



**PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LA
HARINA DE TRIGO SARRACENO EN
FUNCIÓN DE SU TAMAÑO DE PARTÍCULA.
APLICACIÓN EN PANIFICACIÓN SIN
GLUTEN.**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2016/17

**Alumna: Prèccilia Karène Ada Ollomo
Tutor: Felicidad Ronda Balbás**

Cotutores: Marina Villanueva Barrero

Joanna Harasym

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

RESUMEN

El trigo sarraceno es un pseudocereal de alto valor nutricional y de gran interés en panificación sin gluten. Se han investigado las propiedades tecnológicas de la harina de trigo sarraceno en función del tamaño de partícula y su incorporación en masas y panes sin gluten. Para ello, se ha llevado a cabo la caracterización de la harina y sus diferentes fracciones y el estudio de sus propiedades funcionales y de empastado. Ensayos oscilatorios (barridos de esfuerzos y barrido de frecuencias) tanto de geles como de masas y ensayos de *creep-recovery* en masas, fueron empleados para el estudio del comportamiento viscoelástico. Los resultados obtenidos mostraron que la fracción S (<50 μ m) presentaba en general mejores propiedades funcionales que el resto de las harinas. Todas las muestras de trigo sarraceno mostraron un pico de viscosidad, *breakdown*, *setback* y viscosidad final menor que la harina de arroz (R). Además, las diferentes fracciones de trigo sarraceno mostraron mayores valores de G' y G'' comparados con la harina de arroz. En cuanto a la calidad de los panes elaborados, aquellos que se obtuvieron con la fracción ML (harina exenta de la fracción de menor tamaño de partícula) mostraron el menor volumen y pérdida de peso y presentaron los mayores valores de dureza e incremento de dureza a los 7 días de almacenamiento.

Palabras clave: Trigo sarraceno, Tamaño de partícula, Propiedades tecnológicas, Reología, Panes sin gluten

ABSTRACT

Buckwheat is a pseudocereal of high nutritional value and great suitability for gluten-free baking. The technological properties of buckwheat flour as a function of particle size was studied, as well their addition into gluten-free doughs and breads. For this purpose, the characterization of the buckwheat flour and its different fractions by functional and of pasting properties was carried out. The oscillatory tests (strain sweeps and frequency sweeping) of both gels and doughs and creep-recovery tests of doughs were used for the study of their viscoelastic behavior. The results showed that the fraction S (<50 μ m) had better functional properties than the rest of the flour samples. All buckwheat samples showed a peak of viscosity, breakdown, setback and final viscosity lower than the control rice flour (R). Moreover, the different fractions of flour showed higher values of G' and G'' and lower viscosity profiles during the pasting test comparing to rice flour. According to the quality of the breads, those obtained with the fraction ML (flour free of the fraction of smaller particle size) showed the lowest volume and loss of weight and presented the highest values of hardness and increase of hardness after the 7 days of storage.

Key words: Buckwheat, Particle size, Technological properties, Rheology, Gluten-free breads

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

El trigo sarraceno, TS, (*Fagopyrum esculentum* Möench) es un pseudocereal nativo de las regiones de Asia oriental, pero al que se le suele agrupar con los cereales (Edwardson, 1996; Kim et al., 2004). Está ganando popularidad debido a sus potenciales beneficios para la salud humana, aunque se trata de un cultivo de menor importancia en términos de producción (Mariotti et al., 2008). Los principales países productores y consumidores de este cultivo son China que produce el 55% de la producción total mundial, seguido por Rusia (20%), Ucrania (15%) y Polonia (3%). Estados Unidos y Canadá también son grandes productores de dicho cultivo (Myers et al., 1994).

El TS pertenece a la familia de las poligonáceas. Es una planta herbácea, anual, de tallo un tanto voluble, articulado y hueco, bastante ramificado. Su sistema radicular es poco profundo. Posee sus hojas de consistencia herbácea, acorazonadas, alternas, terminadas en punta aguda, las de la bases con estípulas notables. Las superiores son abrazadoras o sésiles mientras que las inferiores tienen un peciolo largo. Sus flores son pequeñas, abundantes y de color blanco o rosa, pequeñas, agrupadas en racimos cortos y apretados al final de las ramas. En la base del ovario y generalmente en número de ocho, se encuentran las glándulas que segregan el néctar que cumple la función de atraer a los insectos para favorecer la fecundación cruzada típica de la especie. Posee fruto aquenio trígono, con pericarpio leñoso de color marrón, que contiene una sola semilla de pequeño tamaño. Los frutos maduran de forma gradual lo que dificulta su recolección (Napoli, 1994).

El cultivo de TS se caracteriza por la asombrosa velocidad de crecimiento. Emerge entre los 4 y 6 días de sembrado. Su ciclo completo varía entre 65 y 75 días desde la siembra a la cosecha. El trigo sarraceno prospera en una amplia variedad de suelos, prefiriendo aquellos francos, fértiles y bien drenados. Es sensible a los anegamientos por periodos prolongados ya que puede producir la muerte del cultivo por asfixia radicular. Se adapta de manera excelente a la siembra directa. La siembra debe procurar que el grano quede en contacto con el suelo húmedo (Napoli, 1994).

Dionisi (2012) mostró que a través del tiempo las enfermedades y plagas no han sido un inconveniente serio en la producción de este cultivo. Con respecto a ataques de plagas se puede mencionar el ataque de hormigas, pulgones y algunos gusanos, daños causados por pájaros antes de la cosecha y por roedores, especialmente en cultivos volcados. En cuanto a enfermedades se puede nombrar a la pudrición de la raíz por *Rhizoctonia* (Napoli, 1994).

El TS posee un grano rico en aminoácidos esenciales. Entre éstos se destaca la lisina, aminoácido esencial del que carecen los cereales tradicionales. Otra característica potencial de este grano es la ausencia de gluten ya que sus principales proteínas son las globulinas y albúminas. El alimento que se obtiene es sumamente nutritivo y energético. Entre sus componentes se pueden encontrar hidratos de carbonos complejos como manosa, galactosa, xilosa y ácido glucurónico. Entre los granos del mundo es el único que posee vitamina P o rutina

que se extrae de las hojas y flores y su contenido en la harina es de 6,5 mg/100g. Este flavonoide es sumamente beneficioso para el cuerpo, se utiliza en medicina para el tratamiento de vasos sanguíneos débiles, ciertas hemorragias e hipertensión. Previene la gangrena y también se usa en el tratamiento de quemaduras por congelación y rayos X. Existen antecedentes que indican que puede ser beneficioso en el tratamiento de afecciones por radiación atómica. Además, contiene vitaminas de un alto valor biológico superiores a las del arroz integral (B1, B2, B3 y E); a su vez aporta fosfolípidos y ácidos grasos omega 6 (Napoli, 1994).

La harina de trigo sarraceno tiene un alto contenido en proteínas, fibras e hidratos de carbono. También aporta minerales como los minerales Zinc (10%), Hierro (3%), Potasio (220%), Magnesio (50%) y Calcio (60%) (Nocentini et al., 1999). Además, es una de las mejores fuentes de proteínas vegetales con alto valor biológico (Mariotti et al., 2008).

En la industria agroalimentaria, el TS se usa sin cascarilla, entero o partido; en forma de harinas (harina blanca, con salvado e integral); en elaboración de pan y galletas y en la fabricación de pastas. Existen tres tipos de harinas: harina blanca (en la molienda se separa y retira el embrión y el pericarpio, dejando sólo el endospermo como componente de la harina); harina con salvado (en la molienda se separa el embrión y el pericarpio, luego se junta el endospermo y la cascarilla como componentes de la harina final) y harina integral (la molienda se realiza con el grano entero). Los componentes de esta harina son todas las partes del grano, el endospermo, el pericarpio y el embrión.

Dionisi (2012) demostró el excelente valor nutricional y el amplio abanico de posibilidades para la elaboración de productos que presenta el grano de trigo sarraceno para la alimentación humana. La ausencia de gluten, permite utilizar sus granos y subproductos para la alimentación de personas con enfermedad celíaca o alergias al trigo común. Su alto contenido de lisina y su alto contenido proteico, además de su alta cantidad de fibra y minerales permiten fortificar alimentos hechos a base de otros cereales tradicionales, para aumentar su aporte nutricional.

La enfermedad celíaca (CD) es una enfermedad del sistema digestivo que daña el intestino delgado e inhibe la absorción de nutrientes de los alimentos. La ingestión de proteínas que se encuentran en algunos cereales como el trigo, la cebada y el centeno causa la pérdida de las vellosidades intestinales, lo que resulta en la reducción de la absorción de nutrientes. CD se ha convertido en un trastorno de la vida cotidiana, que afecta al 1% de la población mundial (Catassi et al., 2009). El único tratamiento eficaz para la enfermedad celíaca es mantener una estricta dieta libre de gluten, lo que conduce a la recuperación de la mucosa intestinal (Farrell et al., 2002; Green et al., 2003). Algunos de los problemas a los que se enfrentan los enfermos de CD son la falta de productos de panadería sin gluten, siendo los existentes de escasa calidad textural y sensorial (Gallagher et al., 2004), además del alto coste de estos productos (Arendt et al., 2008). Además, los existentes panes sin gluten comerciales son en su mayoría de almidón, lo que resulta en una dieta desequilibrada nutricionalmente debido a la falta de fibra, vitaminas y

nutrientes en las dietas celiacas (Kinsey et al., 2008). La mejora de la calidad de los productos libres de gluten por lo tanto, es un reto para la sociedad moderna. La proteína del gluten del trigo juega un papel vital en la fabricación de pan, ya que es responsable de la formación de una masa cohesiva y elástica que retiene el gas producido durante la fermentación (Gan et al., 1995; Singh et al., 2001). Este hecho hace que sea difícil la obtención de pan de alta calidad sin la presencia de gluten, y por lo tanto diferentes ingredientes y aditivos son necesarios con el fin de mejorar la calidad de los mismos. En primer lugar, es esencial incorporar algún hidrocoloide que mimetice la acción del gluten. Diversos estudios han intentado mejorar las características de pan mediante la comparación del efecto de diferentes hidrocoloides en formulaciones de pan sin gluten (Lazaridou et al., 2007; Mezaize et al., 2009).

Hasta el momento, no existen trabajos que estudien las propiedades funcionales, de empastado y reológicas de masas panarias sin gluten con diferentes fracciones de harina de TS. Además, existen pocas investigaciones sobre la influencia del tamaño de partícula en las propiedades y las características del pan sin gluten.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es el estudio de la incorporación de harina de TS debido a su alto valor nutricional, en función de su tamaño de partícula, en productos de panadería libres de gluten.

Para llevar este objetivo principal, se llevaron a cabo los siguientes objetivos específicos: a) Caracterización de la harinas y de las diferentes fracciones de TS, b) Evaluación de las propiedades funcionales y de empastado de la harina de TS en función de su tamaño de partícula, c) Análisis reológico de masas y geles de harina de TS en función de su tamaño de partícula y d) Panificación sin gluten con mezclas de diferentes fracciones de harina de TS (30%) y harina de arroz (70%).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materias primas

Para la elaboración de los ensayos se utilizó harina de TS polaco de variedad *Kora*. El grano de TS fue suministrado por la empresa polaca Grupa ProducentówEkologicznych Dolina Grykisp z o. o. (Międzyzlesie, Polonia). Este grano fue molido con molino Perten LM 3100 (FossTecator, HäganäsSweden) de tipo martillo con ciclón, con una malla de abertura 1 mm. La harina de arroz NPU de la variedad *Indica* fue suministrada por HerbaRiceMills. Su distribución granulométrica fue de 12,7% de fracción >250 μ m, 77,7% de 100-250 μ m y 23,6% de <100 μ m.

El resto de ingredientes utilizados para la elaboración de las masas y de los panes fueron: aceite de girasol (Coosur Premium), azúcar (Azucarera Ebro) y sal, los cuales fueron adquiridos en el mercado local. La hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC, Methocel K4M Food Grade) fue proporcionada por Dow Chemical (Midland, EE.UU.). El agua se obtuvo de la red de abastecimiento del campus "Miguel Delibes" de la Universidad de Valladolid, y la levadura

deshidratada utilizada fue “InstantDryBaker’sYeast” de la marca “Dosu Maya Mayacilik” (Istanbul, Turquía).

3.2. Caracterización de harinas y fracciones

La harina de TS se separó en diferentes fracciones mediante un juego de tamices de marca Cisa (Barcelona, España): fracción menor de 50µm (S), fracción entre 50 y 150 µm (M) y fracción mayor de 150 µm (L). Se utilizaron como referencias la harina de TS sin tamizar (SML) y harina de arroz NPU (R). Sobre estas harinas se midió el color con espectrofotómetroPCE-CSM5 y el laboratorio AGROLAB determinó la composición química de las mismas según el método oficial de determinación.

Se midió también la humedad de esas harinas. Para ello, se pesaron 2 gramos de harina (M_0) en una capsula vacía (M_1), previamente secada y enfriada. Luego se introdujo la capsula en una estufa de desecación a 130°C durante una hora y posteriormente se mantuvo en un desecador durante una hora más para enfriarse. Se pesó la capsula (M_2) y se calculó el porcentaje de humedad con la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje Humedad (\%)} = \frac{(M_1 + M_0) - M_2}{M_0} \times 100$$

3.3. Propiedades funcionales

Para la determinación de las propiedades funcionales se utilizaron las fracciones S, M y L (<50 µm, de 50-150 µm, y >150 µm) además de la harina de trigo sarraceno integral (SML) y harina de arroz NPU (R). Las propiedades funcionales que se determinaron fueron la capacidad de absorción de agua y aceite (WAC y OAC), el índice de absorción y solubilidad de agua (WAI, WSI), el poder de hinchamiento (SP), capacidad de retención de agua (WHC), capacidad y estabilidad de formación de espuma (FC, FS), actividad y estabilidad emulsionante (EA, ES) y concentración mínima de gelificación (LGC). Todas las propiedades se determinaron por triplicado.

3.3.1. Capacidad de absorción de agua (WAC) y de aceite (OAC)

La determinación de la capacidad de absorción agua (WAC) y de aceite (OAC) se efectuó por centrifugación, según el método descrito por Beuchat (1977). Se pesaron dos gramos de muestra y se mezclaron con 30 ml de agua destilada o aceite de maíz en tubos de centrifuga de 50 ml. Se dispersó con la varilla de vidrio para homogenizar la muestra y se centrifugó durante 25min a 3000 x g en una centrífuga ThermoFisher ScientificSorvall ST 16R, (Langensfeld, Alemania). Finalmente, el sobrenadante se retiró y se pesó el precipitado. Los resultados se expresaron como gramos de agua o aceite por gramo de muestra, mediante la siguiente ecuación:

$$WAC, OAC(g/g) = \frac{W_d}{W_t} - W_0$$

3.3.2. Índice absorción (WAI), Índice de solubilidad en agua (WSI) y Poder de hinchamiento (SP):

Se midieron según describieron Kaushal et al. (2012). Se pesaron 2 g de muestra (w_0) en tubos de centrifuga y se dispersó el contenido en 30 ml de agua destilada usando una varilla de vidrio. Esta dispersión se calentó a 90°C durante 10 min, se enfrió a temperatura ambiente y se centrífugo a 3000 × g durante 10 min. El sobrenadante se vertió en una cápsula de acero y fue sometido a un proceso de secado en estufa Binder (Logroño, España) a 130°C durante 1 hora. Tras el secado, se determinó el contenido de sólidos secos (w_{ds}). Se pesó también el sedimento que quedó en los tubos (w_{ss}). El WAI, WSI y SP, se calcula a partir de las ecuaciones:

$$WAI (g/g) = \frac{W_{ss}}{W_0}$$

$$WSI (g/100g) = \frac{W_{ds}}{W_0} \times 100$$

$$SP (g/g) = \frac{W_{ss}}{W_0 - W_{ds}}$$

3.3.3. Capacidad de retención de agua (WHC)

Se midió según el método descrito por Beuchat (1977). Se pesaron 2 g de la muestra (w_0) en tubos de centrifuga de peso w_t y se añadieron 40 ml de agua destilada. Se mantuvieron 24 horas a temperatura ambiente y tras ese tiempo, se anotó el volumen de la muestra. Finalmente, el sobrenadante se retiró y se pesó el precipitado (w_s). El WHC en base seca se calcula con la siguiente ecuación:

$$WHC(gH_2O) = \frac{W_s - W_t}{W_0} - 1$$

3.3.4. Capacidad y Estabilidad de formación de espuma (FC, FS)

Se midieron según el método descrito por Coffman et al. (1977). Se tomaron 40 ml de agua destilada a 30°C en probetas de 100 ml en que se añadió 2 g de la muestra. Estas probetas se cubrieron herméticamente con parafilm y se sometieron a agitación manual durante 5 minutos. Tras la agitación se realizó la medición del volumen resultante VT que determina la capacidad de formación de espuma (FC).

La estabilidad de formación de espuma consistió en determinar la disminución del volumen de la espuma transcurrida 1 hora. La estabilidad de formación de espuma (FS) se calculó de la siguiente forma, donde V1 representa el volumen tras una hora de reposo:

$$FS = \frac{V1}{VT} \times 100$$

3.3.5. Actividad y Estabilidad emulsionante (EA, ES)

Se midieron como describe Kaushal et al. (2012). Se pesaron 5 g de muestra y se añadieron 100 ml de agua destilada y 100 ml de aceite de maíz en un vaso de precipitados. Luego se sometió a un proceso de homogeneización a 10000 rpm durante 1 minuto mediante IKA T25 digital Ultraturax (Trutnov, República Checa). Tras la agitación, para determinar la actividad emulsionante

(EA), se dividió el contenido en tubos de centrifuga y se centrífugo a 1300 xg durante 5 minutos. Para determinar la estabilidad de emulsión (ES), tras la agitación, se calentó la mezcla a 80°C durante 30 minutos. Después se dividió en tubos de centrifuga y se centrífugo a 1300 xg durante 1 minuto. Se anotó el volumen de la capa de emulsión (V_e) y el volumen total (V_t). El EA y ES, se calcula a partir de la ecuación:

$$EA, ES (\%) = \frac{V_e}{V_t} \times 100$$

3.3.6. Concentración mínima de gelificación (LGC)

El LGC se efectuó según el método descrito por Coffman et al. (1977). Se prepararon 12 tubos de centrifuga que contenían dispersiones de harina con concentraciones de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 30% en 5 ml de agua destilada. Se calentaron los tubos a 90°C durante 1 hora en un baño-maría se enfriaron con agua del grifo durante 10 minutos y se mantuvieron a 10°C durante 3 horas en un baño de agua (Lauda Alpha RA12). Para determinar la concentración mínima de gelificación (LGC) se escogió la concentración con la que mejor se formó el gel.

3.4. Propiedades de empastado

Las propiedades de empastado de las fracciones S, M, L, además de la harina de TS integral, SML y harina de arroz NPU R, se estudiaron usando el equipo Kinexus Pro+ de Malvern Instruments (Worcestershire, Reino Unido) utilizando la norma AACC (Método 76-21.01). Los perfiles de viscosidad durante el análisis de las muestras fueron registrados utilizando suspensiones variables cuya humedad y peso total dependieron del tipo de muestra. Todas las medidas se realizaron como mínimo por duplicado.

Las muestras se calentaron de 50 a 95 °C a un ritmo de 12,16 °C/min después de permanecer la muestra durante 1 minuto en equilibrio a 50 °C, y se mantuvieron durante 2,30 min a 95 °C. El enfriamiento se llevó a cabo desde 95 a 50 °C a un ritmo de 11,84 °C/min y se mantuvo durante 2 min a 50°C. Los parámetros registrados fueron la temperatura inicio de *pasting* (temperatura a la que los gránulos de harina comienzan a hincharse y gelatinizar debido a la absorción de agua), la viscosidad del pico (viscosidad máxima alcanzada por la pasta), la viscosidad mínima de caída o *trough viscosity* (viscosidad registrada en la etapa final cuando la temperatura es de 95 °C), la viscosidad final (viscosidad a 50 °C), los valores de estabilidad o *breakdown* (diferencia entre el pico de viscosidad y la viscosidad de caída) y la retrogradación o *setback* (diferencia entre la viscosidad final y la viscosidad de caída).

3.5. Reología de geles

Se estudiaron las propiedades reológicas de los geles elaborados procedentes de la medida de las propiedades de empastado. Los ensayos reológicos en los geles (barrido de esfuerzos y barrido de frecuencias), se llevaron a cabo con un reómetro Kinex Pro+ de Malvern Instrument (Worcestershire, Reino Unido) con una geometría de placas de 40 mm de acero inoxidable. En

todos los ensayos se fijó la temperatura a 25°C, controlada por un controlador ambiental térmico KNX2002 de la misma casa comercial que el reómetro.

Una vez depositada la muestra en la placa, se retiró la muestra sobrante. Antes de cada ensayo se dejó un tiempo de equilibrio de la masa de 5 minutos. Los ensayos se realizaron con un gap de 1 mm.

Los ensayos de barrido de esfuerzo se realizaron por duplicado en el rango de 0,1 a 500 Pa, a una frecuencia de 1 Hz. Estos ensayos permitieron establecer la zona visco elástica lineal (LVR) mediante la localización del valor de esfuerzo, T_{max} , que producía el descenso del módulo elástico G' y G'' y el aumento de $\tan \delta$. Los barridos de frecuencia se realizaron por duplicado en el intervalo de 10 a 1 Hz a un esfuerzo entre 0,5 y 0,8 Pa. Los módulos elástico (G') y viscoso (G'') y la $\tan \delta$, obtenidos en los ensayos de barrido de frecuencia se ajustaron a ecuaciones potenciales del tipo:

$$G'(\omega) = G'_{\omega 1} \cdot \omega^a$$

$$G''(\omega) = G''_{\omega 1} \cdot \omega^b$$

$$\tan \delta(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \left(\frac{G''}{G'} \right)_{\omega 1} \cdot \omega^{(b-a)} = (\tan \delta)_{\omega 1} \cdot \omega^c$$

Donde los coeficientes G'_1 y G''_1 y $(\tan \delta)_1$, representan los módulos elástico y viscoso (en Pa) y la tangente de pérdida a un rango de frecuencia de 1 Hz. Los parámetros a, b y c representan constantes experimentales y ω la frecuencia angular en rad^{-1} (Ronda et al., 2011; 2013).

3.6. Elaboración de masas y panes

Para estudiar el efecto del tamaño de partícula en las masas y panes se utilizaron las siguientes fracciones de harina de TS: harina de tamaño $> 50 \mu\text{m}$ (ML), harina de tamaño $< 150 \mu\text{m}$ (SM) y harina intermedia M (50-150 μm) y como controles harina integral de TS (SML) y harina de arroz (R). La pequeña cantidad que las fracciones S y L representaban en la muestra de TS integral hicieron inviable elaborar panes exclusivamente con dichas fracciones.

3.6.1. Preparación de la masa

Para la realización de las masas se mezcló de forma homogénea un 30% de harina de TS (según fracción requerida) con 70% de harina de arroz. En la elaboración de las masas se tuvieron en cuenta las siguientes proporciones en base a 100 gramos de harina (o mezcla de harinas) con 13% de humedad: 5 g de azúcar, 1,5 g de sal, 2 g de HPMC, 6 g de aceite y 95 g de agua. Se ajustó además la hidratación de las masas en función de la humedad que aportaron la harina de arroz, las diferentes fracciones de trigo sarraceno o las mezclas realizadas, a partir de los datos medios de humedad de cada harina. En cada elaboración se emplearon 80 g de harina (o la correspondiente mezcla), 4 g de azúcar, 1,2 g de sal, 1,6 g de HPMC, 4,8 g de aceite y una proporción de agua calculada a partir del ajuste de hidratación de las harinas para cada harina, que varió entre 75 y 77 g.

Se procedió a pesar los ingredientes en una balanza de marca Cobos modelo CB-3200D-WD para posteriormente mezclarlos en una panificadora convencional. Primero se mezclaron todos los ingredientes excepto el agua durante 1 minuto, y una vez que aumentó la velocidad de mezclado de la panificadora se añadió el agua dejándolo mezclar 8 minutos más. Homogeneizada ya la masa, se despegó de las paredes del recipiente y se dejó 10 minutos de relajación para proceder a su análisis reológico.

3.6.2. Análisis reológico de masas

Sobre las masas se realizaron ensayos oscilatorios (barrido de esfuerzos y barrido de frecuencias) según métodos descrito en el apartado 3.5. y ensayos de deformación o relajación progresiva (*creep-recovery*). Los ensayos *creep-recovery* se realizaron mediante la aplicación de un esfuerzo de cizalla instantáneo entre 0,5 y 0,8 Pa (dentro la región viscoelástica lineal, LVR) sobre la muestra, que se mantuvo constante durante 150 s. Una vez transcurridos este tiempo, cesó el esfuerzo y se registró la recuperación o relajación de la masa durante 300 s más. Estos ensayos se realizaron como mínimo por triplicado. Los resultados de *creep-recovery* se expresaron en términos de capacitancia elástica o compliance (1/Pa).

$$J = f(\tau) = \frac{\gamma}{\tau}$$

Donde γ es la deformación y el esfuerzo τ constante aplicado durante el ensayo. Los datos experimentales se describieron por el Modelo de Burgers de 4 parámetros en términos de capacitancia mecánica (Lazaridou et al., 2007; Ronda et al., 2013; Van Bockstaele et al., 2011).

$$J_c(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_1}\right) \right) + \frac{t}{\mu_0}$$

En la ecuación, $J_c(t)$ es la capacitancia en la zona de deformación o *creep*, J_0 es la capacitancia instantánea y J_1 la capacitancia elástica retardada. λ_1 es el tiempo de retardo y μ_0 la viscosidad estacionaria.

En la fase de recuperación (*recovery*) se realizó un ajuste a la misma ecuación de Burgers de 4 parámetros que en este caso, al no existir viscosidad, se puede representar por la siguiente expresión:

$$J_r(t) = J_{max} - J_0 + J_{r1} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_1}\right) \right)$$

Donde J_{max} es el máximo valor de capacitancia obtenido en la fase de *creep*, y J_0 , J_{r1} , y λ_1 representan lo mismo que en la ecuación anterior pero referido a la fase de recuperación (Lazaridou et al., 2007; Ronda et al., 2013; Van Bockstaele et al., 2011).

3.7. Panificación

3.7.1. Formulación

La fórmula para la elaboración de pan consistió en la misma formulación descrita en el apartado 3.6.1. para las masas, pero con la adición de levadura deshidratada en dosis de 3g por cada 100 g de harina (o mezclas).

3.7.2. Procedimiento de elaboración del pan

En cada elaboración se preparaba cantidad suficiente de masa para rellenar 3 moldes de aluminio desechables de 126 mm de largo, 75 mm de ancho y 40 mm de alto.

En primer lugar se procedía a la mezcla homogénea de 30% de la harina de TS o mezclas de diferentes fracciones con 70% de la harina de arroz durante 15 minutos. Todos los ingredientes fueron pesados en una balanza de marca Cobos modelo CB-3200D-WD. Primeramente se pesaron los ingredientes sólidos (excepto la levadura) y se mezclaron en el vaso de la amasadora KitchenAid Professional (KPM5) (Michigan, Estados Unidos) a velocidad 1 durante 2 minutos. Después se añadió el aceite y se mezcló a velocidad 2 durante 2 minutos. La levadura se disolvió en el agua y se agregó al resto de ingredientes mientras se mezclaba a velocidad 2. Al terminar de añadir el agua y la levadura, se subió la velocidad a 4 durante 8 minutos. Con el fin de favorecer un amasado homogéneo, a los 4 minutos se hizo una parada para mezclar con una paleta la masa.

Una vez finalizada esta fase se dosificaban porciones de 200 g de masa en cada molde y se procedía al reparto homogéneo de la masa por toda la superficie del molde. Los moldes rellenos fueron introducidos en una cámara de fermentación SvebaDahlen AB SE-51382 modelo SJ2/300 (Fristad, Suecia) a 30°C y 85% de humedad durante 40 minutos. Tras la fermentación se hornearon en un horno modular eléctrico marca SvebaDahlen AB SE-51382 modelo S200 (Fristad, Suecia) durante 20 minutos a 170°C. Después de finalizar el horneado se dejaron reposar 1 hora y se desmoldaron. Transcurrido el tiempo de enfriamiento, se procedió a pesar todos los panes, destinando dos de ellos para la medición en fresco de diferentes parámetros físicos para su caracterización y el tercero empaquetado en bolsa de polietileno se almacenó en refrigeración a 4°C para envejecimiento.

3.7.3. Caracterización física de los panes

a) Pérdida de peso

Este parámetro se calculó restando el peso de cada pan después del horneado, desmoldado y transcurrida una hora de enfriamiento, a los 200 g de masa que se colocaba en cada molde para hornear. Para esto se utilizó la balanza Gram Precisión modelo FR-3200 (Barcelona, España).

b) Volumen

Para medir este parámetro se utilizó el medidor de volumen Bread VolumeTester de la marca JMTY (China). El volumen en ml se evaluó en fresco (día 0) por triplicado.

c) Color de corteza y miga

Para medir el color tanto de la corteza como de la miga, se utilizó un espectrofotómetro PCE Instruments modelo PCE-CSM5 (Alemania). Los resultados se obtuvieron usando un iluminador

estándar D65 y observador estándar 2°, y se expresaron en el espacio de color CIE L*a*b*. Cada medida estaba definida por una media de 5 mediciones proporcionadas por el equipo y a la vez se realizaron 4 medidas en cada pan tanto de corteza como de miga. Posteriormente, a partir de las coordenadas L*, a* y b* se obtuvieron el tono (h) y la saturación o chroma (C*), usándose el espacio de color L*C*h para el análisis de los resultados, tanto para el color de la miga como de la corteza.

d) *Textura de la miga*

Para evaluar la textura de la miga se utilizó un texturómetro universal TA-TX2 de Stable Microsystems (Surrey, UK) con una sonda cilíndrica de aluminio de 20 mm y el software "TextureExpert". Se realizó un ensayo "TextureProfileAnalysis" (TPA) a dos panes de cada elaboración en fresco (día 0), con doble compresión, sobre dos rebanadas de 2 cm de espesor cortadas del centro de cada pan. Las rebanadas fueron sometidas a una deformación del 50%, el tiempo de espera entre las deformaciones fue de 30 s y la velocidad de la sonda empleada en el ensayo de 1 mm/s. Así se obtuvieron los datos de dureza, elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia de los panes.

e) *Vida útil*

Para determinar la vida útil de los panes se realizaron ensayos TPA sobre panes almacenados durante 7 días. Todos los panes fueron conservados en bolsas herméticas de plástico y en refrigeración a una temperatura de 4°C durante toda la fase de envejecimiento.

3.8. Análisis estadístico

Se utilizó el programa StatgraphicsCenturion v. XVII (Bitstream, Cambridge, MN, USA) para realizar los ajustes de los ensayos *creep-recovery* (regresión no lineal). Con este programa también se realizó el análisis de varianzas de los resultados obtenidos (ANOVA). La prueba LSD (Least Significant Difference) se utilizó para evaluar las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las muestras.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Caracterización de harinas y fracciones

Las medidas de humedad, características químicas y la distribución de las harinas y de las fracciones se recogen en la Tabla 1.

La distribución de las fracciones fue de 4,59% para la fracción S, 73,45% para la fracción M y 21,97% para la L, expresado como porcentaje retenido en los tamices. Las humedades de las muestras SM y ML, mezcla de diferentes fracciones con las que se llevaron a cabo las elaboraciones de masas y panes, fueron de 13,17 y 12,91% respectivamente.

Los valores de humedad, proteína, fibra dietética, grasa, cenizas y carbohidratos se encuentran expresados en % sobre muestra. El contenido de carbohidratos se calculó por diferencia del total

(100%) y el contenido en proteína, grasa y cenizas. El contenido en almidón se expresó en g/100 g de materia seca.

En cuanto de la composición química, fue la fracción L la que presentó mayor contenido en proteína, fibra y grasa, seguido de la fracción S. La harina R presentó los menores valores de proteína, fibra y grasa, pero fue la que mayor cantidad de carbohidratos presentó, seguido de la fracción M.

Las medidas del color de las harinas y fracciones se recogen en la Tabla 2. Las medidas de color de las harinas mostraron una luminosidad para la harina R mayor que para el resto de las muestras. Entre las muestras de TS, la fracción S fue la que presentó mayor luminosidad, seguida de la fracción M y de la fracción L. Hidalgo et al. (2014) demostraron que partículas de mayor granulometría en harina de trigo mostraron menores valores de luminosidad, tal y como se observa en nuestros resultados. El tono de las muestras de TS, varió de 80,3 a 83,8. Estos valores de tono se encuentran en la gama de los colores naranjas, más cercanos a los amarillos.

Tabla 2: Color de las harinas y fracciones de TS

| Muestra | L* | h | C* |
|---------|------|------|------|
| R | 96,1 | 61,6 | 6,2 |
| S | 95,7 | 80,3 | 11,5 |
| M | 94,6 | 82,9 | 8,8 |
| L | 91,4 | 81,4 | 10,7 |
| SML | 94,2 | 83,8 | 10,9 |
| ML | 91,1 | 82,3 | 10,2 |
| SM | 93,8 | 80,6 | 11,1 |

4.2. Propiedades funcionales

Los valores de los parámetros de propiedades funcionales que se midieron de las harinas estudiadas se recogen en la Tabla 3. Las propiedades de hidratación dependen principalmente del tamaño de partícula y de la composición química de las harinas. Las proteínas y carbohidratos presentes en la harina son los que determinan, en mayor medida, la capacidad de absorción de agua (Drako et al., 2017), ya que estos componentes contienen partes hidrófilas (Pomeranz, 1985).

En general, las propiedades de hidratación fueron significativamente afectadas por el tamaño de partícula (Tabla 3). Los valores de capacidad de absorción de agua (WAC) revelan diferencias significativas ($p < 0,01$) entre las harinas estudiadas. La capacidad de absorción de agua (WAC) de la harina de arroz (1,11) fue mayor que para el resto de las harinas. Entre las fracciones de trigo sarraceno S y M no se observaron diferencias significativas. Tampoco entre S y L, pero sí entre las fracciones M y L. La harina integral SLM, no fue diferente de la fracción M. Esto puede

explicarse debido a que la fracción M representó una mayor proporción en la harina integral SML.

En cuanto del índice de solubilidad de agua (WSI) y el Poder de hinchamiento (SP), se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre las muestras estudiadas. El índice de solubilidad en agua (WSI) de la fracción L (10,79) fue mayor que para el resto de las fracciones y significativamente diferente al obtenido para la harina de arroz R, cuyos valores fueron los más bajos. La fracción S fue la que mayores valores registró (7,03) para el parámetro SP y fue significativamente diferente a los obtenidos para el resto de las harinas.

Entre la fracción de trigo sarraceno M y la L se observaron diferencias significativas, siendo mayor para la fracción L. Las diferencias en los resultados de hinchamiento y solubilidad en harinas pueden atribuirse a diferencias en la estructura y composición de la harina. También el contenido de proteína en los gránulos puede ser influyente en las propiedades de hinchamiento. Se ha informado de que el poder de hinchamiento de la harina depende del peso molecular de la amilosa y la amilopectina, así como las interacciones intra e inter-molecular (Ahmed et al., 2016).

Los valores de retención de agua (WHC) revelan diferencias significativas ($p < 0,001$) entre las muestras estudiadas. La capacidad de retención de agua (WHC) de la fracción S (3,65) fue mayor que para el resto de las harinas. Entre las harinas L y SML, M y R no se observaron diferencias significativas. Los mayores valores de WHC obtenidos para las fracciones S y L, y también para la harina integral SML, pueden deberse al alto contenido en fibra (Santos et al., 2008). También puede ser debido a su naturaleza hidrófila y los fuertes enlaces de hidrógeno de las moléculas de proteínas (Altschul et al., 1985).

El conocimiento de la capacidad de absorción de aceite (OAC) es importante para diversas aplicaciones porque se basa principalmente en la capacidad para atrapar físicamente el aceite mediante un complejo proceso de atracción capilar y ésta propiedad de la harina conduce a una mejor retención del sabor, un rasgo de consistencia y un aumento de la sensación bucal (Khatab et al., 2009). Los valores de OAC revelaron diferencias (significativas, $p < 0,01$) entre las muestras estudiadas. Entre las fracciones S, L y la harina R no se observaron diferencias significativas y mostraron los valores más altos. Tampoco entre la fracción M y la harina integral SML se observaron diferencias significativas, mostrando estas muestras los valores más bajos.

La actividad emulsionante (EA) refleja la capacidad de una proteína para ayudar en la formación de una emulsión en una cantidad dada de harina. La estabilidad de la emulsión (ES) proporciona una medida de la estabilidad de esta emulsión diluida en un período de tiempo definido (Karaca et al., 2011). Los valores de la EA y ES revelan diferencias significativas entre las muestras estudiadas ($p < 0,001$).

PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LA HARINA DE TRIGO SARRACENO EN FUNCIÓN DE SU TAMAÑO DE PARTÍCULA. APLICACIÓN EN PANIFICACIÓN SIN GLUTEN

Tabla 1: Caracterización de las harinas y fracciones de TS

| Muestra | Composición química | | | | | | Distribución | | |
|---------|---------------------|--------------|--------------------|-----------|-------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| | Humedad (%) | Proteína (%) | Fibradietética (%) | Grasa (%) | Cenizas (%) | Carbohidratos (%) | Almidón (g/100 g m.s) | f(D _p) (%) | F(D _p) (%) |
| R | 13,00±0,1 | 8,13±0,65 | <1±0,34 | <1±0,26 | <1±0,05 | 89,87±0,96 | - | | |
| S | 12,07±0,1 | 13,75±1,1 | 5,42±0,92 | 3,05±0,43 | 1,87±0,05 | 81,33±1,58 | 68,93±0,6 | 4,59 | 100 |
| M | 12,78±0,1 | 10,06±0,80 | 1,86±0,45 | 2,19±0,31 | 3,73±0,14 | 84,02±1,25 | 73,55±0,6 | 73,45 | 95,42 |
| L | 12,16±0,1 | 22,57±1,81 | 7,73±1,31 | 5,83±0,81 | 1,04±0,05 | 70,56±2,67 | 61,90±0,5 | 21,97 | 21,97 |
| SML | 13,08±0,1 | 12,63±1,01 | 4,43±0,75 | 3,01±0,42 | 1,78±0,06 | 82,58±1,49 | 64,18±0,6 | | |

f(D_p): % retenido; F(D_p)% acumulado

Tabla 3: Valores medios y grupos homogéneos obtenidos para los parámetros de propiedades funcionales de las muestras estudiadas

| Muestra | WAC | WAI (g/g) | WSI (g/100g) | SP (g/g) | WHC (g H ₂ O/g) | OAC | EA (%) | ES (%) | FC (ml) | FS (%) | LGC (%) |
|---------------|---------|-----------|--------------|----------|----------------------------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|
| R | 1,11 d | 5,69 b | 1,67 a | 5,79 c | 2,71 a | 0,79 b | _ a | _ a | 48,00 ab | 94,50 b | 8 |
| S | 0,95 bc | 6,50 c | 7,53 d | 7,03 d | 3,65 c | 0,79 b | 55,25 c | 77,94 d | 48,33 ab | 87,67 a | 8 |
| M | 0,89 ab | 4,45 a | 5,93 c | 4,73 a | 2,83 a | 0,66 a | 42,40 b | 60,75 b | 50,33 bc | 85,57 a | 18 |
| L | 1,02 cd | 4,63 a | 10,79 e | 5,19 b | 3,32 b | 0,80 b | 50,20 c | 67,15 c | 51,67 c | 85,74 a | 14 |
| SML | 0,82 a | 4,24 a | 4,55 b | 4,45 a | 3,32 b | 0,63 a | 50,00 c | 69,45 c | 45,33 a | 94,14 b | 20 |
| ES | 0,05 | 0,16 | 0,25 | 0,17 | 0,07 | 0,04 | 2,72 | 2,99 | 1,36 | 2,14 | |
| Significancia | ** | *** | *** | *** | *** | ** | *** | *** | ** | ** | |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes (p<0,05). Nivel de significancia: * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; ns: no significativo. ES: Error estándar. WAC: Capacidad de absorción de agua; WAI: Índice de absorción de agua; WSI: Índice de solubilidad en agua; SP: Poder de hinchamiento; WHC: Capacidad de retención de agua; FC: Capacidad de formación de espuma; FS: Estabilidad de formación de espuma; EA: Actividad emulsionante; ES: Estabilidad de la emulsión; OAC: Capacidad de absorción de aceite; LGC: Concentración mínima de gelificación.

La EA de la fracción S (55,25) fue mayor que el resto de las harinas pero no fue significativamente diferentes a los obtenidos para la fracción L y la harina integral SML. Entre la fracción M y el resto de harinas se observaron diferencias significativas.

En cuanto al parámetro ES, los valores también fueron mayores para la fracción S (77,94) y significativamente diferentes a los obtenidos para el resto de harinas. En la harina de arroz R, no se pudieron medir estos parámetros ya que se formó una muy fina capa de emulsión.

El contenido y tipo de proteína pueden no ser suficientes o adecuados para permitir la emulsión. En la fracción S se obtuvieron los mayores valores de EA y ES, y esto podría ser debido a la mejor disociación y el despliegue parcial de las proteínas globulares de esta harina, que conduce a la exposición de los residuos de aminoácidos hidrófobos, lo que permite formación de emulsión (Nir et al., 1994).

Las propiedades espumantes son importantes para mantener la textura y la estructura de varios productos alimenticios. La capacidad de formación de espuma (FC) de la fracción L (51,67) fue mayor y significativamente diferente que el resto de las harinas, excepto de la fracción M. Entre las harinas SML y R y la fracción S no se observaron diferencias significativas, registrando estas muestras los valores más bajos. Las buenas propiedades de formación de espuma están relacionadas con la presencia de proteínas de estructura helicoidal que pueden disminuir la tensión superficial del agua (Sreerama et al., 2012).

En cuanto a la FS, los valores fueron mayores para la harina R (94,50) y la integral SML (94,14). Entre las fracciones de trigo sarraceno S, L y M no se observaron diferencias significativas, pero sí entre ellas y las harinas SML y R.

La concentración mínima de gelificación (LGC) de la harina integral SML fue la más alta (20% w/v) de todas las muestras estudiadas, seguido de la fracción M. En el caso de las fracciones S y L la mínima concentración de gelificación fue 8 y 14% w/v. Esto puede deberse a explicar para sus mayores contenidos en proteínas y en grasa (tabla 1) como la LGC varía en función de la composición de la harina, como el contenido en proteínas, hidrato de carbono y grasa (Sathe et al., 1982).

4.3. Propiedades de empastado

Se midió la viscosidad de las muestras descritas en este estudio durante un ciclo de calentamiento-enfriamiento para evaluar el efecto de las diferentes fracciones de harinas estudiadas en las propiedades de empastado. El perfil de las curvas obtenido para las muestras de trigo sarraceno no muestra una evolución típica del empastado de la harina, como sí que ocurre con la muestra de harina de arroz (Figura 1). En este ensayo los gránulos de almidón presentes en la harina comienzan a absorber agua al comienzo del ciclo de calentamiento. A una determinada temperatura comienza la gelatinización del almidón con el consiguiente incremento de la viscosidad de la pasta. Al mantenerse la temperatura, llega un momento en que los gránulos comienzan a romperse, por lo que una vez alcanzado un máximo de viscosidad, ésta tiende a disminuir. Cuando la pasta vuelve a enfriarse el almidón se reorganiza y como

consecuencia de este fenómeno, llamado retrogradación, la viscosidad vuelve a incrementarse (Ronda et al., 2013). Como se puede observar en la figura 1, las muestras de trigo sarraceno no mostraron viscosidad de caída tal y como se observó en la harina de arroz. No mostraron periodo de estabilidad ya que después de alcanzar la viscosidad máxima, tendieron a incrementar la viscosidad progresivamente hasta alcanzar la viscosidad final. Los valores medios y grupos homogéneos obtenidos para los parámetros de empastado, se recogen en la Tabla 4. Todas las harinas mostraron efecto significativo sobre la totalidad de los parámetros estudiados ($p < 0,001$).

Todas las fracciones de harina de TSP analizadas mostraron menores valores en todos los parámetros de viscosidad en comparación con la harina de arroz R. Los menores valores de viscosidad de pico, viscosidad de caída y viscosidad final se obtuvieron con la fracción L. Esto puede deberse principalmente al alto contenido en fibra, en su mayoría insoluble, que contiene esta fracción. Los valores de PV y VF obtenidos para la fracción M fueron significativamente mayores que para el resto de las muestras de trigo sarraceno estudiadas. El valor de estabilidad o *breakdown* (diferencia entre la viscosidad de pico y la viscosidad de caída) para la harina de arroz R, fue de 1519 mPa·s. En el caso de las fracciones/harina de trigo sarraceno al no presentar una disminución de la viscosidad una vez alcanzada la viscosidad de pico no fue posible determinar este parámetro. En algunos caso se observó un pequeño descenso del orden de 20 mPa·s como ocurrió en la harina integral SML.

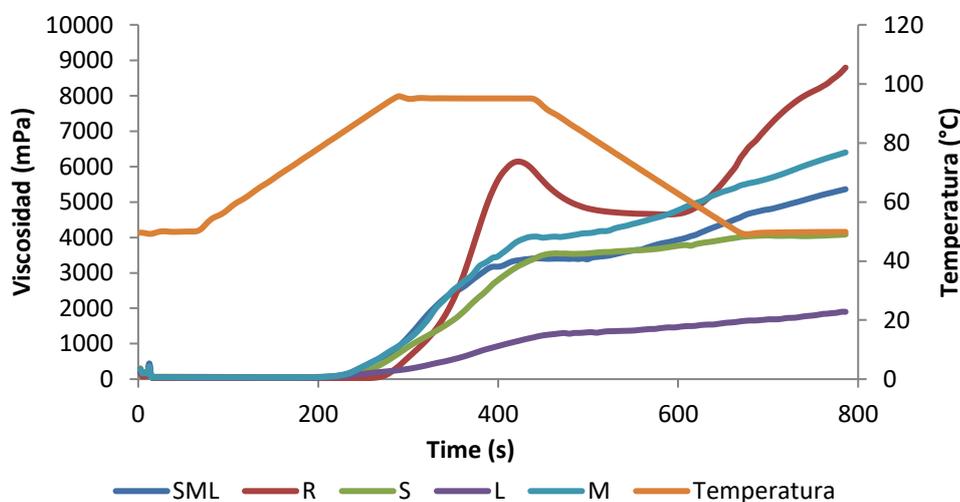


Figura 1: Perfil de viscosidad de las diferentes harinas

Los valores de retrogradación o *setback* fueron mayores para la harina de arroz R. Comparando las fracciones de trigo sarraceno, fue la fracción intermedia M la que mayores valores de *setback* o retrogradación presentó, por encima incluso de la harina integral SML. Entre las fracciones S y L, ambas con los menores valores de retrogradación, no se observaron diferencias estadísticamente significativas. Otros autores también observaron que muestras con mayores tamaños de partícula y mayor contenido en fibra, mostraron menores valores de retrogradación

debido a la capacidad que tiene la fibra de absorber agua y por lo tanto menor disponibilidad de ésta para que el almidón retrograde (Brassini et al., 2017).

Tabla 4: Valores medios y grupos homogéneos para los parámetros de viscosidad

| Muestras | PV (mPa.s) | VC (mPa.s) | VF (mPa.s) | SB (mPa.s) | PT (°C) |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| R | 6144 | 4625 | 8794 | 4169 | 92 |
| S | 3331 | 3331 | 4083 | 752 | 88 |
| M | 4007 | 3997 | 6399 | 2402 | 85 |
| L | 1148 | 1148 | 1907 | 760 | 90 |
| SML | 3399 | 3379 | 5400 | 2021 | 85 |
| ES | 69 | 109 | 82 | 4454,66 | 0,3 |
| | *** | *** | *** | *** | *** |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar. PV: Viscosidad del pico, VC: viscosidad de caída o *trough*; VF: viscosidad final; SB: *setback* retrogradación; PT: temperatura de *pasting*.

Como se puede observar en el gráfico el momento en el que se alcanza la viscosidad de pico es diferente según el tipo de muestra analizada. La muestra que lo alcanza antes es la muestra R, seguida de las fracciones M y SML y las que más tarde aparecen son las muestras S y L. Esta diferencia puede deberse al diferente contenido en almidón presente en cada tipo de muestra y su capacidad de absorción de agua. Las fracciones de trigo sarraceno que antes comenzaron a absorber agua (hincharse los gránulos de almidón) y hacer aumentar su viscosidad, característica que viene determinada por la temperatura de *pasting* fueron las fracciones M y SML. Este inicio se produjo a los 85°C de temperatura en ambos casos. El inicio de gelatinización para la muestra S se produjo a los 88°C y para la muestra L a los 90°C. La temperatura de *pasting* para la muestra de referencia de harina de arroz R, se produjo a los 92°C. La presencia de fibra, grasa y proteínas pueden dificultar la absorción de agua del almidón y retrasar por ello su gelatinización (Bressiani et al., 2017).

4.4. Propiedades viscoelásticas de los geles

Las propiedades viscoelásticas de los geles de las diferentes muestras estudiadas (S, L, M, SML y R) se estudiaron mediante pruebas oscilatorias. Los valores medios y grupos homogéneos para los parámetros de los barridos de esfuerzos y frecuencias, se recogen en la Tabla 5.

4.4.1. Barridos de esfuerzos

Estos ensayos permitieron establecer la región viscoelástica lineal, LVR mediante la localización del valor de esfuerzo, T_{max} , que producía el descenso del módulo elástico G' y G'' y el aumento de la $\tan(\delta)$. Además se utilizaron para determinar el punto de entrecruzamiento o *crosspoint*. A valores de esfuerzos por debajo del valor de *crosspoint*, el módulo elástico (G'_1) siempre fue

superior al módulo viscosos (G''_1), y a partir del punto de entrecruzamiento se obtuvieron mayores valores para el módulo viscoso que para el elástico.

La Tabla 5, muestra los valores de esfuerzo máximo y *crosspoint* para cada uno de los geles estudiados. Los valores de esfuerzo máximo oscilaron entre 45 y 269 Pa. Este esfuerzo fue calculado como el esfuerzo a partir del cual, el módulo elástico G' descendía un 30% respecto a su valor en la LVR. A este esfuerzo se consideró que los geles experimentaban una destrucción de su estructura. Para el parámetro T_{max} , se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los geles de las muestras estudiadas ($p < 0,001$). Los mayores valores se obtuvieron para harina SML con diferencias significativas con el resto de las muestras. La fracción L presentó los menores valores de T_{max} .

Los valores de *crosspoint* variaron entre 110 y 509 Pa. Los geles elaborados con la fracción L fueron los en los que se produjo el punto de cruce entre G' y G'' antes, al valor de 110 Pa. Sí que se observaron diferencias estadísticamente significativas entre el gel de arroz R y cualquiera de los geles elaborados con trigo sarraceno.

4.4.2. Barrido de frecuencias

En todos los geles evaluados, se observó que los valores de G' fueron mayores que G'' , revelando el comportamiento típico de los sólidos viscoelásticos con valores de $\tan \delta = (G''/G')$ notablemente inferiores a 1, tal y como han reportado numerosos artículos (Abebe et al. 2015, Lazaridou et al. 2007, Ronda et al. 2013).

En la Tabla 5, podemos observar los valores de los parámetros G' , G'' , ($\tan \delta$), y de los exponentes a, b y c obtenidos mediante el ajuste potencial de las gráficas obtenidas de los ensayos de barrido de frecuencias. Todos los resultados se analizaron mediante un análisis de la varianza.

Tabla 5: Valores medios y grupos homogéneos obtenidos para los parámetros oscilatorios de los geles

| Muestras | G' (Pa) | a | G'' (Pa) | b | $(\tan \delta)_1$ | c | T_{max} (Pa) | <i>Crosspoint</i> (Pa) |
|---------------|--------------|---------|---------------|---------|-------------------|----------|----------------|---------------------------|
| R | 790 | b 0,055 | a 66 | a 0,223 | bc 0,083 | a 0,168 | c 194 | c 465 |
| S | 727 | b 0,090 | b 104 | b 0,253 | d 0,144 | b 0,162 | c 100 | b 261 |
| M | 1342 | d 0,086 | b 198 | d 0,192 | a 0,148 | bc 0,105 | a 194 | c 508 |
| L | 410 | a 0,092 | b 64 | a 0,238 | cd 0,156 | c 0,146 | bc 45 | a 110 |
| SML | 1035 | c 0,092 | b 163 | c 0,216 | b 0,157 | c 0,124 | ab 269 | d 509 |
| ES | 37,43 | 0,004 | 6 | 0,004 | 0,003 | 0,006 | 3,26 | 8,87 |
| Significancia | *** | ** | *** | ** | *** | ** | *** | *** |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar. G' : módulo elástico; G'' : módulo viscoso; $\tan \delta$: tangente de pérdida; a, b, c: parámetros experimentales.

Se obtuvieron unos valores del módulo elástico (G') entre 410 y 1342 Pa, y del módulo viscoso (G'') entre 64 y 198 Pa, presentando los geles elaborados con la fracción L los menores resultados. Los mayores valores de G' y G'' se obtuvieron para los geles elaborados con fracción M y con la harina integral SML, con diferencias estadísticas entre ellas. La gran cantidad de fibra en la harina integral SML, y su elevada capacidad de absorción de agua, podría contribuir a incrementar la consistencia de los geles (Bonnand-Duscasse et al., 2010).

Los valores de $(\tan \delta)_1$ oscilaron entre 0,083 (R) y 0,157 (SML). Los geles con diferentes fracciones de trigo sarraceno mostraron altos valores de $\tan \delta$, lo que se traduce en un comportamiento menos elástico de los geles en relación al módulo viscoso.

El exponente a osciló entre valores de 0,055 y 0,092 y el exponente b entre 0,192 y 0,253. Los geles de las fracciones de trigo sarraceno mostraron los mayores valores de a sin diferencias significativas entre ellas. Para el exponente b, los geles de la fracción S mostraron los valores más elevados con respecto al resto de muestras.

4.5. Reología de masas

4.5.1. Ensayos oscilatorios

Las propiedades viscoelásticas de las masas panarias a base de harina de arroz que contienen un 30% de las fracciones o mezclas de diferentes fracciones de harina de trigo sarraceno (TS) polaco (SM, ML, M y SML) se estudiaron mediante pruebas oscilatorias. Los valores medios y grupos homogéneos para los parámetros de los barridos de esfuerzos y frecuencias, se recogen en la Tabla 6.

a) Barridos de esfuerzos

En la Figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, el barrido de esfuerzos de 0,1 a 500 Pa de masas de la harina de arroz R y la mezcla 30% de la fracción ML y 70% de harina de arroz. Estos ensayos permitieron establecer la LVR mediante la localización del valor de esfuerzo, T_{max} y el punto de entrecruzamiento o *crosspoint*.

La tabla 6, muestra los valores de esfuerzo máximo y *crosspoint* para cada una de las masas estudiadas. Los valores de esfuerzo máximo oscilaron entre 10 y 14 Pa. Este esfuerzo fue calculado como el esfuerzo a partir del cual, el módulo elástico G' descendía un 30% respecto a su valor en la LVR. A este esfuerzo se consideró que las masas experimentaban una destrucción de su estructura. Para el valor de T_{max} , no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las masas estudiadas.

Los valores de *crosspoint* variaron entre 19 y 44 Pa. Las masas elaboradas con harina de arroz fueron las en las que se produjo el punto de cruce entre G' y G'' antes, al valor de 19 Pa. Sí que se observaron diferencias estadísticamente significativas entre la masa de arroz y cualquiera de las masas elaboradas con trigo sarraceno. Éstas mostraron unos valores de *crosspoint* entre 38 y 44 Pa, sin diferencias significativas entre ellas.

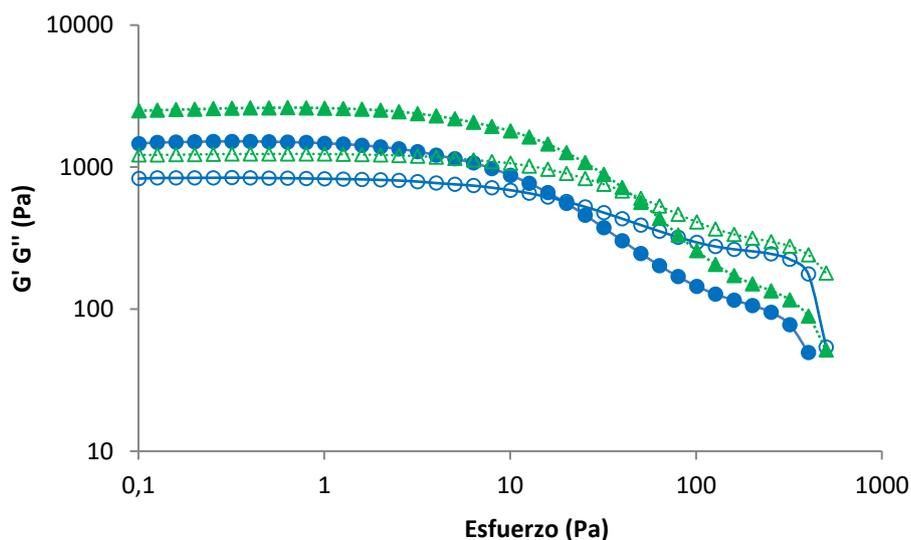


Figura 2: Barridos de esfuerzos de la masa control (●) y de la masa con 30% de la mezcla de fracciones ML y 70% de harina de arroz (▲). Los símbolos rellenos representan el módulo elástico (G') y los huecos el módulo viscoso (G'').

b) Barrido de frecuencias

En todas las masas evaluadas, se observó que los valores de G' fueron mayores que G'', como tal para los geles. En la Tabla 6, se muestran los parámetros de ajuste de los ensayos de frecuencias.

Tabla 6: Valores medios y grupos homogéneos obtenidos para los parámetros oscilatorios de las masas

| Muestras | G' ₁ (Pa) | a | G'' ₁ (Pa) | b | (tan δ) ₁ | C | T _{max} (Pa) | Crosspoint (Pa) | | | | | | | | |
|----------|-------------------------|----|--------------------------|----|----------------------|----|-----------------------|--------------------|------|---|-------|---|-----|---|-----|---|
| R | 1229 | a | 0,329 | b | 670 | a | 0,436 | b | 0,55 | b | 0,106 | b | 10 | a | 19 | b |
| ML | 2187 | d | 0,280 | a | 1035 | d | 0,350 | a | 0,48 | a | 0,070 | a | 14 | a | 44 | a |
| SM | 1594 | b | 0,285 | a | 779 | ab | 0,370 | a | 0,49 | a | 0,084 | a | 13 | a | 39 | a |
| M | 1690 | bc | 0,298 | ab | 849 | bc | 0,377 | a | 0,50 | a | 0,079 | a | 14 | a | 38 | a |
| SML | 1945 | cd | 0,280 | a | 965 | cd | 0,355 | a | 0,50 | a | 0,074 | a | 14 | a | 39 | a |
| ES | 116 | | 0,011 | | 47 | | 0,009 | | 0,01 | | 0,006 | | 1,4 | | 4,8 | |
| | *** | | * | | *** | | *** | | * | | ** | | ns | | * | |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes (p<0,05). Nivel de significancia: * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; ns: no significativo. ES: Error estándar. G': módulo elástico; G'': módulo viscoso; tan δ: tangente de pérdida; a, b, c: parámetros experimentales.

Se obtuvieron unos valores del módulo elástico (G') entre 1229 y 2187 Pa, y del módulo viscoso (G'') entre 1035 y 670 Pa, presentando las masas elaboradas con harina de arroz R los menores resultados, por lo que la adición de trigo sarraceno aumentó la consistencia de las masas. Los mayores valores de G' y G'' se obtuvieron para las masas elaboradas con fracción ML y con la

harina integral SML, pero sin diferencias estadísticas entre ellas. La presencia de la fracción L en ambas muestras, con alto contenido en fibra, de gran capacidad de retención de agua, y de proteína podría contribuir a incrementar la consistencia de las masas. Las masas elaboradas con las fracciones SM y M, tampoco mostraron diferencias significativas entre ellas. Se ha demostrado que las interacciones entre la proteína y el polisacárido conducen a cambios en el perfil del espectro mecánico (valores de G' y G'') (Harrington et., 2009).

Los valores de $(\tan \delta)_1$ oscilaron entre 0,47 (fracción ML) y 0,55 (R). Las masas con diferentes fracciones de trigo sarraceno mostraron los menores valores de $\tan \delta$, sin diferencias significativas entre ellas, Por el contrario, masas con arroz R fueron los que mayores valores de $\tan \delta$ mostraron, lo que se traduce en un comportamiento menos elástico de la masa en relación al módulo viscoso.

El exponente a osciló entre valores de 0,28 y 0,33 y el exponente b ente 0,35 y 0,44. Las masas elaboradas con 100% harina de arroz mostraron los valores más elevados de ambos exponentes, y por lo tanto, módulos elásticos, G' y viscosos G'' , más dependientes de la frecuencia. No se observaron diferencias estadísticas para a y b entre las masas con trigo sarraceno.

4.5.2. Ensayos de Creep-recovery

Se llevaron a cabo ensayos de deformación-relajación progresiva o *creep-recovery* con aplicación de esfuerzos entre 0,6-0,8 Pa, siempre dentro de la zona viscoelástica lineal (LVR). Las curvas obtenidas mostraron un comportamiento viscoelástico típico de masas de pan sin gluten (Figura 3) similares a las obtenidas por otros autores (Lazaridou et al., 2007, Ronda et al., 2013). La representación de la capacitancia elástica ($J = \text{deformación}/\text{esfuerzo}$) frente al tiempo, t, informa de la deformación que experimenta la masa y cómo se recupera una vez que cesa el esfuerzo.

A partir de estos ensayos y ajustando los resultados al modelo de Burgers, se obtuvieron los valores de los parámetros de ajuste que se recogen en la Tabla 7. Como era de esperar, una fuerte correlación fue encontrada entre los parámetros de capacitancia elástica en la fase de *creep* y los equivalentes en la fase de *recovery*.

La masa de R fue la que mayores valores de capacitancia presentó. Las masas elaboradas con la fracción SM y M, fueron muy similares entre sí, al igual que ocurrió con las masas elaboradas con ML y con la harina integral SML. Los menores valores de capacitancia se obtuvieron para estas dos últimas.

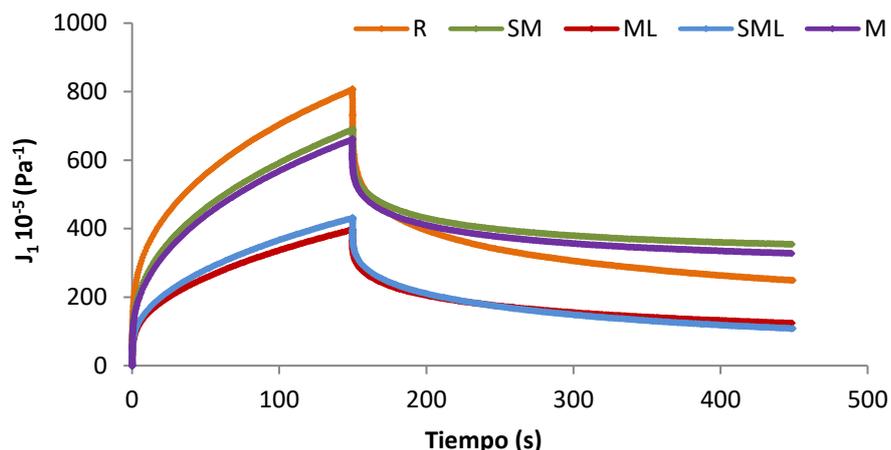


Figura 3: Representación de los ensayos *creep-recovery* de las masas estudiadas.

Las masas elaboradas con harina de arroz R fueron las que mayores valores de J_0 y J_1 registraron, tanto en la fase de deformación como en la de recuperación. Las elaboradas con las fracciones SM y M no fueron significativamente diferentes a las masas con arroz en la fase de deformación. Los menores valores de J_{0creep} y J_{1creep} fueron registrados para las masas con harina integral SML aunque éstas no fueron diferentes a las masas elaboradas con la fracción ML. En la fase de *recovery* en general, todas las masas elaboradas con alguna de las fracciones de trigo sarraceno mostraron el mismo comportamiento, registrando menores valores de $J_{0recovery}$ y $J_{1recovery}$ por debajo de las masas de harina de arroz R.

Tabla 7: Valores medios y grupos obtenidos para los parámetros de *creep-recovery*

| Muestras | Fase Creep | | | | Fase Recovery | | |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | J_0 (10^{-5}) Pa $^{-1}$ | J_1 (10^{-5}) Pa $^{-1}$ | λ_1 (s) | μ_0 (Pa.s) | J_0 (10^{-5}) Pa $^{-1}$ | J_1 (10^{-5}) Pa $^{-1}$ | λ_1 (s) |
| R | 42,78 c | 342,61 c | 2,551 a | 35347 a | 194,32 c | 340,02 b | 51,11 ab |
| ML | 26,72 ab | 169,44 ab | 4,193 bc | 53873 bc | 81,11 a | 181,55 a | 56,98 ab |
| SM | 39,24 bc | 274,81 bc | 3,511 b | 37872 ab | 111,22 b | 212,87 a | 41,66 a |
| M | 38,19 bc | 257,32 abc | 4,286 c | 42337 ab | 106,14 b | 216,85 a | 45,71 ab |
| SML | 25,03 a | 158,98 a | 3,916 bc | 58410 c | 95,37 ab | 215,73 a | 61,80 b |
| ES | 5,53 | 48,90 | 0,363 | 6861 | 8,69 | 16,45 | 7,51 |
| | * | * | *** | * | *** | *** | ns |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. J_0 : capacitancia instantánea, J_1 : capacitancia elástica retardada, λ_1 : tiempo de retardo, μ_0 : viscosidad estacionaria

Con respecto al tiempo de retardo, los valores obtenidos fueron menores en la fase de *creep*, con tiempos entre 2,5 y 4,3 s, que en la fase de *recovery* los cuales oscilaron entre 41 y 62 s. Las masas elaboradas con trigo sarraceno mostraron los mayores valores de tiempo de retardo en la fase de *creep*, superiores a las masas R (2,5 s), pero sin diferencias notables entre las

distintas fracciones estudiadas. En la fase de *recovery*, no se observaron diferencias significativas para ninguna de las masas estudiadas.

Los valores de viscosidad estacionaria (μ_0), oscilaron entre 35000y 59000Pa·s. En la Tabla 7 se puede observar cómo la viscosidad está correlacionada con los parámetros de capacitancia instantánea y elástica retardada; al aumentar los valores de éstos últimos disminuyen los de viscosidad. Cabe destacar la masa con la fracción SML que mostró el mayor valor de viscosidad con 58410 Pa·s. Las masas elaboradas con harina de arroz R destacaron por presentar los menores valores de viscosidad estacionaria.

4.6. Propiedades morfogeométricas de los panes

4.6.1. Pérdida de peso

Con la pérdida de peso se puede llegar estimar la capacidad de retención de agua de los panes después de la fermentación, el horneado y el enfriamiento. Los resultados obtenidos para este parámetro se muestran en la Tabla 8.

Los diferentes tamaños de partícula de las harinas influenciaron en la pérdida de peso de los panes. Se apreció que los panes elaborados con la harina SML presentaron una mayor pérdida de peso (20,8%) que los panes de arroz R (18,47%). Lo mismo fue observado por otros autores en panes elaborados con tef; los cuales atribuyeron este hecho a la fibra aportada por el tef (Ezpeleta et al., 2010). En nuestro caso, los panes que contenían la harina SML mostraron una mayor pérdida de peso debido al alto porcentaje de fibra que presenta esta harina (Tabla 1).

4.6.2. Volumen específico

La Tabla 8 muestra las propiedades morfogeométricas tanto de los panes elaborados con 30% de diferentes fracciones de harina de trigo sarraceno y 70% de harina de arroz como del elaborado con 100% harina de arroz, R. Las harinas empleadas en la formulación ejercieron un efecto significativo sobre el volumen específico del pan ($p < 0,001$). La contribución del 30% de harina integral SML en la masa de arroz, produjo un aumento del volumen específico de los panes. En un estudio realizado en panes de molde por Mariam et al. (2009) se concluyó que una sustitución del 20% de tef en panes con harina de trigo hizo disminuir el volumen específico de los panes. Los panes elaborados con las fracciones SM y ML mostraron los menores volúmenes, probablemente debido a la falta de retención de gas durante la fermentación. Estos resultados concuerdan con lo reportado por de la Hera et al. (2013) quienes estudiaron la influencia del tamaño de partícula de la harina de arroz en la calidad del pan sin gluten y cuyos panes elaborados con las fracciones más pequeñas de harina de arroz, mostraron los menores valores específicos.

Los valores de volumen específico de los panes elaborados a partir de la fracción M y los elaborados sólo con harina de arroz, R, no mostraron diferencias significativas.

Tabla 8: Resultados obtenidos de las propiedades morfogeométricas.

| Muestras | Perdida de peso (%) | | Volumen específico (ml/g) | |
|----------|---------------------|----|---------------------------|---|
| | | | | |
| R | 18,47 | ab | 3,04 | c |
| ML | 17,13 | a | 2,48 | a |
| SM | 18,99 | bc | 2,87 | b |
| M | 20,07 | bc | 3,04 | c |
| SML | 20,80 | c | 3,10 | d |
| ES | 0,50 | | 0,02 | |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar.

4.6.3. Color de corteza y miga

El color es una de las características físicas que primero detecta un consumidor cuando evalúa la calidad de un pan que pretende adquirir o consumir, por eso es un parámetro fundamental a la hora de caracterizar panes. Para poder explicar mejor los resultados obtenidos para los diferentes atributos del color de los panes, se caracterizó también el color de las harinas utilizadas para la elaboración de dichos panes, cuyos resultados se recogen en la Tabla 2. Los datos del color de la corteza y de la miga de los panes elaborados se recogen en la tabla 9 y el Anexo 1 permite comparar los atributos del color de los panes elaborados.

Tabla 9: Color de corteza y miga de los panes elaborados

| Muestras | Color Corteza | | | Color miga | | |
|----------|---------------|----------|----------|------------|----------|---------|
| | L* | H | C* | L* | h | C* |
| R | 57,90 d | 60,53 c | 33,09 c | 63,84 b | 64,92 b | 6,79 a |
| ML | 49,90 b | 57,76 b | 32,56 bc | 63,37 b | 66,04 b | 8,18 ab |
| SM | 51,58 bc | 58,38 b | 32,10 b | 63,62 b | 66,45 b | 6,99 ab |
| M | 53,42 c | 57,29 ab | 32,61 bc | 63,86 b | 55,54 a | 8,41 b |
| SML | 46,52 a | 55,55 a | 30,47 a | 59,61 a | 60,57 ab | 8,02 ab |
| ES | 0,54 | 0,48 | 0,25 | 0,47 | 2,28 | 0,40 |
| | *** | ** | ** | ** | ns | ns |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

L*: Luminosidad, C*: Saturación, h: Tono

Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar.

Los mayores valores de luminosidad, tono y saturación de la corteza se obtuvieron para los panes de harina de arroz, R. Los panes elaborados con sustitución de las diferentes fracciones de TS mostraron menores valores. Los valores más bajos de luminosidad, tono y saturación de

la corteza se obtuvieron en los panes elaborados con la harina integral SML. Entre las fracciones estudiadas no se observaron apenas diferencias significativas. El tono tanto de la corteza como de la miga de todos los panes se encontró entre el rojo y el amarillo. Los panes mostraron tanto cortezas como migas anaranjadas claras, más cercanas a los colores amarillos tal y como se observó en las harinas. Purlis (2010) describe que los cambios en la luminosidad pueden deberse a alteraciones en la superficie, ya que una superficie regular refleja más luz que una irregular y que principalmente, el color de corteza se debe a la reacción de Maillard y la caramelización de azúcares durante el horneado. En el caso de la miga, sólo los panes elaborados con la harina SML mostraron diferente luminosidad siendo el valor más bajo obtenido. El color de la miga está influenciado principalmente por los ingredientes presentes en la formulación del pan (Pérez-Quirce et al., 2014).

4.6.4. Características de textura

Los resultados obtenidos en la medición de los parámetros texturales de la miga se recogen en la Tabla 10. Los panes elaborados con harina de arroz, R presentaron migas con menor dureza mientras que los panes elaborados con la fracción ML fueron los que obtuvieron los mayores valores.

Tabla 10: Valores medios y grupos homogéneos para los parámetros de textura de los panes

| Muestra | Dureza (N) | Elasticidad | Cohesividad | Gomosidad (N) | Masticabilidad (N) | Resiliencia |
|---------|------------|-------------|-------------|---------------|--------------------|-------------|
| R | 1,24 a | 0,898 a | 0,513 a | 0,634 a | 0,570 a | 0,278 abc |
| SM | 1,83 c | 0,952 c | 0,546 b | 0,998 c | 0,951 c | 0,295 bc |
| M | 1,55 b | 0,942 bc | 0,555 b | 0,858 b | 0,808 b | 0,308 c |
| ML | 2,57 d | 0,933 b | 0,511 a | 1,312 d | 1,223 d | 0,26 a |
| SML | 1,54 b | 0,939 bc | 0,513 a | 0,789 b | 0,742 b | 0,267 ab |
| ES | 0,05 | 0,006 | 0,007 | 0,04 | 0,04 | 0,01 |
| | *** | *** | *** | *** | *** | * |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar

La elasticidad está relacionada con la calidad del pan. Así, un pan de alta calidad con un buen grado de frescura tiende a valores altos de elasticidad, ya que se define como la capacidad de recuperación de la miga tras la aplicación de la fuerza de deformación (McCarthy et al., 2005). En cuanto a la elasticidad de la miga, se obtuvieron diferencias significativas entre los panes. Con respecto al pan elaborado con harina de arroz, los panes elaborados con las fracciones de TS sí mostraron una miga más elástica, con los valores mayores para la fracción SM.

La cohesividad expresa la deformación sufrida por el alimento antes de romperse. Los valores de cohesividad de los panes elaborados con harina SM y M mostraron diferencias significativas con respecto al resto de panes elaborados. Se puede confirmar que esos panes SM y M, presentaron mayor resistencia de la estructura interna a la deformación que el resto. Los panes

elaborados con la fracción ML mostraron mayores valores de gomosidad que el pan de harina de arroz R y el resto de panes, por lo que se desintegraron menos.

La masticabilidad está relacionada directamente con la dureza. Por esto, su evolución ha sido similar a la de la dureza. Los panes elaborados con las fracciones de harina de TS mostraron mayores valores de masticabilidad en comparación con la harina R. Esto nos indica que la miga de estos panes es menos blanda y se mastica con mayor dificultad que la de los panes elaborados con harina de arroz.

La resiliencia, que representa la capacidad instantánea de recuperación de la miga fue similar en todos panes estudiados.

Los valores más altos de cohesividad, elasticidad y resiliencia fueron registrados con la mezcla de fracciones SM, resultados que concuerdan con los obtenidos por de la Hera et al. (2013) cuyos resultados fueron mayores para panes elaborados con granulometrías más bajas e intermedias.

Mediante un estudio de evolución de la dureza del pan, midiendo la textura a los 7 días de elaboración, se intentó conocer cómo evolucionó la retrogradación del almidón y la humedad, dos de los parámetros que más influyen en el envejecimiento de los panes (Hager et al., 2012). Los resultados obtenidos para la variación de la dureza se expresan en la Tabla 11.

Tal y como se esperaba, la dureza de los panes tras una semana de almacenamiento fue mayor. Los panes elaborados con la harina SML y los de la harina R mostraron un menor aumento de dureza durante el almacenamiento con un incremento de 2,32 y 2,90 N. Al contrario de los panes con la fracción ML, que presentaron el mayor incremento de dureza (5,20 N). Por eso, la fracción ML muestra una estructura más compacta y más dura. El cambio de dureza durante el almacenamiento se relaciona con la recristalización de la amilopectina (Jacobson et al., 1997) y también podría verse afectada por la presencia de proteínas, lípidos y fibras (Eliasson, 1994; Santos et al., 2008).

Tabla 11: Valores medios y grupos homogéneos de la textura tras almacenamiento de 7 días

| Muestra | Dureza | | Incremento | |
|---------|--------|---------|------------|--|
| | Día 0 | Día 7 | Dureza 0-7 | |
| R | 1,24 a | 4,14 a | 2,90 a | |
| ML | 2,57 d | 7,77 c | 5,20 b | |
| SM | 1,83 c | 5,41 ab | 3,58 ab | |
| M | 1,55 b | 6,18 bc | 4,64 b | |
| SML | 1,54 b | 3,85 a | 2,32 a | |
| ES | 0,05 | 0,50 | 0,46 | |
| | *** | * | * | |

Valores con letras distintas dentro de una misma columna indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). F4: Fuerza máxima. Nivel de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. ES: Error estándar

5. CONCLUSIÓN

La elaboración de panes sin gluten con trigo sarraceno en sustitución de parte de la harina de arroz, puede proporcionar un producto interesante desde el punto de vista nutricional. Las fracciones de harina de TS presentaron mayores cantidades de proteínas, fibras y grasa en comparación con la harina de arroz.

Las fracciones de TS mostraron el mayor índice de solubilidad de agua, mayor actividad emulsionante y estabilidad de la emulsión con respecto a la harina de arroz. En cuanto a la propiedad de empastado, la fracción M fue la que mayor perfil de viscosidad registro, pero todas las muestras de TS mostraron menores perfiles que la harina de arroz. Se ha observado que los geles de la harina integral de TS fueron más consistentes posiblemente por su elevado contenido en fibra.

Los mayores valores de G' y G'' se obtuvieron para las masas elaboradas con fracción ML y con la harina integral SML. Asimismo, la masa de arroz fue la que mayores valores de capacitancia. Los panes elaborados con los diferentes tamaños de TS mostraron mayor pérdida de peso y menor volumen específico y presentaron los menores valores de color de corteza que los elaborados con harina de arroz. La miga resultó más dura y con mayor elasticidad, gomosidad y masticabilidad.

Para completar este estudio, trabajos futuros deben llevarse a cabo con el fin de enriquecer nutricionalmente y mejorar la calidad de otros productos sin gluten tales como galletas o bizcochos.

6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la tutora de este trabajo: Felicidad Ronda, por su orientación y aportes para elaboración de esta memoria. También quiero dar gracias tanto a Marina Villanueva por su ayuda, como a Joanna Harasym.

Por último, agradecer a mi familia por su apoyo en todo momento y mi beca Erasmus mundus (DREAM) de la Universidad de Oporto, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este Máster.

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto (AGL2015-63849-C2-2-R) financiado por Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) y la Comisión Europea, Marie Skłodowska-Curie (H2020-MSCA-IF-2015-EF. Ref: 706102).

7. BIBLIOGRAFIA

- Abebe, W., Ronda F., Villanueva, M., Collar, C. (2015). Effect of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] grain flour addition on viscoelastic properties and stickiness of wheat dough matrices and bread loaf volume. *Eur Food Res Technol*, 241, 469-478.
- Ahmed, J., Taher, A., Mehrajatema, Z.M., Abdulsalam, A.H., Giorgio, L. (2016). Effect of sieve particle size on functional, thermal, rheological and pasting properties of Indian and Turkish lentil flour. *Journal of Food Engineering*, 186, 34-41.
- Altschul, M., Wilcke, A.L. (1985). *New protein food*. *J. Food Sci. Technol.*, F.L. Orlando, Academic Press.

- Araki, E., Ikeda, T., Ashida, K., Takata, K., Yanaka, M., Iida, S. (2009). Effects of rice flour properties on specific loaf volume of one-loaf bread made from rice flour with wheat vital gluten. *Food Science and Technological Research*, 15, 439-448.
- Arendt, E.K., Morrissey, A., Moore, M.M., Dal Bello, F. (2008). *Gluten-free breads. Gluten-free cereal products and beverages*. Academic Press, 289-311.
- Beuchat, L.R. (1977). Functional and electrophoretic characteristics of succinylated peanut flour protein. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 25, 258-261.
- Bonnand-Duscasse, M., Valle, G.D., Lefebvre, J., Saulnier, L. (2010). Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties. *J. Cereal Sci.* 52, 200-206.
- Bressiani, J., Oro, T., Santetti, G.S., Almeida, J.L., Bertolin, T.E., Gomez, M., Gutkoski, L.C. (2017). Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size. *Journal of Cereal Science*, 75, 269-277.
- Catassi, C., Yachha, S.K. (2009). *The epidemiology of celiac disease. The science of gluten-free foods and beverages*, Academic Press, 1-13.
- Chen, F., He, Z., Chen, D., Zhang, C., Zhang, Y., Xia, X. (2007). Influence of puroindoline alleles on milling performance and qualities of Chinese noodles, steamed bread and pan bread in spring wheats. *Journal of Cereal Science*, 45, 59-66.
- Coffman, C.W., Garcia, V.V. (1977). Functional properties and amino acid contents of protein isolate from mung bean flour. *J. Food Technol.*, 12, 473-484.
- De la Hera, E., Martinez, M., Gómez, M. (2013). Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT – Food Science and Technology*, 54, 199-206.
- Dionisi, C.P. (2012). Cadena de producción del trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* Moench): elaboración de productos de panificación fortificados y libres de gluten. Área de consolidación: Tecnología de Agro alimentos.
- Dionisi, C.P. (2012). Trigo sarraceno con traje de verano. *La Voz del Campo*, 1-2.
- Drako, A., Kyriakakis, G., Evageliou, V., Protonotariou, S., Mandala, I., Ritzoulis, C. (2017). Influence of jet milling and particle size on the composition, physicochemical and mechanical properties of barley and rye flours. *Food Chemistry*, 215, 326-332.
- Edwardson, S. (1996). Buckwheat: Pseudocereal and nutraceutical. En: Janick, J. (ed). *Progress in new crops*, 195-207.
- Eliasson, A.C. (1994). Interactions between starch and lipids studied by DSC. *Thermochim. Acta* 246, 343-356.
- Ezpeleta, J. I., Callejo, M. J. (2010). Calidad harino-panadera de la harina de teff (*Eragrostis tef* (ZUCC.) TROTTER). Departamento de Tecnología de Alimentos. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Libro de actas, 87-90.
- Farrell, R.J., Kelly, C.P. (2002). Celiac sprue. *New England Journal of Medicine*, 346, 180-188.
- 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.
- Green, P. H. R., Jabri, B. (2003). Coeliac disease. *The Lancet*, 362, 383-391.
- Gan, Z., Ellis, P.R., Schofield, J. D. (1995). Gas cell stabilization and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science*, 21, 215-230.
- Hager, A.S., Wolter, A., Jacob, F., Zannini, E., Arendt, E.K. (2012). Nutritional properties and ultrastructure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 56, 239-247.
- Harrington, J.C., Foegeding, E.A., Mulvihill, D.M., Morris, E.R. (2009). Segregative interactions and competitive binding of Ca²⁺ in gelling mixtures of whey protein isolate with Na₆ k-carrageenan. *Food Hydrocolloids*, 23, 468-489.
- Hidalgo, A., Fongaro, L., Brandolini, A. (2014). Wheat flour granulometry determines colour perception. *Food Research International*, 64, 363-370.
- Jacobson, M.R., Obanni, M., BeMiller, J.N. (1997). Retrogradation of starches from different botanical sources. *Cereal Chem.* 74, 511-518.

- Karaca, A.C., Low, N., Nickerson, M. (2011). Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction. *Food Res. Int.* 44, 2742–2750.
- Kaushal, P., Kumar, V., Sharma, H. K. (2012). Comparative study of physico-chemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends. *LWT – Food Science and Technology*, 48, 59–68.
- Khattab, R.Y., Arntfield, S.D. (2009). Functional properties of raw and processed canola meal. *LWT – Food Science and Technology*, 42, 1119–1124.
- Kim, S., Park, C. (2004). Introduction and nutritional evaluation of buckwheat sprouts as a new vegetable. *Food Research International*, 37, 319-327.
- Kinsey, L., Burden, S.T., Bannerman, E. (2008). A dietary survey to determine if patients with coeliac disease are meeting current healthy eating guidelines and how their diet compares to that of the British general population. *European Journal of Clinical Nutrition*, 62, 1333-1342.
- Kowalewski, W., Gałazka, R., Gąsiorowska, T. (2004). Technologia przerobu gryki na kaszę. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 6, 28-30.
- 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 Food Eng*, 79, 1033-1047.
- Mariam, I.O.M., Abdelmoneim, I.M., Gammaa, A.M.O.(2009). Evaluation of wheat breads supplemented with teff (*Eragrostis tef* (zucc.) trotter) grain flour. *Australian Journal of Crop Science*, 3:4, 207-212.
- Mariotti M., Lucisano M., Pagani M.A., Lametti S. (2008). Macromolecular interactions and rheological properties of buckwheat-based dough obtained from differently processed grains. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 56, 4258-4267.
- McCarthy, D., Gallaguer, E., Gormley, T., Schober, T., Arendt, E. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten free bread. *Cereal Chemistry*, 82, 609-615.
- Mezaize, S., Chevallier, S., Le Bail, A., de Lamballerie, M. (2009). Optimization of gluten-free formulations for French-style breads. *Journal of Food Science*, 74, 140-146.
- Myers, R. L., Meinke, L. J. (1994). Department of Agronomy. Buckwheat: A Multi-Purpose, Short-Season Alternative.
- Napoli, G. (1994). Trigo sarraceno. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Belgrano, 1–72.
- Nir, I., Feildman, Y., Aserin, A., Garti, N. (1994). Surface properties and emulsification behavior of denatured soy proteins. *J. Food Science*, 59, 606-610.
- Nocentini, F.M., Oberto, M.G., Pacheco, E.L. (1999). Análisis Químico del Grano de Trigo Sarraceno y de su Harina Integral. Elaboración de Productos sin Gluten rico en Fibras: Croquetas y Crepes. Evaluación Sensorial de los Mismos, Tesis de grado Escuela de Nutrición.
- Pérez-Quirce, S., Collar, C., Ronda, F. (2014). Significance of healthy viscous dietary fibres on the performance of gluten-free rice-based formulated breads, *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 1375–1382.
- Pomeranz, Y. (1985). Functional properties of food components. Florida: Academic Press.
- Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products-A review. *Journal of Food Engineering*, 99, 239-249.
- Ronda, F., Pérez-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.
- Ronda, F., Roos, Y.H. (2011). Staling of fresh and frozen gluten-free bread. *J. Cereal Sci*, 53, 340-346.
- Santos, E., Rosell, C. M., Collar, C. (2008). Retrogradation kinetics of high fiber-wheat flour blends: A calorimetric approach. *Cereal Chemistry*, 85, 455–463.
- Sathe, S.K., Desphande, S.S., Salunkhe, D.K. (1982). Functional properties of lupin seed (*Lupinus mutabilis*) protein and protein concentrates. *J. Food Science*, 47, 491-497.

- Singh, H., MacRitchie, F. (2001). Application of polymer science to properties of gluten Source. *Journal of Cereal Science*, 33, 231-243.
- Sreerama, Y.N., Sashikala, V.B., Pratape, V.M., Singh, V. (2012). Nutrients and antinutrients in cowpea and horse gram flours in comparison to chickpea flour: Evaluation of their flour functionality. *Food Chemistry*, 131, 462–468.
- Van Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., Dewttinck, K. (2011). Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough. *Journal Food Eng*, 107, 50-59.

ANEXO 1: IMÁGENES DE LOS PANES Y LAS REBANADAS

