95 a 110 % supuso un aumento de las áreas de un 13 % adicional, como puede verse en la Figura 10a. También resultó significativa la interacción HPMC x HR: El empleo de HR elevadas en el fermentador disminuyó el tamaño de los poros de la miga cuando se empleó SFE pero lo aumentó cuando se empleó NE hasta en un 10 %.

El área media y el diámetro equivalente a su vez presentan una relación inversamente proporcional a la densidad alveolar. La densidad alveolar fluctuó en el rango 10 a 18 alveolos/cm<sup>2</sup>. Una densidad mayor corresponde a alveolos más cerrados, de menor tamaño y con una estructura más densa. Por ello, los panes elaborados con NE, de fuerza de gel débil, presentaron densidades un 11 % mayores y dieron lugar a una estructura más abierta que aquellos elaborados con SFE.

Marco & Rosell (2008) indicaron que el empleo de HPMC K4M, equivalente al NE, en panes sin gluten daba lugar a una estructura de la miga mejorada debido al número menor y tamaño mayor de los alveolos que obtuvieron, aunque no realizaron ninguna comparación de este hidrocoloide con otro de su mismo tipo. El número de alveolos/cm<sup>2</sup> se redujo a medida que se incrementó la hidratación de las masas, alcanzando reducciones de hasta un 27 %, siendo más acusadas a hidrataciones elevadas (Figura 10b). La mayor densidad se obtuvo para panes con bajos niveles de hidratación, presentando un gran número de alveolos pequeños, lo que coincide con las observaciones previas realizadas por Mc Carthy et al. (2005). La incorporación de factores de procesado como el empleo de vapor o de humedad relativa elevada en presencia de hidrataciones medias o altas también mostraron efectos significativos. En ausencia de vapor, la densidad alveolar de los panes con SFE se mantuvo independiente de la humedad relativa, mientras que en panes con NE se produjo un descenso del número de alveolos en presencia de humedad relativa elevada. Estas observaciones resultaron opuestas a las realizadas en condiciones de empleo de vapor (ver Figura 10b).

### 3.5. Correlaciones

En la tabla 4 se presentan las correlaciones encontradas entre los parámetros de estudio. Se observó una fuerte correlación positiva del volumen específico con la pérdida de peso y negativa con la dureza y la masticabilidad. Este efecto coincide con los descritos por otros autores, en que tanto la pérdida de peso como el volumen específico se incrementaron con el nivel de hidratación (de la Hera et al., 2013; de la Hera et al., 2014). A su vez, las mayores durezas obtenidas coincidieron con aquellos panes que mostraron menor volumen y pérdida de peso, lo que concuerda con las correlaciones obtenidas en estudios previos que explican una relación inversamente proporcional entre el volumen y la dureza (de la Hera et al., 2014; Kittisuban et al., 2014, Marco y Rosell, 2008, Mezaize et al., 2009; Perez-Quirce et al., 2013). Esto se debe a que los panes con mayor volumen o más desarrollados suelen ser los que tienen un mayor contenido en aire, que ofrece una menor resistencia a su compresión, lo que se traduce en una menor dureza. La alta correlación obtenida entre la firmeza y la masticabilidad se debe a que ésta última se calcula como producto de otros parámetros texturales entre los que se incluye la dureza, siendo ésta la que mayor peso representa.

Por otra parte, los parámetros referentes al color mostraron una correlación con los parámetros del alveolado, como área media y radio equivalente. No se puede explicar fácilmente la existencia de una relación directa entre estos parámetros. La correlación probablemente se deba a que ambas familias de propiedades, dependen o están variando simultáneamente como consecuencia de la variación de algún factor de formulación o procesado, como podría ser el empleo de vapor. Mc Carthy et al. (2005) en su estudio del efecto del HPMC y el agua sobre el alveolado también observaron una relación inversamente proporcional entre el volumen y el alveolado, no habiéndose observado tal significancia en este estudio, probablemente porque en nuestro trabajo se incluyen más factores de estudio que actúan sobre estos parámetros de una manera diferente.

Tabla 4: Correlaciones entre las distintas variables de estudio.

	Volumen esp.(ml/g)	Pérdida peso (%)	L* corteza	Tono corteza	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad (N)	Area media (mm <sup>2</sup> )	Radio equiv. Medio (mm)	Densidad alveolar (n <sup>o</sup> alveolos/cm <sup>2</sup> )
Volumen esp. (ml/g)		0.6443***	ns	ns	-0.8687***	ns	0.5147*	-0.8834***	ns	ns	ns
Pérdida peso (%)			0.4534*	ns	-0.5378**	ns	ns	-0.5608**	ns	ns	ns
L* corteza				0.8603***	ns	ns	ns	ns	-0.5062*	-0.5363**	ns
Tono corteza					ns	ns	-0.495*	ns	-0.534**	-0.5426**	ns
Dureza (N)						ns	-0.6326***	0.997***	ns	ns	ns
Elasticidad							ns	ns	0.5536**	0.5775**	ns
Cohesividad								-0.5877**	ns	ns	ns
Masticabilidad (N)									ns	ns	ns
Area media (mm <sup>2</sup> )										0.9921***	-0.6818***
Radio equiv. Medio (mm)											-0.6483***
Densidad alveolar (n <sup>o</sup> alveolos/cm <sup>2</sup> )											

Los asteriscos indican el p-valor P que prueba la significación estadística de las correlaciones estimadas. \* p <0,05 (correlaciones significativos al nivel de confianza del 95,0%); \*\* p <0,01 (en el nivel de confianza del 99,0%); \*\*\* p <0,001 (en el nivel de confianza del 99,9%); ns: no significativo (p > 0.05).

#### 4. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue profundizar en el efecto que los distintos tipos de HPMC pueden ejercer sobre los procesos de panificación y la importancia de realizar una adecuada elección de las condiciones de procesado de estos productos para lograr unos panes sin gluten de calidad mejorada.

Se observaron diferencias significativas en la actuación de los dos tipos de HPMC. El HPMC-NE, de baja fuerza de gel, por lo general dio lugar a panes con una menor densidad alveolar, un menor volumen específico y una mayor dureza, frente al HPMC-SFE, o de media fuerza de gel, que confirió al pan menores valores de dureza, mayor volumen y un alveolado más cerrado. Probablemente estos efectos se deban a la distinta fuerza de gel y a la hidratación que éstos requieren. La optimización de la dosis de agua juega un papel crucial en los efectos obtenidos, ya que dosis excesivas podrían cambiar esas tendencias. Las dosis más adecuadas se situaron cercanas al 95 % (bh) para el NE y al 110 % para el SFE??.

A su vez, los factores de procesado ejercieron una influencia notable en la obtención de productos de calidad. Quedó patente la necesidad de emplear humedad relativa elevada, próxima a la saturación, en la elaboración de los panes sin gluten. El empleo de una humedad inadecuada generó un deterioro sustancial en el volumen específico y la dureza, más acusado en los panes de mayor hidratación. La aplicación de vapor en el inicio del proceso de cocción generalmente dio lugar a un empeoramiento del volumen del pan, aunque permitió alcanzar cortezas más coloreadas y apetecibles en un pan sin gluten.

#### AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Fin de Master ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto AGL2012-35088) y por la Comunidad de Castilla y León (Proyecto VA252A12-2).

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Ahlborn, G. J.; Pike, O. A.; Hendrix, S. B.; Hess, W. M. & Huber, C. S. (2005). Sensory, mechanical and microscopic evaluation of staling in low-protein and gluten-free breads. *Cereal Chemistry*, 82: 328-335.
2. Altamirano-Fortoul R., Le-Bail A., Chevallier S., Rosell C.M. (2012). Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering* 108: 128–134.
3. Anton A.A., Artfield S.D. (2008). Hydrocolloids in gluten-free breads: a review. *International Journal of Food Science Nutritional* 59(1):11–23.
4. Bell, D. A. (1990). Methylcellulose as a structure enhancer in bread baking. *Cereal Foods World*, 35(10): 1001-1006.

5. Cabrera-Chavez, F., & Calderon de la Barca, A. M. (2010). Trends in wheat technology and modification of gluten proteins for dietary treatment of coeliac disease patients. *Journal of Cereal Science* 52(3): 337-341.
6. Cato, L.; Gan, J. J.; Rafael, L. G. B.; & Small, D. M. (2004). Gluten free breads using rice flour and hydrocolloid gums. *Food Aust.* 56, 75-78.
7. Crockett, R.; Ie, P.; Vodovotz, Y. (2011). How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties in a model gluten-free dough? *Journal of Food Science*, 76(3): E274-E282.
8. de la Hera, E., Martinez, M., Gómez, M. (2013) Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *Food Science and Technology* 54: 199-206.
9. de la Hera, E., Rosell, C. M., Gómez, M. (2014). Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry* 151: 526–531.
10. Demirkesen, I.; Mert, B.; Sumnu, G.; Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96: 295-303.
11. Dobraszczyk, B. J. (2004). The physics of baking: rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 124: 61-69.
12. Farrell, R.J. and Kelly, C.P. (2002). Celiac sprue. *N. Engl. J. Med.* 346: 180-188.
13. Gallagher, E.; Gormley, T. R. & Arendt, E. K. (2004) Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science and Technology*, 15: 143-152.
14. Green, P.H.R. & Jabri, B. Coeliac disease. *Lancet* 2003; 362(9381): 383–391.
15. Gómez, M.; Talegón, M.; de la Hera, E. (2013). Influence of mixing on quality of gluten-free bread. *Journal of Food Quality* 36: 139–145.
16. Gujral HS, Haros M, Rosell CM. (2003). Effect of cyclodextrin glycoxyl transferase on dough rheology and bread quality from rice flour. *Journal Agricultural Food Chemistry* 51(13): 3814–3818.
17. 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.
18. 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: 195-203.
19. Hager, A. S., Wolter, A., Czerny, M., Bez, J., Zannini, E., Arendt, E. K., et al. (2012). Investigation of product quality, sensory profile and ultra-structure of breads made from a range of commercial gluten free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology* 235(2): 333-344.
20. 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.
21. Kang, M. Y.; Choi, y. H. & Choi, H. C. (1997). Effects of gums, fats and glutes adding on processing and quality of milled rice bread. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 29: 700-704.
22. Kittisuban P.; Ritthiruangdej P.; Supphantharika M. (2014). Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast  $\beta$ -glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology. *Food Science and Technology* 57: 738-748.

23. 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.
24. Le-Bail A., Dessev T., Leray D., Lucas T., Mariani S., Mottollese G., Jury V. (2011). Influence of the amount of steaming during baking on the kinetics of heating and on selected quality attributes of crispy rolls. *Journal of Food Engineering* 105: 379–385.
25. Marco, C.; Rosell, C. M. (2008). Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 227: 1205-1213.
26. 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: 393-400.
27. Mezaize, S.; Chevallier, A.; Le-Bail, A.; Lamballerie, M. (2009). Optimization of Gluten-Free Formulations for French-Style Breads. *Journal of Food Science* 74 (3): 140-146.
28. 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: 609-615.
29. Nishita, K. D.; Roberts, R. L.; Bean, M. M. & Kennedy, B. M. (1976) Development of a yeast leavened rice bread formula. *Cereal Chemistry*, 53: 626-635.
30. Purlis E., Salvadori V.O. (2007). Bread browning kinetics during baking. *Journal of Food Engineering* 80: 1107–1115.
31. Pérez-Quirce S., Collar C., Ronda, F. (2013). Significance of healthy viscous dietary fibres on the performance of gluten-free rice-based formulated breads. *International Journal of Food Science and Technology* 49 (5): 1375-1382.
32. Pylar E.J.; Gorton L.A. (1988). *Baking Science and Technology Volume II Formulation and Production*. Siebel Publ. Co.
33. Ronda, F., Perez-Quirce, S., Angioloni, A., Collar, C. (2013). Impact of viscous dietary fibres on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: a fundamental and empirical rheological approach. *Food Hydrocolloids*, 32: 252–262.
34. Rosell, C.M.; Rojas, J.A.; de Barber, C.B. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids* 15: 75-81
35. Sabanis, D., & Tzia, C. (2011a). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten free dough and bread. *Food Science and Technology International*, 17(4): 279-291.
36. Sabanis, D., & Tzia, C. (2011b). Selected structural characteristics of HPMC containing gluten free bread: a response surface methodology study for optimizing quality. *International Journal of Food Properties*, 14(2): 417-431.
37. San Miguel, M.A. (2013). Influencia de la hidroxipropilmetilcelulosa, el psillium y su combinación en las propiedades morfogeométricas y texturales de panes sin gluten elaborados con harina de arroz. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Valladolid.
38. Scalón, M. G., & Zghal, M. C. (2001). Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34: 841-864.
39. Schober, T. J. (2009). Manufacture of gluten-free specialty breads and confectionery products. In E. Gallagher (Ed.), *Gluten-free foods science and technology* (pp. 130-180). Blackwell Publishing Ltd.
40. Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., & Chattopadhyay, P. K. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62(1): 37-45.

41. Thomson, T. (2009). The nutritional quality of gluten-free foods. In E. Gallagher (Ed.), *Gluten-free food science and technology* (pp. 45-51). New Delhi: Wiley-Blackwell.
42. Vulicevic I.R., Abdel-Aal E.-S.M., Mittal G.S., Lu X. (2004). Quality and storage life of partbaked frozen breads. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol* 37: 205–213.
43. Ylimaki, G.; Hawrysh, Z.J.; Hardin, R.T. & Thomson, A.B.R. (1988). Application of response-surface methodology to the development of rice flour yeast breads-objective measurements. *Journal of Food Science* 53: 1800-1805.
44. Zhang, L., Lucas, T., Doursat, C., Flick, D., Wagner, M. (2007). Effects of crust constraints on bread expansion and CO<sub>2</sub> release. *Journal of Food Engineering* 80: 1302–1311.



# **EFFECTO DE LA FUERZA DE GEL DEL HIDROXI-PROPILOMETIL CELULOSA (HPMC) SOBRE LA CALIDAD DEL PAN SIN GLUTEN.**

## **ANEXO 1**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Curso 2013/14**

**Alumna: Sandra Pérez Quirce  
Tutora: Felicidad Ronda Balbás**

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

**VALORES DE SIGNIFICACIÓN**

Efectos	Volumen específico (ml/g)	Pérdida peso (%)	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad (N)	L* corteza	Tono corteza	Radio equivalente medio (mm)	Area media (mm <sup>2</sup> )	Densidad alveolar (nº alveolos/cm <sup>2</sup> )
HPMC	0.0000	0.8119	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7720	0.0000	0.0000	0.0000
Hidratación	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
HR	0.0000	0.0002	0.0000	0.1369	0.0619	0.0000	0.0380	0.0143	0.8446	0.6757	0.0859
Vapor Horno	0.0000	0.0000	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.2786	0.0643
HPMC*Hidratación	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0124	0.0000	0.0000	0.0000	0.0667	0.0003	0.7765
HPMC*HR	0.0000	0.9187	0.0000	0.0000	0.3434	0.0000	0.1801	0.2643	0.0116	0.0069	0.3110
HPMC*Vapor Horno	0.0000	0.8384	0.0000	0.9112	0.0001	0.0000	0.0000	0.0011	0.7633	0.1933	0.0388
Hidratación*HR	0.0033	0.0002	0.0000	0.0192	0.1184	0.0000	0.0344	0.0499	0.3146	0.3247	0.0289
Hidratación*Vapor Horno	0.0000	0.0005	0.4839	0.0000	0.8803	0.1394	0.0000	0.0000	0.0450	0.3727	0.0373
HR*Vapor Horno	0.0000	0.1716	0.5037	0.0001	0.0356	0.7691	0.0265	0.0089	0.1214	0.9193	0.5614
HPMC*Hidratación*HR	0.0147	0.0000	0.2138	0.0030	0.0000	0.0126	0.1770	0.3015	0.1228	0.6119	0.0324
HPMC*Hidratación*Vapor Horno	0.0000	0.0083	0.0000	0.0016	0.6767	0.0000	0.0000	0.6761	0.5584	0.8041	0.0005
HPMC*HR*Vapor Horno	0.0091	0.1435	0.0217	0.5469	0.1331	0.0065	0.1203	0.9381	0.0074	0.1052	0.0115
Hidratación*HR*Vapor Horno	0.0000	0.8385	0.0000	0.1322	0.2763	0.0000	0.4692	0.0004	0.2225	0.3608	0.1846
HPMC*Hidratación*HR*Vapor Horno	0.0000	0.4650	0.0000	0.3512	0.7386	0.0000	0.3589	0.0545	0.0278	0.0114	0.0009
R <sup>2</sup>	0.9910	0.8895	0.9719	0.7517	0.7084	0.9748	0.8709	0.9310	0.5475	0.5446	0.6334

**FOTOGRAFÍAS DE LOS PANES ELABORADOS SIN VAPOR**

2 % SFE, 80 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 80 % Hidratación, 90 % HR



2 % SFE, 95 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 95 % Hidratación, 90 % HR



2 % SFE, 110 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 110 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 80 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 80 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 95 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 95 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 110 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 110 % Hidratación, 90 % HR



**FOTOGRAFÍAS DE LOS PANES ELABORADOS CON VAPOR**

2 % SFE, 80 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 80 % Hidratación, 90 % HR



2 % SFE, 95 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 95 % Hidratación, 90 % HR



2 % SFE, 110 % Hidratación, 70 % HR



2 % SFE, 110 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 80 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 80 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 95 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 95 % Hidratación, 90 % HR



2 % NE, 110 % Hidratación, 70 % HR



2 % NE, 110 % Hidratación, 90 % HR

