



CARACTERIZACIÓN DE MASAS Y PANES SIN GLUTEN ENRIQUECIDOS CON HARINA DE TRIGO SARRACENO TRATADO CON MICROONDAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2021/22

Alumno: María Mate Correa
Tutores: Felicidad Ronda Balbás
Pedro A. Caballero Calvo
Ainhoa Vicente Fernández

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

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	2
1.1. Panificación sin gluten	2
1.2. Trigo sarraceno	3
1.3. Modificación física de harinas y su aplicación en la panificación sin gluten	4
2. Objetivos	6
3. Materiales y métodos	6
3.1. Materiales	6
3.2. Métodos de análisis	7
3.2.1. Determinación de la humedad	7
3.2.2. Obtención de la harina tratada.....	7
3.2.3. Caracterización de harinas	8
3.2.4. Reología de masas.....	10
3.2.5. Caracterización de los panes.....	13
3.2.6. Análisis estadístico	14
4. Resultados y discusión	14
4.1. Caracterización de las harinas.....	14
4.1.1. Propiedades funcionales	14
4.1.2. Propiedades de empastado	17
4.2. Reología de masas.....	19
4.2.1. Reología de masas a hidratación constante	19
4.2.2. Reología de masas a consistencia constante	22
4.3. Caracterización de los panes.....	24
5. Conclusiones	27
Agradecimientos	28
Bibliografía	28
ANEXO I. Reología de masas a hidratación constante y a consistencia constante	

RESUMEN

Los productos de panificación libres de gluten usualmente presentan una deficiente calidad sensorial y nutricional. Para mejorar la funcionalidad de los ingredientes sin gluten y su adecuación a los procesos de panificación, en este estudio se planteó el empleo de radiación microondas para la modificación física hidrotérmica de granos de trigo sarraceno, un pseudocereal libre de gluten. Se evaluó el efecto del empleo de harina de trigo sarraceno tratada en diferentes ciclos de aplicación de microondas sobre las propiedades sensoriales y nutricionales de los panes sin gluten. Se aplicaron tres ciclos de aplicación/reposo de microondas (10/50, 20/40 y 30/30 segundos) para un mismo tiempo total de aplicación (8 minutos). Para evaluar la efectividad del tratamiento, se analizaron las propiedades funcionales y de empastado a las harinas, las propiedades reológicas de las masas y las propiedades físicas de los panes elaborados. Las propiedades funcionales de las harinas se vieron modificadas con el tratamiento microondas, destacando un aumento de su capacidad de absorción de agua, una reducción de sus capacidades emulsionante y espumante, un aumento de la temperatura de empastado y una disminución de la viscosidad pico, la viscosidad final y la retrogradación de la amilosa. Cuando se comparó la reología de masas a hidratación constante, se observó un incremento de la consistencia de las masas. En consecuencia, se requirió un incremento del contenido de agua a añadir en las formulaciones con harina tratada al objeto de elaborar los panes con hidratación adaptada para una consistencia constante. Los panes elaborados a partir de las harinas tratadas con los ciclos 10/50 (TST1) y 30/30 (TST3) mostraron una mejora de sus características frente al pan con harina sin tratar, incrementando su volumen, reduciendo la dureza de la miga y aumentando su vida útil. Los resultados observados sugieren que el empleo de harinas obtenidas a partir de granos de trigo sarraceno modificados mediante microondas podría ser una buena estrategia para mejorar la calidad sensorial y nutricional de los panes sin gluten.

Palabras clave: microondas, trigo sarraceno, reología, panificación y sin gluten.

ABSTRACT

Gluten-free bakery products often have poor sensorial and nutritional quality. To improve the functionality of gluten-free ingredients and their suitability for baking processes, this study considered the use of microwave radiation for the hydrothermal physical modification of buckwheat grains, a gluten-free pseudocereal. The effect of using buckwheat flour treated in different microwave application cycles on the sensory and

nutritional properties of gluten-free breads was evaluated. Three different microwave application/rest cycles (10/50, 20/40 y 30/30 seconds) were applied for the same total application time (8 minutes). The functional and pasting properties of the flours, the rheological properties of the doughs and the physical properties of the produced breads were analyzed to evaluate the effectiveness of the treatment. Flour functional properties were modified by microwave treatment, notably an increase in their water absorption capacity, a reduction in their emulsifying and foaming capacities, an increase in the pasting temperature and a decrease in peak viscosity, final viscosity and amylose retrogradation were observed. When comparing the rheology of doughs at constant hydration, an increase in the consistency of the doughs was observed. Consequently, an increase in the water content added to the formulations with treated flour was required to produce breads with an adapted hydration for constant consistency. The breads made from the flours treated with the 10/50 (TST1) and 30/30 (TST3) cycles showed an improvement in their characteristics compared to the bread with untreated flour, increasing their volume, reducing the hardness of the crumb and extending their shelf life. The observed results suggest that the use of flours obtained from microwave modified buckwheat grains could be an effective strategy to improve the sensorial and nutritional quality of gluten-free breads.

Keywords: microwave, buckwheat, rheology, breadmaking and gluten-free.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Panificación sin gluten

En la actualidad, cada vez es más común el diagnóstico de enfermedades asociadas con reacciones adversas provocadas por el consumo de algunos alimentos. Entre ellas cabe destacar la intolerancia al gluten (Moscoso y Quera, 2015). La enfermedad celíaca es un trastorno inflamatorio de origen autoinmune que afecta a la mucosa del intestino delgado en pacientes susceptibles genéticamente cuando estos ingieren gluten (Arranz y Garrote, 2010). El único tratamiento para paliar la celiaquía es seguir una dieta estricta libre de gluten, lo que ha contribuido a un aumento en la demanda de productos sin gluten (Arranz y Garrote, 2010; Sapone et al., 2012).

La supresión del gluten en aquellos productos en los que cumple una función estructural, como es el caso del pan, supone un reto tecnológico. Las proteínas que forman el gluten son las responsables de crear una matriz viscoelástica que es capaz de retener el gas producido por las levaduras durante la fermentación y horneado del pan, generando con ello la textura característica de la miga de pan. En ausencia de estas proteínas, no se obtienen masas elásticas ni cohesivas, por lo que se deben adaptar las formulaciones

para obtener resultados similares a los obtenidos con harina de trigo (Gallagher et al., 2004). Las formulaciones de panes sin gluten suelen estar basadas en una mezcla de almidones, con lo cual, también se ven afectadas las propiedades nutricionales. Los panes sin gluten suelen presentar un contenido reducido de proteínas, vitaminas, minerales y fibra, y un elevado valor del índice glucémico y el contenido en grasa respecto a sus homólogos con gluten (Matos y Rosell, 2011).

Por este motivo, actualmente se está investigando cómo obtener productos libres de gluten con mayor calidad organoléptica y con un perfil nutricional más saludable (Matos y Rosell, 2011).

1.2. Trigo sarraceno

El empleo de pseudocereales en la elaboración de productos libres de gluten constituye una interesante alternativa debido a sus distintas propiedades. A pesar de que sus propiedades de cocción y procesado son similares a las de otros cereales, desde un punto de vista nutricional se caracterizan porque carecen de gluten, teniendo un perfil de nutrientes más equilibrado que los cereales con gluten. Por otro lado, se les ha atribuido efectos positivos sobre la salud, en base a sus propiedades antioxidantes, inmunomoduladores y anticancerígenas (Zhu, 2020).

Uno de los cereales propuestos para aumentar la calidad de los productos libres de gluten es el trigo sarraceno (Alvarez-Jubete et al., 2010). El trigo sarraceno, también conocido como alforfón, es una planta dicotiledónea perteneciente al género *Fagopyrum* de la familia *Polygonaceae* (León y Toscano, 2021). Sus granos se emplean para la alimentación humana, tienen forma triangular y estructura leñosa, y un color que varía desde marrón a gris. Para su consumo hay que descascarillarlo, ya que está recubierto por una cutícula no comestible (Chancahuaña, 2018).

Sus semillas son utilizadas para el consumo humano como cereales de desayuno, pero también, la harina obtenida a partir de éstas es ampliamente utilizada para la elaboración de distintos productos de panadería como pan o galletas, en los que esta harina se adiciona en porcentajes comprendidos entre un 0,3 y un 60%. También se emplea para la elaboración de otros productos como té, miel y tarhana (Giménez-Bastida y Zielinski, 2015).

Nutricionalmente, el trigo sarraceno es de gran interés debido a su contenido en flavonoides y compuestos fenólicos, así como por ser una fuente rica en proteína, fibra, lípidos y minerales. Cien gramos de harina de trigo sarraceno aportan entre el 13-89% de las necesidades diarias de cobre, zinc, magnesio y manganeso (Zhang et al., 2012; Zhu, 2020). Otro de sus beneficios está asociado a la alta biodisponibilidad de los

minerales después de la cocción en comparación con otros cereales, lo cual se asocia a su vez al bajo contenido de ácido fítico inherente en el trigo sarraceno, que actúa como inhibidor de la absorción de minerales (Bhinder et al., 2020). Su contenido proteico es muy similar al del trigo, entre un 10-15%, pero presenta un perfil aminoacídico más completo ya que es rico en arginina y lisina, aminoácidos limitantes en los cereales más empleados. Respecto al resto de macronutrientes, presenta un contenido graso comprendido entre un 2 y un 4%, y en torno a un 70% de carbohidratos (Bhinder et al., 2020).

El empleo de harina de trigo sarraceno se ha propuesto como una estrategia para mejorar la calidad nutricional y sensorial de los productos sin gluten. Wronkowska et al. (2013) demostraron que el empleo de hasta un 40% harina de trigo sarraceno en la elaboración de pan sin gluten a base de almidones de maíz y patata permite obtener panes con mayor volumen específico, color más oscuro y un envejecimiento retardado. Torbica et al. (2010) elaboraron panes sin gluten sustituyendo la harina de arroz por harina de trigo sarraceno con y sin descascarillar hasta un 30%. Sus resultados mostraron la viabilidad de obtener panes con calidad aceptable mediante la incorporación de trigo sarraceno. Sin embargo, el empleo de trigo sarraceno sin descascarillar aportaba un sabor amargo que reducía su aceptación. Como consecuencia de estos resultados, el empleo de trigo sarraceno en panadería se ha asociado a productos de baja calidad organoléptica, siendo necesario seguir investigando en el uso de este pseudocereal en la industria alimentaria para mejorar las características físicas y sensoriales de los panes sin gluten.

1.3. Modificación física de harinas y su aplicación en la panificación sin gluten

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad los productos comerciales sin gluten tienen una baja calidad, tanto organoléptica como nutricional. Con el objetivo de mejorar la capacidad de las harinas para dar la funcionalidad requerida para producir panes sin gluten, se está evaluando el empleo de distintos tratamientos.

Entre las diferentes opciones, se encuentran los tratamientos hidrotérmicos (HMT – Heat-Moisture Treatment). Se trata de un tratamiento físico ampliamente aceptado al ser respetuoso con el medio ambiente, que tiene bajo costo, es seguro y efectivo, y constituye una buena alternativa ecológica, ya que no requiere reactivos químicos, ni tampoco agentes biológicos nocivos para el consumo humano (Martins et al., 2021). Además, cabe destacar que los tratamientos físicos dan lugar a materias primas que no tienen la consideración de aditivos, por lo que no hay que especificarlos como tal en el

etiquetado del producto, a diferencia de los provenientes de tratamientos químicos, atendiendo así a la creciente demanda de productos con etiqueta limpia o “Clean Label” (Radeloff y Beck, 2016).

En los HMT la harina está expuesta a altas temperaturas, superiores a las de gelatinización del almidón, pero con un contenido limitado de agua (10-30%) como para que se produzca la gelatinización (Gunaratne, 2018).

El HMT es uno de los métodos más utilizados para alterar las propiedades del almidón, como la cristalinidad, la capacidad de absorción de agua y las propiedades de empastado, permitiendo mantener la integridad de la molécula de almidón. Estos tratamientos también influyen positivamente en la digestibilidad del almidón, debido al incremento del almidón lentamente digerible y almidón resistente y a la reducción del almidón rápidamente digerible (Martins et al., 2021), lo que conlleva una interesante mejora nutricional. Además, el empleo de HMT promueve la estabilidad térmica de los almidones, lo que supone un beneficio para el desarrollo de productos que se exponen a altas temperaturas durante su elaboración, como es el caso de los productos horneados (Molavi et al., 2018).

El HMT requiere la aplicación de calor que, a nivel industrial, supone un elevado coste, lo cual es una clara desventaja. A diferencia de los métodos convencionales empleados para aplicar este tratamiento, el tratamiento con microondas (MW) como medio para suministrar calor constituye una interesante alternativa por su elevada eficacia y la reducción de los costes asociados. El tratamiento con microondas consiste en el empleo de ondas electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre 1 y 300 GHz que pueden ser absorbidas eficientemente por moléculas polares y ionizables. Este tratamiento proporciona un calentamiento más uniforme y rápido. La absorción de las ondas microondas se realiza a nivel molecular, dando lugar a un aumento rápido de la temperatura en la muestra, influyendo en ello la humedad que contenga la misma. En función de la intensidad del tratamiento aplicado, los componentes de las harinas modificarán su funcionalidad (Villanueva et al., 2018a).

El tratamiento microondas ha demostrado ser efectivo en la mejora de la calidad de los panes de arroz sin gluten (Villanueva et al., 2019). La apariencia del pan, mostrada en parámetros como el volumen específico y el color, se vio mejorada gracias al tratamiento microondas. Lo mismo ocurrió con las masas, las cuales mostraron un comportamiento más elástico y una mayor resistencia a la deformación frente a la tensión aplicada en los ensayos reológicos.

Los estudios previos desarrollados sirven para constatar que el tratamiento con microondas sobre matrices libres de gluten parece ser efectivo para mejorar la

capacidad tecnológica de las harinas para ser usadas en la producción de panes sin gluten de mejor calidad nutricional y sensorial. Sin embargo, hay aún muy poca literatura al respecto y es necesario profundizar en la aplicabilidad de los tratamientos microondas a distintas matrices, optimizando tanto las condiciones de tratamiento como su aplicación en panificación.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es evaluar el efecto del empleo de harina de trigo sarraceno procedente de granos tratados mediante microondas sobre las propiedades sensoriales y nutricionales de los panes sin gluten.

Para abordar este objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el efecto de distintas condiciones de tratamiento microondas aplicado a granos de trigo sarraceno sobre las propiedades de las harinas resultantes.
- Estudiar el efecto de la incorporación de harina tratada con microondas en la reología de las masas, tanto a hidratación constante como tras un ajuste de la hidratación.
- Estudiar el efecto de la incorporación de harina tratada con microondas en la calidad de los panes sin gluten.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para los tratamientos y la elaboración de masas y panes se han empleado granos de trigo sarraceno de origen polaco suministrado por Grupa Producentów Ekologicznych Dolina Gryki Sp ZOO (Miedzylesie, Polonia). Para la elaboración de masas y panes sin gluten se han empleado además harina de arroz NPU de tipo Índica suministrada por Herba Ricemills, S.L.U. (Sevilla, España) y almidón de maíz suministrado por Ferrer Alimentación S.A. (Barcelona, España). También se emplearon otros ingredientes provenientes del mercado local como azúcar (Azucarera Ebro), aceite de girasol (Coosur Premium), sal y levadura para panificación (European, Instant Dry Baker's Yeast). También se empleó hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) K4M suministrada por Dow Chemical Company (Michigan, EE.UU.). Se utilizó agua potable de la red principal de suministro de agua.

3.2. Métodos de análisis

3.2.1. Determinación de la humedad

La determinación de la humedad de las harinas se realizó con el método oficial AACC 44-19 (AACC, 2010). Se secaron 2 g de harina en estufa a 130°C durante 1 hora. La humedad se calculó como la pérdida de peso con relación al peso inicial de la muestra. Para determinar la humedad de los granos se llevó a cabo una modificación de este método, moliendo el grano mediante un molinillo de café y aumentando el tiempo de secado a 2 horas dado el mayor tamaño de partícula de las muestras.

3.2.2. Obtención de la harina tratada

Preparación y acondicionamiento del grano

Se acondicionaron los granos a una humedad del 30% mediante la adición del agua destilada necesaria para lograr dicha humedad. Se mantuvo la mezcla en agitación durante 1 hora para lograr un reparto homogéneo, manteniendo el conjunto en refrigeración hasta su uso, siempre dentro de las 12 a 24 horas posteriores a su acondicionamiento. Antes de proceder a la aplicación del tratamiento microondas se comprobó que su humedad fuera $30 \pm 0.5\%$.

Tratamiento microondas

Los tratamientos se realizaron en un microondas modificado SHARP modelo R342INW (Sakai, Japón), a una potencia de 900W y frecuencia 2450 MHz. Los tratamientos microondas se aplicaron a los granos de trigo sarraceno en un recipiente cilíndrico de PTFE (politetrafluoroetileno o teflón) con pequeñas aberturas en la base que permiten la salida de la humedad durante el tratamiento con el objeto de mantener presión atmosférica durante el mismo. Ese recipiente se mantuvo conectado a un motor externo que le permitía girar a 70 rpm, logrando así un tratamiento térmico homogéneo. Se introdujeron $200,00 \pm 0,05$ g de grano humedecido al 30% y a temperatura ambiente en el sistema. Todos los tratamientos se realizaron con un mismo tiempo de aplicación de radiación microondas, 8 minutos, pero con tres pautados diferentes de aplicación en ciclos de encendido y apagado: ciclo 10 ON – 50 OFF (48 minutos totales), ciclo 20 ON – 40 OFF (24 minutos totales), ciclo 30 ON – 30 OFF (16 minutos totales). Para medir la temperatura máxima alcanzada durante cada tratamiento se introdujeron tiras de temperatura dentro de los recipientes de teflón. También se registró la pérdida de humedad durante el tratamiento mediante la diferencia de la humedad final e inicial. Estos valores se encuentran recogidos en la Tabla 1. Cada tratamiento se realizó por

duplicado. En cada duplicado se mezclaron tres repeticiones de tratamiento microondas para obtener la cantidad de muestra representativa y necesaria para realizar los análisis y las panificaciones.

Tabla 1. Condiciones de los tratamientos microondas.

Nomenclatura	Ciclo (ON/OFF)	Tiempo total (min)	Temperatura máxima (°C)	Pérdida de humedad (%)
TST1	10/50	48	101 ± 3	5 ± 1
TST2	20/40	24	107 ± 7	20 ± 1
TST3	30/30	16	113 ± 3	22 ± 3

Acondicionamiento y molturado de los granos tratados

Previo a la molienda se ajustó la humedad de los granos tratados al 14%. Para ello, según correspondiera, se secaron en una incubadora Memmert ICP260 (Schwabach, Alemania) a 35°C, o fueron sometidos a humectación mediante la adición de agua destilada.

Para la obtención de la harina los granos fueron molidos en un molino de martillos Perten LM 3100 provisto con un tamiz de 1000 µm (Perten Instruments, Suecia). También se realizó la molturación de los granos de trigo sarraceno nativos (sin ningún tipo de tratamiento) obteniéndose con ello la harina de trigo sarraceno nativa empleada en el estudio como muestra de referencia.

3.2.3. Caracterización de harinas

Se realizó una caracterización de las propiedades tecnofuncionales de las harinas que se utilizaron posteriormente para panificación: harina de arroz (ARR), almidón de maíz (AM), harina de trigo sarraceno nativa (TSN) y las tres harinas de trigo sarraceno tratadas por microondas (TST1, TST2 y TST3).

Capacidad de absorción de agua (WAC)

Esta prueba permite cuantificar la capacidad que tiene una harina de retener agua tras aplicarle una fuerza externa. Para determinarla se emplearon tubos Falcon sin faldón de 50 mL, los cuales fueron pesados (PR), y se les añadió 2,00 ± 0,01 g de muestra en materia seca (PM). A continuación, se añadió a cada tubo 20 mL de agua destilada y se agitaron en un vórtex durante 30 segundos, en 3 ciclos con 10 min de reposo entre cada ciclo. Después, se sometieron a una centrifugación 30 minutos a 3000 xg. Tras la centrifugación, los sobrenadantes se desecharon y se pesaron los tubos con la muestra (PT). Se calculó el WAC mediante la ecuación [1] como los gramos de agua retenidos por gramo de harina expresado en materia seca. Esta prueba se realizó por triplicado.

$$[1] \text{ WAC } \left[\frac{g}{g} \right] = \frac{PT - PR - PM}{PM}$$

Índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI) y poder de hinchamiento (SP)

Estas pruebas fueron realizadas para conocer la capacidad de absorción de agua de la harina durante su gelatinización. Se realizó por triplicado para cada muestra empleando tubos Falcon sin faldón de 50 mL con peso controlado (PR), a los cuales se añadieron 2,00 ± 0,01 g de muestra en materia seca (PM). Tras ello, se añadieron 20 mL de agua destilada a cada tubo y se agitaron en un vórtex durante 30 segundos. Se introdujeron en un baño de agua hirviendo durante 15 min. Tras su enfriamiento, se centrifugaron 10 min a 3000 xg y el sobrenadante se vertió sobre cápsulas de metal pesadas previamente (PC). Estas fueron introducidas en una estufa a 110°C durante 24 horas, tras las cuales, se pesaron con el residuo seco soluble (PSL). Los precipitados obtenidos en la centrifugación se pesaron en sus respectivos tubos (PS). Los índices se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$[2] \text{ WAI } \left[\frac{g}{g} \right] = \frac{(PS - PR)}{PM}$$

$$[3] \text{ WSI } \left[\frac{g}{100 g} \right] = 100 \cdot \frac{PSL - PC}{PM}$$

$$[4] \text{ SP } \left[\frac{g}{g} \right] = \frac{PS - PR}{PM - (PSL - PC)}$$

Actividad emulsionante y estabilidad de la emulsión (EA y ES)

Esta prueba permite conocer la capacidad de formar emulsiones que tiene la harina y la estabilidad de las mismas. Se emplearon 7,00 ± 0,01 g de harina en materia seca a los que se añadieron 100 mL de agua destilada y 100 mL de aceite de maíz. El conjunto se mezcló en un homogeneizador Ultra-Turrax, modelo T25 digital de la marca IKA (Staufen, Alemania) a 10000 rpm durante 1 min. La mezcla obtenida se repartió en 4 tubos Falcon sin faldón de 50 mL, añadiendo 45 mL de mezcla a cada uno (VT). Estos se centrifugaron 5 min a 1300 xg y se midió el volumen ocupado por la emulsión (VE₁). Después, aquellas muestras que formaron emulsión se calentaron en un baño a 80°C durante 30 min, y una vez frías, se centrifugaron en las mismas condiciones anotando el volumen de la emulsión obtenida (VE₈₀). Esta prueba se realizó una vez. Con los datos obtenidos se calculó EA y ES mediante las siguientes ecuaciones:

$$[5] \text{ EA } (\%) = 100 \cdot \frac{VE_1}{VT}$$

$$[6] \text{ ES } (\%) = 100 \cdot \frac{VE_{80}}{VT}$$

Capacidad de formación de espuma (FC) y estabilidad de la espuma (FS)

Esta prueba cuantifica la capacidad que tiene una harina para formar espuma y la estabilidad de dicha espuma. Fue realizada por duplicado, empleando $2,00 \pm 0,01$ g de harina en materia seca que fueron añadidos a una probeta con 50 mL de agua destilada. A continuación, se cubrió la probeta con varias capas de Parafilm® y se agitó de forma manual a ritmo constante durante 5 min. Tras ello, se midió el volumen de la espuma (VE_0). Se dejó pasar una hora y se volvió a medir el volumen de espuma (VE_{60}). Los parámetros FC y FS se calcularon empleando las ecuaciones siguientes:

$$[7] FC (mL) = VE_0$$

$$[8] FS (\%) = \frac{VE_{60}}{VE_0} \cdot 100$$

Propiedades de empastado

Las propiedades de empastado se realizaron empleando un Rapid Visco Analyser (RVA) modelo 4500 (Perten Instruments, Australia) utilizando la metodología identificada como Standard 1 del método oficial 76-21.02 (AACC, 2010). Cada muestra se analizó por duplicado. Los parámetros obtenidos en este ensayo fueron la temperatura de empastado (PT, *pasting temperature*), que se conoce como la temperatura a la cual comienza el hinchamiento y gelatinización de los gránulos de almidón; la viscosidad máxima o de pico (PV, *peak viscosity*), que representa la viscosidad máxima en la etapa de calentamiento; el tiempo de pico (Pt, *peak time*) siendo éste el tiempo en el que se produce la PV; la viscosidad de caída (TV, *through viscosity*) calculada como la viscosidad mínima durante la meseta a 95°C; la estabilidad (BV, *breakdown viscosity*) que es la diferencia entre la PV y la TV; la viscosidad final (FV, *final viscosity*), que representa el valor de la viscosidad al final del ciclo aplicado, y la retrogradación (SV, *setback viscosity*) que es la diferencia entre FV y TV.

3.2.4. Reología de masas

Preparación de las masas

Para el estudio reológico se prepararon las formulaciones recogidas en la Tabla 2. Para la elaboración de las masas se empleó la siguiente formulación, referida a 100 g de harina: 5% azúcar, 1.5% de sal, 2% de HPMC, y 6% de aceite de girasol. La cantidad de agua se fijó primeramente en un 90% para todas las masas y posteriormente se adaptó para conseguir la misma consistencia que la masa elaborada con la harina nativa de trigo sarraceno (PN) (ver Tabla 2). No se empleó levadura para que la masa no fermentase durante el proceso de medición.

Tabla 2. Formulaciones utilizadas para el estudio reológico de las masas y para la elaboración de los panes.

Nomenclatura	Formulación (g/100g mezcla)			Hidratación masa (g H ₂ O/100g mezcla)		
	Trigo Sarraceno		Arroz	Almidón maíz	Constante	Ajustada
	Muestra	Adicción				
PC	-	-	80	20	90	80
PN	TSN	50	30	20	90	90
PT1	TST1	50	30	20	90	105
PT2	TST2	50	30	20	90	110
PT3	TST3	50	30	20	90	110

PC: pan control; PN: masa o pan elaborado con harina de trigo sarraceno nativa; PT1, PT2 y PT3: masa o pan elaborado con harina de trigo sarraceno tratada con ciclo 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente; TSN: harina de trigo sarraceno nativa; TST1, TST2 y TST3: harinas de trigo sarraceno tratadas con microondas en ciclos 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente.

El amasado se realizó con una panificadora Auto Bakery (Funaj, China) provista de una hélice, a dos velocidades de giro durante 10 minutos. El primer minuto, a velocidad lenta, se añadió el agua a los sólidos. Después se aumentó la velocidad y en el minuto 3 se añadió el aceite. Finalizado el tiempo de amasado, se repartió la masa en 5 recipientes herméticos, y se sometió a un proceso de reposo de 10 minutos para permitir su relajación antes de comenzar los ensayos reológicos.

Estudio reológico de las masas

Se empleó un reómetro Kinexus Pro + (Malvern Instruments Ltd, Malve, Reino Unido) con una geometría de placas paralelas de 40 mm de diámetro de acero inoxidable y de superficie serrada, que previene el deslizamiento de la masa. La separación entre las placas se estableció en 1 mm. Los ensayos de reología de las masas se realizaron sobre las cinco masas (PC, PN, PT1, PT2 y PT3) en dos condiciones diferentes: a hidratación constante y a consistencia constante (hidratación adaptada). Se realizaron ensayos dinámicos oscilatorios de barrido de deformación y de frecuencias y de deformación o relajación (*creep-recovery*) para caracterizar las masas. Todos los ensayos se realizaron a temperatura de 25°C y por duplicado.

El ensayo de barrido de deformación se llevó a cabo dentro del rango de 0,01 a 1000 % de deformación a una frecuencia constante de 1 Hz. El resultado de este ensayo permitió conocer el esfuerzo máximo (T_{max}) que es capaz de soportar la muestra previo a la ruptura de su estructura, estableciéndose la región viscoelástica lineal (LVR).

Se realizaron barridos de frecuencias de 10 a 1 Hz en la LVR a una deformación constante de 0,05 %. Los resultados obtenidos se ajustaron a las ecuaciones descritas por Ronda et al. (2014):

$$[9] \quad G'(\omega) = G'_1 \cdot \omega^a$$

$$[10] G''(\omega) = G''_1 \cdot \omega^b$$

$$[11] \tan \delta(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \left(\frac{G''}{G'} \right)_1 \cdot \omega^{b-a} = (\tan \delta)_1 \cdot \omega^c$$

Los coeficientes G'_1 , G''_1 y $(\tan \delta)_1$ representan los módulos elástico y viscoso, y la tangente de pérdidas a la frecuencia de 1 Hz, respectivamente. Los parámetros “a”, “b” y “c” representan las constantes experimentales que cuantifican el grado de dependencia de estos módulos y de la tangente de pérdidas con la frecuencia angular (Hz). El módulo complejo, G^*_1 , se calculó como:

$$[12] G^*_1 = (G'^2_1 + G''^2_1)^{\frac{1}{2}}$$

Los ensayos *creep-recovery* se realizaron aplicando una tensión de cizallamiento fuera de la región viscoelástica lineal (OLVR). Se usó una tensión de cizallamiento constante de 50 Pa durante 60 s. A continuación, se retiró la carga y se dejó que la muestra se recuperase durante 180 s. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo de Burgers de 4 parámetros (Ronda et al., 2014):

$$[13] J_c(t) = J_{0c} + J_{1c} \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{\lambda_{1c}} \right) \right) + \frac{t}{\mu_0}$$

En la ecuación, $J_c(t)$ es la capacitancia mecánica, J_{0c} es la capacitancia elástica instantánea en la zona de creep, J_{1c} es la capacitancia elástica retardada en la zona de creep, λ_{1c} hace referencia al tiempo de retardo, y μ_0 proporciona información sobre la viscosidad estacionaria.

Los resultados obtenidos en la fase de recuperación (recovery) se ajustaron al modelo de Burgers; en este caso, las ecuaciones sólo constan de parámetros que describen la respuesta elástica después de la eliminación del esfuerzo de cizallamiento debido a que no hay flujo viscoso en la fase de recuperación. Los resultados obtenidos se ajustaron al modelo de Burgers de 3 parámetros:

$$[14] J_r(t) = J_{max} - J_{0r} - J_{1r} \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{\lambda_{1r}} \right) \right)$$

donde J_{max} es el máximo valor de capacitancia mecánica obtenida al final de la zona de creep y J_{0r} , J_{1r} , y λ_{1r} representan las mismas variables que en la ecuación anterior pero referidas a la fase de recuperación. Se calculó además el porcentaje de recuperación como $((J_{max} - J_{min})/J_{max})$, entendiéndose por J_{min} el mínimo valor de capacitancia mecánica obtenido en la zona de recovery.

3.2.5. Caracterización de los panes

Preparación de los panes

Las masas para elaborar los panes se realizaron en una amasadora Kitchen-aid professional (KPM5). La proporción de las distintas harinas utilizadas, así como la hidratación, se encuentran recogidas en la Tabla 2. En todos los casos se empleó la hidratación adaptada. Para su elaboración se empleó la misma formulación indicada con anterioridad para la elaboración de las masas, pero añadiendo 3 g de levadura por cada 100 g de harina.

En primer lugar, se mezclaron las harinas (300 g mezcla) con 15 g azúcar, 4,5 g de sal y 6 g de HPMC. A continuación, se añadió el agua correspondiente con la levadura suspendida en ella, mezclando el conjunto durante 2 minutos. Tras ello, se añadió el aceite y se amasó el conjunto durante 8 minutos. Se consiguieron masas a una temperatura aproximada de 25°C. Se repartió la masa en 3 moldes de aluminio, con 160 g de masa cada uno. Los moldes se introdujeron en una incubadora Memmert HPP 260 eco (Schwabach, Alemania) durante 50 minutos, a 32°C y una humedad relativa del 85%. A continuación, se hornearon las muestras en un horno Sveba Dahlen S200 (Fristad, Suecia) a 170°C durante 20 min. Finalizado el tiempo de horneado, los panes se dejaron enfriar durante 1 hora, desmoldándose a los 40 minutos, para posteriormente realizar las mediciones de sus propiedades físicas.

Propiedades físicas de los panes

A todos los panes elaborados se les midió la pérdida de peso, el volumen específico y el color de la corteza. De cada panificación se seleccionaron dos panes, a los cuales se cortaron las dos rebanadas centrales a 2 cm de espesor. Sobre estas rebanadas se midió el color y la textura de la miga. El pan restante se guardó en refrigeración a 4 ± 2 °C para medir la textura de la miga a los 7 días y así cuantificar el grado de envejecimiento del pan con el tiempo.

Se evaluó la pérdida de peso en el horneado mediante la diferencia entre el peso empleado de masa para cada elaboración (160 g) y el peso de cada pan, establecido después de una hora de enfriamiento tras el horneado. El volumen específico se midió mediante un escáner 3D con tecnología láser Volscan Profiler VSP600 (Godalming, Reino Unido).

Para la medición del color se empleó un colorímetro PCE-CSM5 (Tobarra, Albacete) y el software CQCS3, fijando las condiciones de iluminante patrón D65 y Observador 10°C. Se realizó la medición del color de la corteza del pan en cinco puntos distintos y

el color de la miga tomando un punto a cada lado de la rebanada. Los datos obtenidos se expresaron en las coordenadas del sistema CIE L*, a*, b* y CIE L*, C* y h.

La textura se midió con un texturómetro universal TA-XT2 de Stable Microsystems (Godalming, Reino Unido), mediante el cual se realizaron ensayos TPA (Análisis de perfil de textura) de doble compresión. Este ensayo fue realizado sobre el centro de cada rebanada de 20 mm de grosor aplicando una deformación en compresión del 50% con una sonda cilíndrica P/20 de 20 mm de diámetro que se movía a 1 mm/s y con un tiempo de espera entre compresiones de 30 s. Los ensayos se repitieron tras 7 días de almacenamiento de los panes en las condiciones ya mencionadas, evaluándose el incremento de la dureza de la miga de los panes.

Se tomaron fotografías de los dos panes elegidos en cada elaboración y de las rebanadas de los mismos, empleando iluminación artificial de luz blanca sobre fondo blanco con escala, utilizando una cámara Canon IXUS 285 HS.

3.2.6. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de los resultados con el programa Statgraphics Centurion XVIII (Statpoint Technologies Inc.). Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza simple (ANOVA simple), utilizando el test LSD de Fisher ($p < 0,05$) para la comparación de las medias.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las harinas

4.1.1. Propiedades funcionales

Los resultados obtenidos en la realización de las propiedades funcionales de las harinas estudiadas se recogen en la Tabla 3.

La **capacidad de absorción de agua** (WAC) se define como la capacidad que tiene la harina de absorber y retener agua después de haberse sometido a una centrifugación que origina la separación forzada de las dos fases (Gani et al., 2017). Las harinas nativas presentaron diferencias en su capacidad de absorción de agua, siendo mayor la del arroz, seguida por el trigo sarraceno y el almidón de maíz. En cuanto al efecto del tratamiento microondas, se observó que éste produjo un aumento significativo ($p < 0,05$) en esta propiedad de hasta un 13% para la muestra TST3. Sharanagat et al. (2019) observaron también un aumento del WAC debido al tratamiento microondas en harina de sorgo. El incremento de la capacidad de absorción de agua se ha atribuido al aumento en la proporción de almidón dañado como consecuencia de las altas

temperaturas alcanzadas en el tratamiento MW (Sharanagat et al., 2019; Villanueva et al., 2018b).

Tabla 3. Propiedades funcionales y de empastado de las harinas nativas y tratadas con microondas.

	ARR	AM	TSN	TST1	TST2	TST3	SE
Propiedades funcionales							
WAC (g/g)	1.30 c	0.99 a	1.22 b	1.76 d	1.95 e	1.99 e	0.02
WAI (g/g)	13.2 d	12.6 c	10.9 a	10.9 a	11.5 b	11.6 b	0.1
WSI (g/100g)	1.0 a	0.8 a	4.2 c	4.3 c	4.1 c	3.5 b	0.1
SP (g/g)	12.7 d	12.8 d	11.4 ab	11.4 a	11.9 bc	12.1 c	0.2
EA (%)	0.0 a	0.0 a	53.6 d	16.5 c	5.5 b	4.5 b	0.5
ES (%)	NA	NA	11.0 b	0.0 a	0.0 a	0.0 a	0.2
FC (ml)	2.0 b	0.0 a	4.5 c	4.0 c	2.0 b	2.0 b	0.5
FS (%)	0 a	NA	32.5 b	0 a	0 a	0 a	4
Propiedades de empastado							
PT (°C)	82.1 b	75.5 a	74.5 a	92 d	90 c	89.7 c	0.5
PV (mPa-s)	4046 d	4168 e	2240 c	1013 a	1205 b	1180 b	31
Pt (min)	5.60 b	5.00 a	6.64 c	7.27 d	7.27 d	7.27 d	0.03
TV (mPa-s)	2736 d	2248 c	2121 c	1013 a	1205 b	1179 b	49
BV (mPa-s)	1310 c	1920 d	119 b	0 a	1 a	1 a	29
FV (mPa-s)	6328 e	3871 c	4661 d	1526 a	1945 b	1866 b	49
SV (mPa-s)	3591 e	1623 c	2540 d	513 a	740 b	687 b	49

ARR: harina de arroz, AM: almidón de maíz, TSN: harina de trigo sarraceno nativo, TST1, TST2 y TST3: harinas de trigo sarraceno tratadas con microondas en ciclos 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente. WAC: capacidad de absorción de agua, WAI: índice de absorción de agua, WSI: índice de solubilidad en agua, SP: poder de hinchamiento, EA: actividad emulsionante, ES: estabilidad de emulsión, FC: capacidad de formación de espuma y FS: estabilidad de la espuma. NA: No aplica. PT: temperatura de empastado, PV: viscosidad pico, Pt: tiempo de pico, TV: viscosidad de caída, BV: estabilidad y FV: viscosidad final. SE: Error estándar agrupado obtenido de ANOVA. Los valores medios con letras minúsculas diferentes para el mismo parámetro implican diferencias significativas entre las medias ($p < 0,05$).

El **índice de absorción de agua** (WAI) define el volumen ocupado por la muestra tras hincharse en exceso de agua, lo cual se corresponde con el volumen de gel formado (Jogihalli et al., 2017). El **índice de solubilidad en agua** (WSI) indica la cantidad de sólidos liberados del gránulo de almidón a la disolución durante la gelatinización del mismo (Yousf et al., 2017). El **poder de hinchamiento** (SP) hace referencia a la capacidad de interacción entre las cadenas de almidón mediante enlaces de hidrógeno, dentro de la estructura amorfa y cristalina del gránulo de almidón (Gani et al., 2017). En el análisis de los resultados obtenidos en las harinas nativas (ARR, AM y TSN) se observaron diferencias significativas para el WAI; en cambio, en los otros dos parámetros analizados (WSI y SP), las muestras ARR y AM no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$). Como indicaron Gani et al. (2017) y Villanueva et al. (2018b), esta diferencia entre muestras sin tratar se puede atribuir a la variación

del contenido de amilosa y su peso molecular, y las fuerzas de unión entre amilosa y amilopectina. Respecto a las harinas tratadas, se observaron resultados similares para las muestras TSN y TST1, los cuales, difirieron de manera significativa ($p < 0,05$) respecto a las otras dos muestras tratadas (TST2 y TST3). Para los parámetros WAI y SP, las muestras TSN y TST1 presentaron valores inferiores que las TST2 y TST3, las cuales mostraron un índice de absorción de agua y poder de hinchamiento mayores. Esto puede ser debido a que, a mayor temperatura de tratamiento, se produce una mayor ruptura de puentes de hidrógeno intermoleculares en las zonas amorfas, lo que permite una absorción irreversible y progresiva del agua (Hernández-Medina, 2008).

Por el contrario, en la variable WSI, las harinas TSN, TST1 y TST2 mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) con respecto a la TST3, que presentó un índice de solubilidad en agua inferior. Este resultado difiere con el obtenido por Bhat et al. (2016), que observaron en sus resultados un aumento del WSI al aumentar la temperatura de tostado de harina de trigo integral acondicionada a un 14% de humedad, desde 50 a 90°C. Este aumento lo atribuyeron a la ruptura de enlaces glucosídicos del almidón y la disminución de puentes de hidrógeno entre las cadenas de amilosa y amilopectina. La distinta naturaleza del tratamiento térmico empleado por estos autores, el bajo contenido de humedad de sus harinas, así como las diferencias en la matriz sometida a tratamiento, podrían ser las responsables de las diferencias observadas en este parámetro con respecto a las obtenidas en el presente estudio.

En cuanto a las propiedades emulsionantes, la **actividad emulsionante** (EA) es la capacidad que tiene una harina de formar emulsiones, viéndose influenciada por la proporción de proteínas que contiene la misma. Por su parte, la **estabilidad de emulsión** (ES) indica la capacidad de esas proteínas para mantener dicha emulsión tras someterla a un proceso de calentamiento y centrifugación (Kaur y Singh, 2005). Las muestras ARR y AM no presentaron capacidad emulsionante alguna; en cambio, la harina TSN sí que presentó esta propiedad, aunque con poca estabilidad tras someterla a un tratamiento térmico a 80°C. La nula capacidad emulsionante de las muestras ARR y AM pudo estar asociada a un bajo contenido en proteína de las matrices, imposibilitando así la formación de emulsiones. Con el tratamiento microondas se observó una disminución de la capacidad de formar emulsiones de las harinas tratadas, perdiéndose completamente la estabilidad térmica de las emulsiones formadas. Los tratamientos microondas que alcanzaron mayor temperatura dieron lugar a harinas con una menor EA, lo cual pudo deberse a un mayor grado de desnaturalización proteica de las muestras, disminuyendo la capacidad de estabilizar la interfase agua-aceite (Bhat et al., 2016). Por tanto, el contenido proteico y la previsible desnaturalización de las

proteínas tras el tratamiento microondas pudieron influir de forma notoria en los resultados obtenidos.

La **capacidad de formación de espuma** (FC) refleja la capacidad de las proteínas de la harina para crear una película interfacial en torno a las burbujas de aire, mientras que la **estabilidad de la espuma** (FS) es la capacidad de mantener dicha película evitando la entrada de aire y la coalescencia de las burbujas (Bhinder et al., 2020). Estas propiedades se ven influenciadas por el contenido en proteínas, ya que, a mayor concentración proteica, mayor interacción proteína-proteína, aumentando la viscosidad y facilitando la formación de la película en la interfase agua-aire (Kaur y Singh, 2005). En los resultados obtenidos de las harinas nativas, fue la muestra TSN la que mostró mayor FC, seguida de ARR. Sin embargo, el almidón de maíz, al no contener proteína, presentó una capacidad espumante nula. La harina nativa de trigo sarraceno fue la única en presentar estabilidad de la espuma formada. Respecto a las harinas tratadas, la muestra TST1 no vio afectada significativamente su capacidad de formación de espuma, aunque perdió la estabilidad de la misma. Las otras dos muestras tratadas (TST2 y TST3) mostraron una disminución cercana al 50% de la capacidad de formación de espuma con respecto a la harina nativa, así como pérdida total de la estabilidad. La justificación de los resultados obtenidos guarda relación con la de la capacidad y estabilidad emulsionante, ya que estas pruebas se asocian al contenido proteico y, de esta forma, a las interacciones entre proteínas que participan en la viscosidad de la suspensión de harina, como se ha mencionado anteriormente (Kaur y Singh, 2005). Los tratamientos que alcanzaron mayor temperatura ocasionaron una mayor disminución de las propiedades emulsionantes y espumantes de las harinas previsiblemente debido a fenómenos de desnaturalización proteica.

4.1.2. Propiedades de empastado

Las propiedades de empastado nos permiten predecir lo que ocurre a nivel molecular en los gránulos de almidón cuando son sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento en exceso de agua. Este análisis muestra el comportamiento de las harinas durante el cocinado (Villanueva et al., 2018b). Los perfiles de empastado de las harinas se muestran en la Figura 1, mientras que los datos correspondientes a los parámetros de empastado quedan recogidos en la Tabla 3. Los perfiles de empastado fueron sensiblemente diferentes para todas las muestras, excepto para TST2 y TST3, cuyos parámetros característicos no presentaron diferencias significativas entre ambas harinas.

La **temperatura de empastado** (PT) fue similar para el almidón de maíz y de trigo sarraceno nativa, y mayor para la harina de arroz. Esta temperatura aumentó con el tratamiento microondas, presentando la harina TST1 el máximo incremento (+17°C) respecto a la TSN. Villanueva et al. (2018b) y Nadiah et al. (2015) también observaron incrementos en los valores de PT para muestras de almidón de patata, arroz y tapioca sometidas a tratamiento microondas. Estos autores asociaron este incremento a la reordenación estructural del gránulo de almidón ocurrida durante el tratamiento microondas. El incremento del grado de empaquetamiento pudo suponer el aumento observado en la temperatura requerida para la desintegración estructural del gránulo. En el caso de la **viscosidad de pico** (PV), fueron las muestras sin tratar las que obtuvieron valores más altos, particularmente el almidón de maíz y la harina de arroz. De las muestras sometidas a tratamiento, la que presentó menor viscosidad de pico fue la muestra TST1, seguida de TST2 y TST3 que no presentaron diferencias significativas entre sí ($p>0,05$). Varatharajan et al. (2010) observaron la disminución del PV en almidón de patata debido al tratamiento microondas, lo cual atribuyeron a una lixiviación de la amilosa. Villanueva, et al. (2018a) también informaron de este efecto en sus resultados al tratar harina de arroz con microondas.

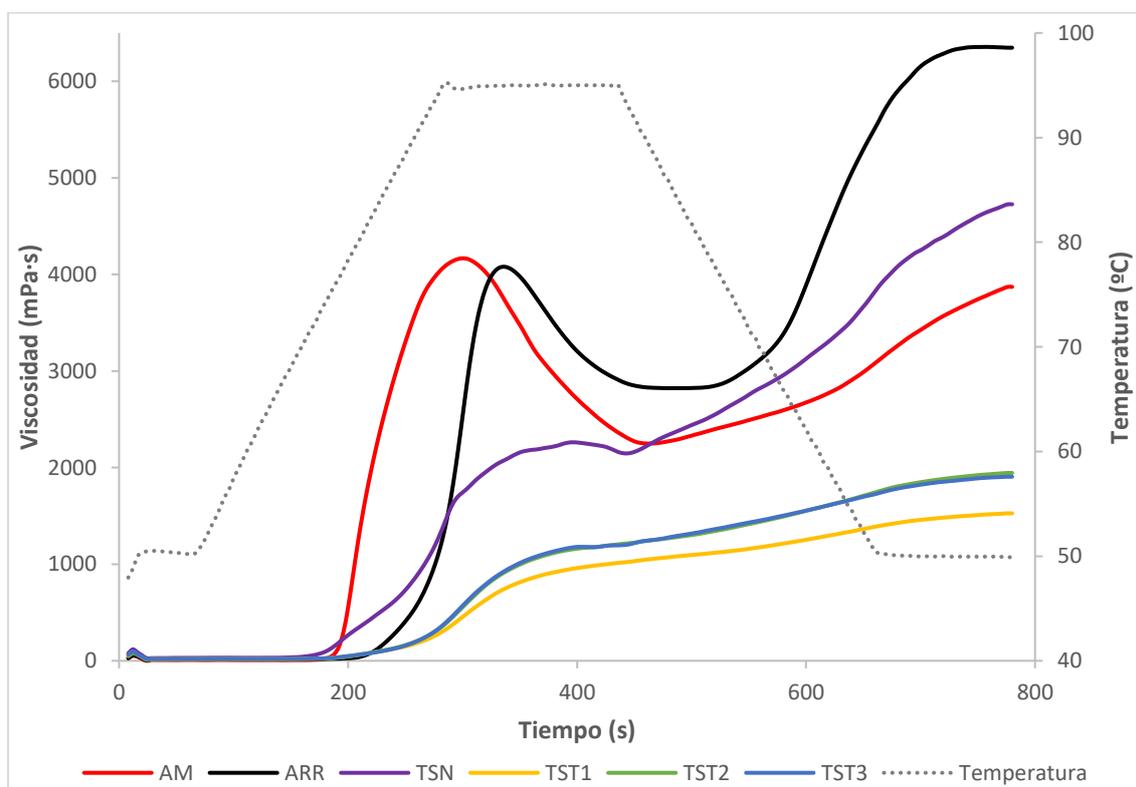


Figura 1. Curvas de empastado de las muestras de harina de arroz (ARR), almidón de maíz (AM), harina de trigo sarraceno nativa (TSN) y tratadas al microondas con ciclo 10/50 (TST1), (TST2) y ciclo 30/30 (TST3). En el eje secundario se representa el perfil de temperatura.

La **viscosidad final** (FV) mostró su máximo valor para la muestra ARR, seguida de las otras dos muestras nativas. En cambio, las harinas tratadas mostraron un valor significativamente ($p < 0,05$) inferior, siendo la TST1 la que mostró el menor resultado de la FV. Esta disminución en muestras tratadas ya fue expuesta por Sharanagat et al. (2019), explicando dicho efecto por el acortamiento de las cadenas de amilosa y amilopectina, así como por la disminución de la polimerización de estas cadenas debido al tratamiento.

La **retrogradación** (SV) siguió la misma tendencia que la FV, marcada por el descenso de este parámetro para las muestras tratadas. Algunos autores asocian este hecho a las consecuencias del tratamiento microondas, de forma que éste provoca la lixiviación de la amilosa del gránulo de almidón, y una disminución en la retrogradación de la misma, incrementando las potenciales aplicaciones de la harina resultante (Sharanagat et al., 2019).

La **estabilidad** (BV) presentó un descenso significativo en las muestras tratadas respecto a la nativa de trigo sarraceno. Esta reducción indica que el empleo de harina tratada de trigo sarraceno aumenta la estabilidad de la masa frente al calentamiento y la cizalla.

4.2. Reología de masas

4.2.1. Reología de masas a hidratación constante

Los resultados obtenidos en los ensayos de reología de las masas a hidratación constante se recogen en la Tabla 4. En el Anexo I se encuentra la representación gráfica de los ensayos realizados.

El **ensayo de barrido de deformación** permitió establecer la región viscoelástica lineal (LVR). La masa de trigo sarraceno y de arroz no presentaron diferencias significativas en cuanto al τ_{max} , mientras que para todas las masas con harina tratada se triplicó. Esto indica que el tratamiento ejerció un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el esfuerzo máximo soportado por la masa previo a una deformación irreversible. El punto de cruce siguió la misma tendencia que la observada para el esfuerzo máximo. Entre las muestras tratadas, PT1 presentó valores algo inferiores de τ_{max} y punto de cruce que el resto.

Tabla 4. Comportamiento reológico de las masas a hidratación constante del 90%.

Parámetros	PC	PN	PT1	PT2	PT3	SE
Barrido de frecuencias						
G₁' (Pa)	877 a	2145 a	7812 b	9876 c	9909 c	507
a	0,370 c	0,241 b	0,233 ab	0,224 a	0,221 a	0,004
G₁'' (Pa)	595 a	999 a	3248 b	4040 c	3981 c	198
b	0,405 c	0,259 b	0,232 ab	0,210 a	0,216 a	0,010
(tan δ)₁	0,678 c	0,466 b	0,416 a	0,409 a	0,402 a	0,109
c	0,035 c	0,018 bc	-0,001 ab	-0,015 a	-0,006 ab	0,008
G₁* (Pa)	1060 a	2366 a	8460 b	10670 c	10679 c	544
Barrido de deformación						
(G' = G'') (Pa)	12 a	60 a	189 b	281 c	259 c	14
τ_{max} (Pa)	3 a	4 a	20 b	33 c	31 c	1
Creep-recovery						
J_{0c} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	ND	12,5 b	2,3 a	1,6 a	1,9 a	0,4
J_{1c} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	66 b	60 b	8 a	4 a	5 a	3
λ_{1c} (s)	0,2 a	3,9 b	6,5 c	5,5 d	6,1 d	0,2
μ₀ (Pa·s)	186 a	2362 a	38733 b	74936 c	62616 d	2986
J_{max} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	3295 c	323 b	25 a	14 a	16 a	31
J_{0r} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	16 c	9 b	2 a	2 a	2 a	1
J_{1r} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	86 c	48 b	9 a	4 a	5 a	2
λ_{1r} (s)	2 a	7 b	10 c	16 d	18 d	1
Recovery (%)	3 a	19 b	43 c	51 d	48 e	1

G₁': Módulo elástico; G₁'': Módulo viscoso; (tan δ)₁: Tangente de pérdidas; a, b, c: Grado de variación de las propiedades viscoelásticas con la frecuencia; G₁*: Módulo complejo; G'=G'': Esfuerzo en el punto de cruce; τ_{max}: esfuerzo máximo; J_{0c}: capacitancia instantánea en la zona de creep; J_{1c}: capacitancia retardada en la zona de creep; λ_{1c}: tiempo de retardo en la zona de creep; μ₀: viscosidad estacionaria; J_{max}: máximo valor de capacitancia mecánica obtenida al final de la zona de creep; J_{0r}: capacitancia instantánea en la zona de recovery; J_{1r}: capacitancia retardada en la zona de recovery; λ_{1r}: tiempo de retardo en la zona de recovery; Recovery (%): capacidad de recuperación. PC: masa/pan control; PN: masa/pan elaborado con harina de trigo sarraceno nativa; PT1, PT2 y PT3: masa/ pan elaborado con harina de trigo sarraceno tratada con ciclo 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente SE: Error estándar agrupado obtenido del ANOVA. Los valores medios con letras minúsculas diferentes para el mismo parámetro implican diferencias significativas entre las medias (p <0,05); ND: No detectable.

En el **ensayo de barrido de frecuencias** se observó un efecto significativo del tratamiento microondas en los parámetros reológicos. Las masas elaboradas con harinas tratadas (PT1, PT2, PT3) presentaron una consistencia mayor que las masas elaboradas con harina sin tratar tanto de arroz, o control (PC), como de trigo sarraceno (PN). Esto se reflejó en un incremento de los módulos elástico, viscoso y complejo como consecuencia del tratamiento. Las masas PT2 y PT3 presentaron los módulos más altos, sin diferencias estadísticamente significativas entre ellas. La tangente de pérdida, (tan δ)₁, fue menor para la masa PN que PC, y se redujo aún más en el caso de las masas elaboradas con harinas tratadas hasta en un 16%. La evolución de este parámetro implicó un refuerzo del comportamiento elástico de las masas de harina tratada por microondas. Los parámetros “a” y “b”, que indican la dependencia de los módulos

viscoelásticos con la frecuencia angular, siguieron la misma tendencia, reduciéndose dicha dependencia con la inclusión de trigo sarraceno, que presentó una mayor reducción para las muestras tratadas PT2 y PT3. El comportamiento observado en las propiedades viscoelásticas de las masas se ha asociado al incremento del almidón dañado como consecuencia del tratamiento con microondas que, además de originar un aumento de la capacidad de absorción de agua de las harinas, provoca un incremento de la consistencia de las masas (Villanueva et al., 2018b). El aumento de las interacciones entre los gránulos de almidón y las proteínas debido al tratamiento, también se ha postulado como argumento para justificar el fortalecimiento de la masa, asociado a un aumento de los módulos elástico y viscoso, y una disminución de la tangente de pérdida (Puncha-arnon y Uttapap, 2013; Villanueva et al., 2018b).

Las curvas de los **ensayos creep-recovery** (Anexo I) mostraron un comportamiento viscoelástico típico que respondió a la manifestación simultánea de componentes elásticos y viscosos en las masas durante su deformación (Villanueva et al., 2019). Los parámetros obtenidos de ajustar los resultados al modelo de Burgers se recogen en la Tabla 4. La capacitancia instantánea en la zona de deformación o creep (J_{0c}) relativa al esfuerzo aplicado, mostró una disminución significativa para las muestras tratadas, desde $12,5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ en PN hasta $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ para PT2. En el caso de PC, los valores no fueron detectables por el equipo. Durante la recuperación o recovery, J_{0r} (capacitancia instantánea en la zona de recovery) mostró la misma tendencia que J_{0c} , destacando las muestras tratadas por presentar los valores más bajos. La capacitancia retardada en la zona de creep y en la de recovery (J_{1c} y J_{1r}) mostraron también la misma tendencia, destacando las muestras tratadas por presentar los valores más bajos. Esto indica que PT1, PT2 y PT3 sufrieron menor deformación al aplicar un esfuerzo constante a lo largo del tiempo, lo cual se relaciona con una mayor consistencia de las masas debida a la posible estabilidad estructural de la matriz a causa del tratamiento (Villanueva et al., 2019; Skendi et al., 2009). El empleo de harina tratada incrementó los valores del tiempo de retardo (λ_{1c}) y de la viscosidad estacionaria (μ_0), destacando las muestras cuya harina se sometió a mayor temperatura (PT2 y PT3). La misma tendencia se observó en λ_{1r} , ya que esta constante está relacionada con la deformación elástica de la masa. El máximo valor de capacitancia mecánica obtenida al final de la zona de creep, J_{max} , se redujo para las muestras tratadas. Como en el caso de los valores de capacitancia instantánea y retardada, las masas procedentes de las harinas tratadas manifestaron un incremento de su resistencia frente a la deformación al ser masas más consistentes. Por último, la capacidad de recuperación mostró un aumento a medida que se aplicaba un ciclo de tratamiento MW con mayor tiempo de tratamiento y menor

de reposo. Este parámetro está relacionado con la capacidad de recuperación elástica de las masas, por lo que los valores obtenidos concordaron con lo esperado.

4.2.2. Reología de masas a consistencia constante

Los resultados obtenidos en los ensayos de **reología de las masas a consistencia constante** se recogen en la Tabla 5. El Anexo I contiene las curvas reológicas de las muestras tratadas.

Tabla 5. Comportamiento reológico de las masas a consistencia constante.

Parámetros	PC	PN	PT1	PT2	PT3	SE
Barrido de frecuencias						
G₁' (Pa)	2225 a	2145 a	2216 a	2427 a	2388 a	134
a	0,324 c	0,241 a	0,266 b	0,245 a	0,251 a	0,003
G₁'' (Pa)	1302 b	999 a	1084 ab	1098 ab	1111 ab	66
b	0,343 b	0,259 a	0,285 a	0,255 a	0,262 a	0,010
(tan δ)₁	0,585 c	0,466 a	0,489 b	0,453 a	0,465 a	0,005
c	0,019 a	0,018 a	0,018 a	0,010 a	0,011 a	0,010
G₁* (Pa)	2577 a	2366 a	2467 a	2663 a	2634 a	149
Barrido de deformación						
(G' = G'') (Pa)	3 a	11 b	8 b	11 b	9 b	1
τ_{max} (Pa)	6 ab	4 a	8 bc	9 c	9 c	0,5
Creep-recovery						
J_{0c} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	11 ab	12 b	9 a	10 ab	8 a	1
J_{1c} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	62 b	60 b	54 ab	55 ab	49 a	4
λ_{1c} (s)	2,9 a	3,9 b	5,6 c	5,2 c	5,1 c	0,2
μ₀ (Pa·s)	941 a	2362 b	3671 cd	3515 c	4247 d	227
J_{max} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	703 d	323 c	224 b	232 b	196 a	10
J_{0r} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	8 ab	9 b	7 a	8 ab	7 a	1
J_{1r} (10⁻⁴ Pa⁻¹)	52 b	48 ab	45 a	48 ab	45 a	2
λ_{1r} (s)	6 a	7 a	12 b	11 b	10 b	1
Recovery (%)	9 a	19 b	24 c	26 c	28 d	1

G₁': Módulo elástico; G₁'': Módulo viscoso; (tan δ)₁: Tangente de pérdidas; a, b, c: Grado de variación de las propiedades viscoelásticas con la frecuencia; G₁*: Módulo complejo; G'=G'': Esfuerzo en el punto de cruce; τ_{max}: esfuerzo máximo; J_{0c}: capacitancia instantánea en la zona de creep; J_{1c}: capacitancia retardada en la zona de creep; λ_{1c}: tiempo de retardo en la zona de creep; μ₀: viscosidad estacionaria; J_{max}: máximo valor de capacitancia mecánica obtenida al final de la zona de creep; J_{0r}: capacitancia instantánea en la zona de recovery; J_{1r}: capacitancia retardada en la zona de recovery; λ_{1r}: tiempo de retardo en la zona de recovery; Recovery (%): capacidad de recuperación. PC: pan control; PN: pan elaborado con harina de trigo sarraceno nativa; PT1, PT2 y PT3: pan elaborado con harina de trigo sarraceno tratada con ciclo 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente SE: Error estándar agrupado obtenido del ANOVA. Los valores medios con letras minúsculas diferentes para el mismo parámetro implican diferencias significativas entre las medias (p <0,05).

Con el objeto de caracterizar el comportamiento reológico de las masas a consistencia constante, se empleó el **ensayo de barrido de frecuencias** para ajustar la hidratación de las masas de manera que el módulo complejo G*₁ no presentara diferencias

estadísticamente significativas entre las muestras. A pesar de que la consistencia de las masas en términos de G_1^* , fue idéntica, los parámetros reológicos obtenidos tras el ensayo de barrido de frecuencias presentaron algunas diferencias en las muestras estudiadas. Así, el módulo viscoso presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre PC y PN, pero no con el resto de las muestras analizadas, aunque la dependencia de este módulo con la frecuencia (parámetro “b”) fue menor para todas las muestras que incluyeron trigo sarraceno en su formulación. Por el contrario, el módulo elástico fue constante en todas las masas estudiadas, aunque el parámetro “a”, que indica la dependencia con la frecuencia, presentó un mayor valor en el caso de la masa PC, seguida de PT1 y después del grupo PN, PT2 y PT3. La misma relación se observó en la tangente de pérdida.

Las diferencias entre los perfiles reológicos de las muestras pueden ser consecuencia de diferencias en los patrones de organización molecular debido a las interacciones entre los componentes de la harina. Las interacciones entre el almidón y las proteínas dependen de la estructura molecular de los mismos, el estado de los gránulos y la relación amilosa/amilopectina, la composición de la proteína y del almidón, así como las temperaturas sufridas durante la gelatinización del almidón y la desnaturalización proteica, afectando así a las propiedades reológicas de la masa (Torbica et al, 2010; Ronda et al., 2014). En el caso de las masas elaboradas con las harinas tratadas, el tratamiento microondas podría originar cambios en la conformación molecular de las harinas, que serían responsables de las diferencias observadas en los parámetros reológicos estudiados.

Los **ensayos de barrido de deformación** a consistencia constante, mostraron que, aunque el punto de cruce no presentó diferencias estadísticamente significativas entre las masas con trigo sarraceno nativo y tratado, sí lo hizo el esfuerzo máximo (T_{max}) que se duplicó en todas las muestras tratadas. Esto indica que el tratamiento ocasionó un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el esfuerzo máximo que la masa es capaz de soportar antes de perder su estructura.

Los resultados de los **ensayos creep-recovery** siguieron una tendencia diferente a los obtenidos con hidratación constante. En líneas generales, los parámetros del modelo de Burgers mostraron una clara disminución para las muestras elaboradas con harina tratada (PT1 y PT3). Pese a estas diferencias, también se observó un aumento de la viscosidad estacionaria y de los tiempos de retardo durante el creep y el recovery para las muestras tratadas. El análisis detallado de los resultados obtenidos evidenció diferencias significativas para J_{0c} entre la masa de trigo sarraceno nativa y las elaboradas a partir de TST1 y TST3. En el recovery, J_{0r} , siguió la misma tendencia, pero

esta vez presentando dichas diferencias entre PN y PT1. Ambos parámetros presentaron los valores más bajos para PC y las muestras tratadas. Los parámetros J_{1c} y J_{1r} presentaron también diferencias significativas, destacando las muestras PT1 y PT3 por presentar los valores más bajos, lo cual indica que sufrieron menor deformación. El tiempo de retardo en λ_{1c} mostró los valores más altos en las muestras tratadas, al igual que en λ_{1r} . La viscosidad estacionaria (μ_0) mostró un incremento en PT1, PT2 y PT3, destacando PT1 y PT3 con los valores más altos del total de muestras. Los valores de J_{max} mostraron una disminución significativa para las muestras tratadas, destacando la muestra PT3 con el valor más bajo del total de muestras. La capacidad de recuperación (Recovery) concuerda con el resto de parámetros analizados, ya que se vio aumentada con las muestras tratadas que fueron las más elásticas, destacando PT3 con el valor más alto.

4.3. Caracterización de los panes

Los ensayos de panificación desarrollados con las harinas tratadas a consistencia constante dieron lugar a productos cuyas propiedades físicas (volumen, pérdida de peso, textura y color) se encuentran recogidas en la Tabla 6. Además, en la Figura 2 se muestran imágenes de las secciones lateral y transversal (rebanada central) de los panes elaborados.

Tabla 6. Propiedades físicas de los panes

Propiedad	PC	PN	PT1	PT2	PT3	SE
Pérdida de peso (%)	18.9 a	19.6 b	19.8 b	19.6 b	19.5 ab	0.2
Volumen específico (mL/g)	4.65 c	3.88 a	4.61 bc	3.79 a	4.39 b	0.07
Dureza (N)	0.90 b	1.47 d	0.72 a	1.14 c	0.85 ab	0.0
Elasticidad	0.91 a	0.96 bc	0.96 c	0.95 bc	0.94 b	0.01
Cohesividad	0.64 d	0.58 ab	0.63 cd	0.56 a	0.60 bc	0.01
Masticabilidad (N)	0.55 b	0.82 c	0.46 a	0.61 b	0.57 b	0.03
Resilencia	0.29 c	0.25 ab	0.28 c	0.23 a	0.27 bc	0.01
Δ Dureza a los 7 días (N)	2.6 b	2.4 b	1.1 a	2.9 b	1.0 a	0.3
L^* corteza	68.1 c	57.5 a	59.4 b	57.4 a	58.5 ab	0.5
h corteza	64.7 c	61.3 b	60.3 a	60.4 a	60.6 a	0.1
C^* corteza	34.6 c	31.1 b	31.6 b	30.1 a	31.6 b	0.3
L^* miga	67.9 c	53.6 a	57.9 b	58.3 b	57.7 b	0.4
h miga	83.0 b	64.9 a	64.8 a	64.3 a	65.1 a	0.4
C^* miga	5.6 a	8.1 b	8.9 c	9.4 d	10.6 e	0.1

PC: pan control; PN: pan elaborado con harina de trigo sarraceno nativa; PT1, PT2 y PT3: pan elaborado con harina de trigo sarraceno tratada con ciclo 10/50, 20/40 y 30/30, respectivamente. L^* : luminosidad; C^* : saturación; h : tono. ES: Error estándar agrupado. Los valores con letras minúsculas diferentes para un mismo parámetro indican diferencias significativas entre sus medias ($p < 0.05$).

La **pérdida de peso** sufrida por los panes tras el horneado y enfriado, presentó ligeras diferencias entre las muestras, siendo PC el pan con menor pérdida de peso. Por el

contrario, este parámetro no mostró diferencias significativas entre PN y los panes con tratamiento microondas.

Respecto al **volumen específico**, las muestras tratadas con los ciclos 10/50 y 30/30 (PT1 y PT3) presentaron un incremento del volumen específico, alcanzando en el caso de PT1 el volumen del pan empleado como referencia (PC), y en todo caso mejorando las características del pan elaborado con harina nativa de trigo sarraceno (PN). Sin embargo, la inclusión de harina tratada con el ciclo 20/20, pan PT2, no mostró una diferencia significativa en el volumen respecto a la muestra PN. Otros autores han asociado previamente la mejora del volumen de los panes al efecto del tratamiento microondas en la consistencia de las masas y a la capacidad de las mismas para retener gas durante la fermentación (Marston et al., 2016; Villanueva et al., 2019). La mayor resistencia de la estructura de las masas frente a las deformaciones y esfuerzos, obtenida como consecuencia del tratamiento MW, permitiría un mayor desarrollo del pan durante la fermentación y el horneado, aumentando el volumen del producto final. Por lo general, los consumidores suelen sentirse atraídos por panes con un volumen mayor (Wronkowska et al., 2012), por lo que, el empleo de harinas tratadas en las condiciones de TST1 y TST3 mejoraría la aceptación de los panes elaborados con ellas. Además, cabe destacar que el empleo de trigo sarraceno en la formulación del producto incrementaría el valor nutricional del mismo, gracias al mayor aporte de proteína, antioxidantes, minerales y fibra (Zhu, 2020).

En cuanto a la **textura** de los panes, se observó que aquellos que tuvieron menor volumen, PN y PT2, mostraron los valores de dureza más altos de las muestras analizadas. Por el contrario, los otros dos panes con harina tratada, PT1 y PT3, mostraron valores de dureza ligeramente inferiores a PC, destacando por presentar una miga más blanda y esponjosa que PN. Resultados similares fueron observados por Villanueva et al. (2019) al tratar con microondas harina de arroz mediante ciclos 20/40 durante 8 minutos. Estos autores asociaron la menor dureza a que el incremento de volumen supuso un incremento del aire retenido en la estructura del pan, generando una estructura más aireada y blanda. La inclusión de trigo sarraceno en las formulaciones, independientemente del tratamiento, también aumentó la elasticidad de la miga. No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la masticabilidad de las muestras PT2, PT3 y PC, destacando PT1 por presentar la menor masticabilidad de todas las muestras analizadas. Estos resultados indican que el empleo de harinas tratadas de trigo sarraceno permite obtener panes más blandos y con mayor facilidad de masticación. Se ha asociado una menor dureza y masticabilidad a una mayor percepción de frescura (Wronkowska et. al, 2013) por lo que los resultados obtenidos

permitirían generar esta percepción en los panes elaborados con harinas tratadas (particularmente PT1 y PT3). El pan PT1, aumentó su cohesividad y resiliencia frente a PN hasta alcanzar la de PC, y obteniendo también una miga más blanda, elástica y con menor tendencia a la retrogradación que PC. La muestra PT3 mostró un comportamiento similar. El endurecimiento retardado que presentaron las muestras PT1 y PT3, mostrando un menor incremento de dureza tras el almacenamiento, sugeriría un aumento de la vida útil de los panes, al poder mantener su grado de frescura durante mayor tiempo. El empleo de tratamiento microondas en las condiciones de las muestras PT1 y PT3 podría resultar de gran interés como una mejora de la calidad de los panes sin gluten, al incrementar su volumen, reducir su dureza y aumentar su vida útil.

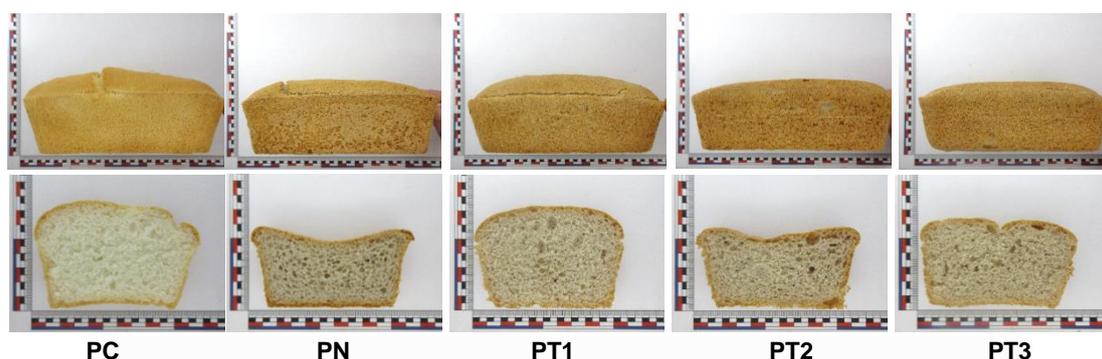


Figura 2. Efecto del uso de harina tratada por microondas con ciclo 10/50 (PT1), ciclo 20/40 (PT2) y ciclo 30/30 (PT3) en la apariencia externa y la estructura de la miga del pan comparado con el pan control (PC) y el pan con trigo sarraceno sin tratar (PN).

Respecto al **color de la corteza**, se vieron ligeras diferencias entre los panes con trigo sarraceno tratado y nativo, resultando destacable la reducción del tono en las muestras tratadas. Todos los panes con trigo sarraceno presentaron cortezas más oscuras, con una tonalidad más rojiza y menor viveza de color que PC. El color de la corteza se debe a distintos procesos que se producen durante el horneado, la caramelización y la reacción de Maillard; por el contrario, el color de la miga, se asocia a los ingredientes empleados (Villanueva et al., 2019).

En cuanto al **color de la miga**, los panes con trigo sarraceno tratado presentaron mayor luminosidad y saturación que el nativo (PN). La saturación fue el único parámetro que varió entre tratamientos, aumentando progresivamente con la aplicación de un ciclo con mayor tiempo de tratamiento y menor de reposo. A medida que aumentó la temperatura de tratamiento, aumentó la saturación de la misma, lo cual puede deberse a un efecto de la temperatura sobre los componentes de la harina. Sharanagat et al. (2019) asoció los cambios de color de las harinas tratadas a la formación de pigmentos marrones en las reacciones de Maillard y caramelización, y a la oxidación térmica de los polifenoles, lo cual, podría ser causa de los cambios de color obtenidos en los panes del presente

trabajo. El tono de la miga de los panes elaborados con trigo sarraceno fue muy diferente a la de PC, adoptando un tono marrón-rojizo frente al blanco característico del pan elaborado con la harina de arroz y el almidón de maíz (PC) (Figura 2).

5. CONCLUSIONES

El tratamiento hidrotérmico asistido con microondas demostró ser efectivo en la modificación de las propiedades tecno-funcionales de las harinas de trigo sarraceno, permitiendo que éstas aumentaran su capacidad de absorción de agua, la temperatura de empastado y la retrogradación de la amilosa tras los procesos de gelatinización y enfriamiento posterior. El incremento en la capacidad de hidratación de las harinas tratadas se constató también mediante el aumento de la cantidad de agua que se necesitó añadir en la formulación del pan para lograr la misma consistencia que la obtenida con una harina de trigo sarraceno sin tratar. El tratamiento de los granos con el ciclo 10/50 permitió obtener una harina de gran interés tecnológico para abordar proceso de panificación sin gluten (TST1), capaz de alcanzar el mismo volumen que el pan control elaborado con harina de arroz y almidón de maíz (PC), pero mejorando su calidad nutricional al tiempo que se resuelve el empeoramiento asociado al empleo de trigo sarraceno sin tratar (PN). Los productos resultantes se caracterizaron por una dureza e incremento de dureza durante el envejecimiento menores que PN, que conduciría a un incremento de su vida útil. El tratamiento con un ciclo 30/30 (PT3), permitió obtener unos resultados ligeramente peores en términos cualitativos que los obtenidos para el ciclo 10/50 (PT1), pero aun así muy positivos y en todo caso mejorando las características nutritivas de la muestra PC. El empleo de PT3 frente a PT1 podría resultar de gran interés al reducir de forma considerable la duración total del tiempo necesario para realizar el tratamiento microondas de 48 minutos a 16 minutos. Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir la viabilidad del empleo de trigo sarraceno en las formulaciones de pan sin gluten en cantidades del 50%, lo que supondría un incremento significativo del valor nutricional de los panes sin gluten, ya que este pseudocereal contiene un perfil nutricional muy rico en distintos macro y micronutrientes.

El tratamiento de granos de pseudocereales mediante radiación de microondas supone una alternativa novedosa y de gran interés para la obtención de harinas adaptadas a múltiples aplicaciones en el campo de los productos horneados sin gluten. Es necesario seguir investigando en la optimización de las variables del tratamiento para incrementar su eficiencia y garantizar la calidad organoléptica del producto final.

AGRADECIMIENTOS

Este TFM se ha desarrollado en el marco del proyecto PID2019-110809RB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) y del proyecto financiado por la Junta de Castilla y León/FEDER (VA195P20).

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of Cereal Chemists (AACC) (2010). Approved methods of the AACC 10th ed. The Association, St. Paul, MN.
- Álvarez-Jubete, L., Auty, M., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten bread formulations. *European Food Research and Technology*, 230 (3), 437-445.
- Arranz, E., & Garrote, J.A. (2010). Inmunología de la enfermedad celíaca. *Gastroenterología y Hepatología*, 33 (9), 643–651.
- Bhat, N. A., Wani, I. A., Hamdani, A. F., Gani, A., & Masoodi, F. A. (2016). Physicochemical properties of whole wheat flour as affected by gamma irradiation. *Food Science and Technology*, 71, 175-183.
- Bhinder, S., Kaur, A., Singh, B., Yadav, M. P., & Singh, N. (2020). Proximate composition, amino acid profile, pasting and process characteristics of flour from different Tartary buckwheat varieties. *Food Research International*, 130.
- Chancahuaña Alva, C. M. (2018). *Efectos saludables de los pseudocereales* (Trabajo de fin de grado). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Gallagher, E., Gormley, T.R., & Arendt, E.K. (2012). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (3-4), 143-152.
- Gani, A., Ashwar, B. A., Akhter, G., Shah, A., Wani, I. A., & Masoodi, F. A. (2017). Physicochemical, structural, pasting and thermal properties of starches of fourteen Himalayan rice cultivars. *Internacional Journal of Biological Macromolecules*, 95, 1101-1107.
- Giménez-Bastida, J. A., & Zielinski, H. (2015). Buckwheat as a Functional Food and Its Effects on Health. *J. Agric. Food. Chem.*, 63 (36), 7896-7913.
- Gunaratne, A. (2018). Heat-moisture treatment of starch. En *Physical Modifications of Starch* (pp. 15-36). Springer Singapore
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J.G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science Technology*, 28 (3).

- Jogihalli, P., Singh, L., & Sharanagat, V.S. (2017). Effect of microwave roasting parameters on functional and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum*). *Food Science and Technology*, 79, 223-233.
- Kaur, M. & Singh, N. (2005). Studies on functional, thermal and pasting properties of flours from different chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Food Chemistry*, 91 (3), 403-411.
- León Gamboa, B. S., & Toscano Bazurto, K. M. (2021). *Estudio y Propuesta de utilización del trigo sarraceno (Fagopyrum esculentum) como sustituto de la harina en el ámbito panadero*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Marston, K., Houryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *Food Science and Technology*, 65, 637-644.
- Martins Fonseca, L., Mello El Halal, S. L., Guerra Dias, A. R., & Da Rosa Zavareze, E. (2021). Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 274.
- Matos Segura, M. E., & Rosell, C. M. (2011). Chemical Composition and Starch Digestibility of Different Gluten-free Breads. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66, 224-230.
- Molavi, H., Ali Razavi, & S. M., Farhoosh, R. (2018). Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch. *Food Chemistry*, 245, 385-393.
- Moscoso, J. F., & Quera P., R. (2015). Enfermedad Celiaca: Revisión. *Revista Médica Clínica Los Condes*, 26 (5), 613-627.
- Nadiah, N.I., Uthumporn, U., & Syahariza, Z.A. (2015). Effect of microwave heating on potato and tapioca starches in water suspension. *International Journal on Advanced Science*, 5 (4), 264-271.
- Puncha-arnon, S., & Uttapap, D. (2013). Rice starch vs. rice flour: Differences in their properties when modified by heat-moisture treatment. *Carbohydrate Polymers*, 91 (1), 85-91.
- Radeloff, M. A., & Beck, R. H. (2016). "Clean label" – Starches and their functional diversity. *Sugar Industry-Zuckerindustrie*, 141 (4), 209-215.
- Ronda, F., Villanueva, M., & Collar, C. (2014). Influence of acidification on dough viscoelasticity of gluten-free rice starch-based dough matrices enriched with exogenous protein. *LWT – Food Science and Technology*, 59, 12-20.
- Sapone, A., Bai, J. C., Ciacci, C., Dolinsek, J., Green, P. H. R., Hadjivassiliou, M., Kaukinen, K., Rostami, K., Sanders, D. S., Schumann, M., Ullrich, R., Villalta, D., Volta, U., Catassi, C., & Fasano, A. (2012). Spectrum of gluten-related disorders: consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine*, 10 (1), 13.
- Sharanagat, V. S., Suhag, R., Anand, P., Deswal, G., Kumar, R., Chaudhary, A., Nema, P. K. (2019). Physico-functional, thermopasting and antioxidant properties of microwave

- roasted sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Journal of Cereal Science*, 85, 111-119.
- Sharma, M., Yadav, P. N., Singh A. K., & Tomar, S. K. (2015). Rheological and functional properties of heat moisture treated pearl millet starch. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 6502-6510.
- Skendi, A., Papageorgiou, M., & Biliaderis, C. G. (2009). Effect of barley b-glucan molecular size and level on wheat dough rheological properties. *Journal of Food Engineering*, 91, 594-601.
- Torbica, A., Hadnadez, M., & Dapčević, T. (2010). Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 24 (6-7), 626-632.
- Varatharajan, V., Hoover, R., Lui, Q., & Seeharaman, K. (2010). The impact of heat-moisture treatment on the molecular structure and physicochemical properties of normal and waxy potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 81 (2), 466-475.
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018a). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering*, 224, 156-164.
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018b). Microwave radiation and protein addition modulate hydration, pasting and gel rheological characteristics of rice and potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 201, 374-381.
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2019). Rice flour physically modified by microwave radiation improves viscoelastic behavior of doughs and its bread-making performance. *Food Hydrocolloids*, 90, 472-481.
- Wronkowska, M., Haros, M., & Soral-Smietana, M. (2013). Effect of Starch Substitution by Buckwheat Flour on Gluten-Free Bread Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1820-1827.
- Yousf, N., Nazir, F., Salim, R., Ashan, H., & Sirwal, A. (2017). Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6 (6), 2165-2168.
- Zhang, Z.-L., Zhou, M.-L., Tang, Y., Li, F.-L., Tang, Y.-X., Shao, J.-R., Xue, W.-T., & Wu, Y.-M. (2012). Bioactive compounds in functional buckwheat food. *Food Research International*, 49 (1), 389–395.
- Zhu, F. (2020). Dietary fiber polysaccharides of amaranth, buckwheat and quinoa grains: A review of chemical structure, biological functions and food uses. *Carbohydrate Polymers*, 248.

ANEXO I. REOLOGÍA DE MASAS A HIDRATACIÓN CONSTANTE Y A CONSISTENCIA CONSTANTE

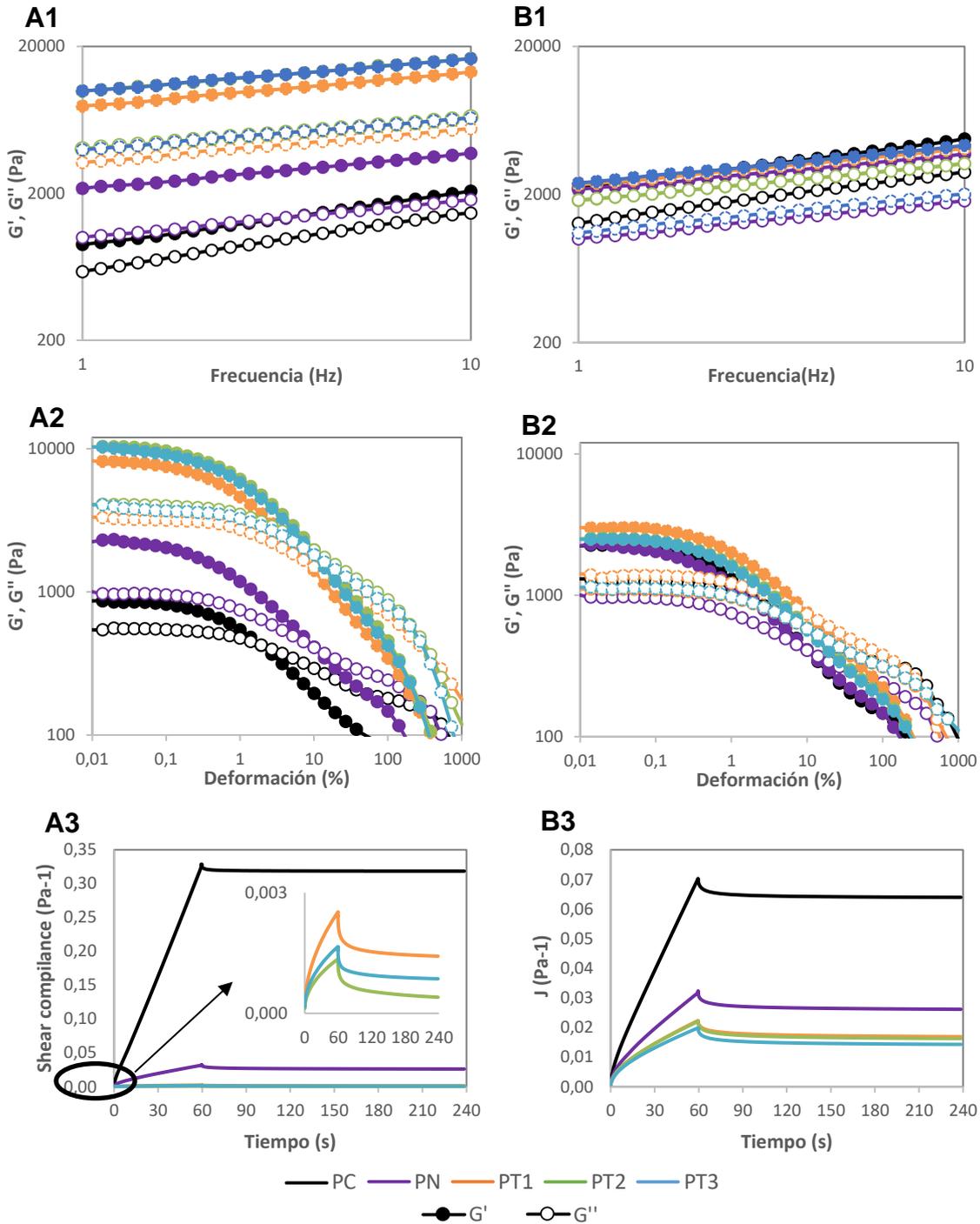


Figura suplementaria 1. A: Reología de masas a hidratación constante; B: Reología de masas a consistencia constante. 1: Ensayo de barrido de frecuencias; 2: Ensayo de barrido de deformación; 3: Ensayo creep-recovery. Los gráficos A1, B1 y B2 tienen representados los módulos G' y G'' de la muestra PT2, sin embargo, hay dificultad para verlos representados debido a que quedan sobre puestos con la muestra PT3.