



APLICACIONES DE HARINAS TRATADAS POR MICROONDAS EN LA ELABORACIÓN DE PANES SIN GLUTEN.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2018/19

Alumna: Sarabel Dehesa Rodríguez
Tutoras: Felicidad Ronda Balbás, Ángela García Solaesa
Tutora externa: Marina Villanueva Barrero

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
2. OBJETIVOS.....	8
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
3.1 Materiales.....	8
3.2 Métodos.....	9
3.2.1 Determinación de la humedad.....	9
3.2.2 Preparación de las harinas.....	9
3.2.3 Propiedades de empastado de las harinas.....	11
3.2.4 Preparación de las masas.....	11
3.2.5 Evaluación reológica de las masas.....	12
3.2.6 Panificación.....	13
3.2.7 Medida de las propiedades físicas de los panes.....	14
3.2.7.1 Peso.....	14
3.2.7.2 Volumen.....	15
3.2.7.3 Color.....	15
3.2.7.4 Apariencia.....	15
3.2.7.5 Textura.....	15
3.2.8 Análisis estadísticos.....	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
4.1 Características del tratamiento.....	16
4.2 Propiedades de empastado de las harinas.....	16
4.3 Reología de masas.....	18
4.4 Propiedades físicas de los panes.....	20
4.4.1 Peso, volumen y parámetros texturales.....	20
4.4.2 Color.....	25
4.4.3 Apariencia.....	26
5. CONCLUSIÓN.....	26
6. AGRADECIMIENTOS.....	27
7. BIBLIOGRAFÍA.....	27

RESUMEN.

En los últimos años, las investigaciones sobre los procesos de elaboración de productos sin gluten se han incrementado; esto es debido al aumento del número de pacientes con enfermedad celíaca y una creciente prevalencia de la enfermedad de sensibilidad al gluten no celíaca.

En el presente estudio, se investigó la modificación física de la harina de arroz mediante un tratamiento hidrotérmico a humedad constante asistido por radiación microondas, así como su efecto sobre las propiedades de empastado de las harinas, sobre las propiedades reológicas de las masas sin gluten y finalmente sobre la calidad del pan resultante. Para ello, se evaluaron tres grados de humedad de la harina, 8% (MW-8%), 13% (MW-13%) y 30% (MW-30%) y dos niveles de sustitución de harina nativa por harina modificada (15% y 30%) en la masa y en los panes.

En cuanto a las propiedades de empastado de las harinas tratadas, se vio que existe una relación entre los descensos del pico de viscosidad (PV), la viscosidad final (FV) y la de caída (TV) a medida que aumenta la humedad de la muestra durante el tratamiento. Los mayores cambios se dieron en la harina MW-30%.

Los cambios reológicos más importantes se vieron en las masas elaboradas con la harina de arroz tratada MW-30%. El módulo elástico se duplicó y cuadruplicó, para las sustituciones del 15% y el 30% respectivamente, respecto a la masa control, elaborada con 100% harina nativa.

Todas las harinas de arroz tratadas con MW (MW-8%, MW-13% y MW-30%) dieron lugar a panes con mayor volumen específico, miga más quebradiza y menos elástica que el control. El aumento en el nivel de sustitución condujo a panes con colores más vivos y cortezas más doradas. En las migas sólo se apreciaron diferencias significativas en los panes elaborados con la harina MW-30%.

Palabras clave: Tratamiento microondas, modificación física de harina, harina de arroz, pan sin gluten, reología de masas, efecto de la humedad.

ABSTRACT.

In recent years, research on the gluten-free production processes has increased, due to the increase in the number of patients with celiac disease, and the increasing prevalence of non-celiac gluten-sensitivity disease. In the present study, the physical modification of the rice flour by a hydrothermal treatment at a constant moisture

assisted by microwave radiation was investigated, as well as its effect on the pasting properties of the flours, rheological properties of the gluten-free dough and on the quality of the resulting breads. For this, three degrees of moisture of the flour were evaluated, 8% (MW-8%), 13% (MW-13%) and 30% (MW-30%) and two levels of substitution of native flour for modified flour. (15% and 30%) in the dough and breads. The most important rheological changes were seen in the doughs made with MW-30% treated rice flour. The elastic modulus doubled and quadrupled, for the substitutions of 15% and 30% respectively, with respect to the control dough, made with 100% native flour.

Regarding to the pasting properties of the treated flours, it was found that higher moisture in the treated flour results in a higher pasting temperature, lower peak viscosity (PV) and final viscosity (FV). The most significant changes occurred in the flour MW-30%.

All the rice flours treated with MW (MW-8%, MW-13% and MW-30%) gave rise to loaves with higher specific volume, crumb more brittle and less elastic than the control. The increase in the level of substitution led to breads with more vivid colors and more golden crusts. In the crumbs, only significant differences were observed in the bread made with the MW-30% flour.

Keywords: Microwave treatment, physical modification of flour, rice flour, gluten-free bread, dough rheology, moisture effect.

1. INTRODUCCIÓN.

La enfermedad celiaca (EC) se caracteriza por ser un proceso sistémico de naturaleza autoinmune, de etiología desconocida, que afecta de forma principal, aunque no exclusivamente, al aparato digestivo. El sustrato morfológico de la enfermedad es la presencia de una inflamación crónica y difusa de la mucosa del intestino delgado asociado a múltiples manifestaciones clínicas (Polanco & Ribes, 1995). En la actualidad, el único tratamiento terapéutico posible es la retirada del gluten de la dieta (Cappa, Barbosa-Cánovas, Lucisano, & Mariotti, 2016; Deora, Deswal, & Mishra, 2014) éste se asocia a la desaparición de los síntomas y a la normalización de la mucosa intestinal en la gran mayoría de los pacientes.

Hay tres principales formas en las que el ser humano puede reaccionar a la ingesta de gluten: alergia (alergia al gluten), autoinmune (enfermedad celiaca, dermatitis herpetiforme y ataxia al gluten) y mediada por el sistema inmunológico (sensibilidad al

gluten) (Gao et al., 2018). En la figura 1 se representa un diagrama con la nomenclatura de los trastornos relacionados con el gluten.

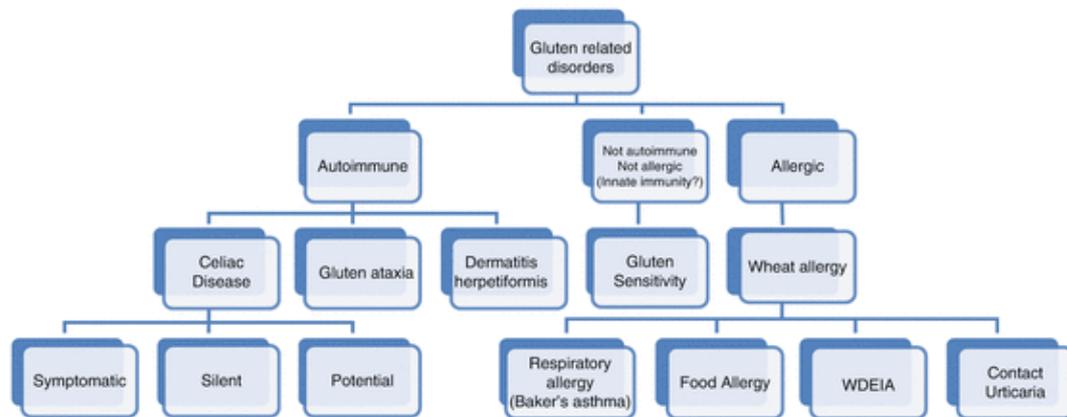


Figura 1. Nomenclatura y clasificación de los trastornos relacionados con el gluten.(Jiménez, Martínez, Quiles, Majid, & González, 2016)

En la actualidad se ha producido un aumento del número de pacientes con enfermedad celíaca y una creciente prevalencia de la enfermedad de sensibilidad al gluten no celíaca. Según la Federación de Asociaciones de Celíacos de España (FACE, 2018), se estima que entre el 1% y 3% de la población mundial posee la enfermedad. Su prevalencia es de 1:100 – 1:200 en cualquier población del mundo (Schuppan, Junker, & Barisani, 2009) y los pacientes con EC deben adherirse a una dieta sin gluten para toda la vida. Es por ello que la comercialización de productos sin gluten ha crecido a una tasa anual del 28% en los últimos años (Glover, 2009). El porcentaje de alimentación y bebida sin gluten lanzada al mercado en el periodo de 2013 a 2015 pasó del 7,9% al 11,8% y se prevé que Europa sea el mercado alimentario con mayor proyección de crecimiento (Bustamante et al., 2017). Otro de los motivos por los cuales se ha producido un aumento de la demanda de productos sin gluten, es la tendencia a eliminar cualquier proteína potencialmente alergénica en la dieta. Cabe destacar que el 65% de los consumidores compran estos productos porque los consideran más saludables, el 27% para perder peso, el 11% por cuestiones relacionadas con el estado de salud (inflamación y depresión) y el 20% por otras razones (Witczak, Ziobro, Juszcak, & Korus, 2016).

El gluten es una mezcla de proteínas de almacenamiento que se encuentran presentes en cereales como trigo, centeno y cebada (y en cualquiera de sus variedades) constituidas por dos grupos de proteínas: las gluteninas, que son polímeros insolubles estabilizados por enlaces disulfuros, y las gliadinas, que son proteínas solubles en alcohol y agua (de la Barca, Rojas-Martínez, Islas-Rubio, &

Cabrera-Chávez, 2010). El gluten es el responsable de la elasticidad de la masa de harina y confiere la consistencia y esponjosidad de los panes y masas horneadas. Muchas personas son incapaces de digerir esta proteína por completo ya que tras la ingesta se generan fragmentos proteicos que activan el sistema inmunológico, desencadenándose una reacción adversa. Esos fragmentos tóxicos parecen proceder de las gliadinas, o prolaminas del trigo. También desencadenan la reacción adversa las prolaminas de otros cereales, como las hordeinas de la cebada o las secalinas del centeno.

La eliminación del gluten de los productos alimenticios elaborados tradicionalmente a base de trigo, tiene un impacto significativo en su estructura y textura. No es una tarea fácil ajustar una receta para productos sin gluten. El resultado es un producto con atributos sensoriales y valor nutricional significativamente diferentes a los productos elaborados con trigo y con influencia en la aceptación por parte del consumidor. La estrategia más común para mejorar la calidad de los productos sin gluten es modificar las propiedades del almidón y su estructura molecular ya que es el principal ingrediente de las materias sin gluten, influyendo directamente en los procesos de gelatinización y retrogradación (Padalino, Conte, & Del Nobile, 2016).

Según la legislación vigente (Reglamento 828/2014) para que un producto sea declarado «sin gluten» no debe contener más de 20 mg/kg de gluten. La declaración «muy bajo en gluten» podrá utilizarse en alimentos que consistan en trigo, centeno, cebada, avena o sus variedades híbridas, o que contengan uno o más ingredientes hechos a partir de estos cereales, que se hayan procesado específicamente para reducir su contenido de gluten, de forma que no contengan más de 100 mg/kg de gluten en el alimento tal como se vende al consumidor final.

Las principales materias primas involucradas en las formulaciones sin gluten son los almidones (arroz, maíz, patata, sorgo, etc.) y las harinas de diversos orígenes botánicos (arroz, maíz, sorgo, mijo, trigo sarraceno, teff, amaranto, quinoa, soja, tapioca, garbanzo, lino, castaña, algarroba y bellota) (Patil & Arya, 2017; Witczak et al., 2016). En la mayoría de ellos, el almidón es el componente principal. El estudio de Rotsch (Rotsch, 1954) sobre el papel del almidón en la fabricación de pan demostró que los panes podrían prepararse a partir de almidón y sustancias formadoras de gel. Además, pueden utilizarse en tales elaboraciones, almidón de trigo y harina de avena, siempre y cuando se produzcan bajo condiciones que garanticen la total ausencia de gluten (Gómez & Martínez, 2016). En torno al 86% de los productos sin gluten están

elaborados con harina o almidón de arroz o de maíz, mientras que el resto de las materias citadas sólo se encuentran en un 2 – 4% en la formulación de dichos productos (ver figura 2) (Haros & Schoenlechner, 2017).

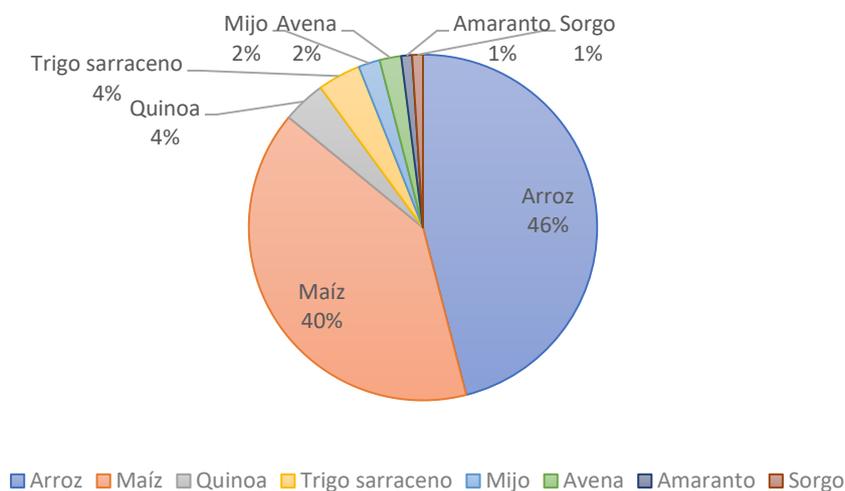


Figura 2. Materias primas empleadas en la formulación de productos sin gluten (Haros & Schoenlechner, 2017).

La harina de arroz (*Oryza sativa*) es uno de los ingredientes más adecuados para las formulaciones de pan sin gluten (*Gluten Free*). Esto es debido a la ausencia del mismo en su composición proteica. Sus propiedades hipoalergénicas, sabor suave, color blanco, bajo contenido de proteínas y sodio, así como la presencia de carbohidratos de fácil digestión, son algunos de los beneficios de esta materia prima (Rosell, Barro, Sousa, & Mena, 2014). Estas características abarcan simultáneamente algunos problemas estructurales, como la débil capacidad de construcción de la red de proteína-almidón y la incapacidad de retener suficientemente las burbujas de gas durante la fermentación. Los almidones de arroz están ampliamente disponibles y ofrecen potencial en la formulación de productos horneados sin gluten. Sus propiedades podrían modificarse adicionalmente mediante ingredientes o aditivos adecuados para la estructura y la textura, incluidos varios hidrocoloides, auxiliares de procesamiento y estabilizadores, así como nutrientes. El papel del almidón en tales sistemas siempre es importante, ya que su elección y tratamiento apropiados podrían afectar significativamente las propiedades del producto final (Witczak et al., 2016).

Se han desarrollado varias estrategias para aliviar los problemas de formación de la masa de harina de arroz, tales como la adición de hidrocoloides para reforzar la estructura (Ronda, Pérez-Quirce, Angioloni, & Collar, 2013), fibras nutricionalmente relevantes (Pérez-Quirce, Collar, & Ronda, 2014), proteínas externas (Crockett, le, &

Vodovotz, 2011; Ziobro, Witczak, Juszczak, & Korus, 2013), emulsificantes (Demirkesen, Mert, Sumnu, & Sahin, 2010), enzimas (Amin et al., 2017; Renzetti & Rosell, 2016), la acidificación de la masa (Pérez-Quirce et al., 2014; Villanueva, Mauro, Collar, & Ronda, 2015) o mediante la formación de una emulsión (Yano et al., 2017). El tratamiento HMT se fundamenta en controlar la movilidad molecular a altas temperaturas mediante la limitación del contenido en agua. Se promueve la interacción de las cadenas poliméricas al romper la estructura cristalina y disociar la estructura de doble hélice en la región amorfa (da Rosa Zavareze & Dias, 2011).

Además, existe una tendencia creciente hacia la modificación física de las harinas mediante el empleo de técnicas de procesado innovadoras, todas ellas con el objetivo de que las harinas presenten una funcionalidad y composición nutricional mejorada (Gómez & Martínez, 2016). Tecnologías como las altas presiones hidrostáticas, tratamientos hidrotérmicos (HMT) como las microondas, o los ultrasonidos, entre otras, son soluciones no convencionales a la hora de mejorar las características reológicas de las masas sin gluten. La tecnología de altas presiones hidrostáticas actúa en la mayor parte de componentes alimentarios como agua, proteínas y almidón, modificando las propiedades funcionales de proteínas e inactivando enzimas responsables del acortamiento de la vida útil de los productos (Cappa et al., 2016). Éstas, ocasionan que el gránulo de almidón incremente su tamaño y gelatinice sin perder la integridad, lo que sí ocurre normalmente durante un tratamiento térmico en presencia de agua en cantidad suficiente. En general, el grado de hinchamiento depende fundamentalmente de la presión. En el caso del tratamiento con ultrasonidos los efectos son principalmente mecánicos, físicos y químicos. El efecto conservador de este tratamiento está asociado a los fenómenos de cavitación gaseosa, debidos a la generación y evolución de microburbujas en un medio líquido sometido a ciclos alternos de compresión y descompresión. El resultado es la formación ininterrumpida de microburbujas que se expanden en la alternancia de los ciclos de presión y al alcanzar un tamaño crítico implosionan o colapsan violentamente (Lohani & Muthukumarappan, 2017).

En los últimos años las microondas se han utilizado como una alternativa a diferentes tratamientos térmicos, como el escaldado, la pasteurización y el secado. Esto es debido a las ventajas que presenta en cuanto a la generación de energía frente a otros tratamientos (Sosa-Morales et al., 2009). Además, la aplicación de microondas, parece ser razonable a otros tratamientos desde el punto de vista coste-funcionalidad/efectividad (Wu, Dong, & Xu, 2008; Xu et al., 2013).

El calentamiento por microondas (MW) es una técnica relativamente nueva, que da lugar a un tratamiento térmico selectivo, corto e intenso. En cuanto a las desventajas que presenta dicha tecnología cuando se aplica al cocinado, son, calentamiento no uniforme, disminución o no presencia del dorado en el tostado y una destrucción microbiana incompleta (Choi, Nguyen, Lee, & Jun, 2011). El fundamento de las MW se basa en originar un calentamiento mediante la interacción de un campo electromagnético con la materia por medio de mecanismos dieléctricos (Kowalski, Lukasiwicz, Bednarz, & Panús, 2012) y depende tanto de las características del alimento, como de su composición química, su estado físico y su geometría (Swain, Russell, Clarke, & Swain, 2004). El calentamiento por microondas se ve favorecido por la presencia de moléculas de agua en el alimento. Los alimentos que contienen moléculas polares como el agua se calientan rápidamente cuando se exponen a la radiación de microondas, debido a la fricción molecular, generada por la rotación dipolar de moléculas en la presencia de un campo eléctrico alternativo (Kowalski et al., 2012). En concreto, en el caso del almidón, la irradiación por microondas causa un desplazamiento en los rangos de gelatinización hacia temperaturas más altas y una caída en la viscosidad y cristalinidad debida a las reorganizaciones estructurales (Yang et al., 2017).

Hasta la fecha se han llevado a cabo diferentes estudios basados en el tratamiento de harina con MW con el fin de aportar información sobre el potencial de dicho tratamiento hidrotérmico en la elaboración de panes sin gluten y la mejora de los mismos, así como también la influencia de dicha radiación sobre el tamaño de partícula de la harina o bien el peso molecular de los beta glucanos añadidos a panes fortificados (Pérez-Quirce, Ronda, Lazaridou, & Biliaderis, 2017) entre otros. Se ha estudiado también el efecto de la radiación de MW y la adición de proteína sobre las propiedades tecnológicas de los almidones de arroz (Villanueva, De Lamo, Harasym, & Ronda, 2018). En los trabajos anteriores, el procesado se ha llevado a cabo a presión constante; por lo tanto, a humedad variable, y donde la harina se iba secando durante el tratamiento.

En este trabajo se ha investigado el uso de un tratamiento hidrotérmico mediante microondas sobre harina de arroz con diferentes humedades (8%(desecada), 13%(original) y 30%(humedecida)) en recipientes herméticos que soportan presiones moderadas-elevadas, y permiten mantener la humedad constante durante el tratamiento. Estos tratamientos se han empleado tanto para modificar físicamente la harina como para mejorar las características sensoriales y organolépticas de los panes

sin gluten elaborados a partir de ellas. Se ha evaluado el efecto de las harinas tratadas en la reología de las masas y en la calidad de los panes con sustituciones del 15% y del 30%.

2. OBJETIVOS.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar la modificación física de la harina de arroz con microondas a diferentes humedades como estrategia para la elaboración de pan sin gluten de calidad mejorada.

Siendo por tanto los objetivos específicos los siguientes:

- Estudiar el impacto de la humedad de la harina durante el tratamiento microondas en las propiedades de la harina tratada.
- Evaluar el impacto de la humedad de la harina durante el tratamiento microondas sobre la reología de las masas elaboradas con diferentes sustituciones de harina tratada.
- Estudiar el impacto de la humedad de la harina durante el tratamiento microondas sobre la calidad de los panes elaborados con diferentes sustituciones de harina tratada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 Materiales.

Para la elaboración tanto de los panes como de las masas, se han empleado los siguientes ingredientes:

- Harina: Se empleó harina de arroz de variedad *Índica* (suministrada por Herba Ricemills, S.L.U) con un contenido de humedad del 13%, <1,00% de ceniza, 8,13 % de proteína, <1% de grasa, la granulometría de la harina fue la siguiente: 1%> 250 μm , 250 μm > 6,1%> 210 μm , 210 μm > 36,1%> 150 μm , 150 μm > 33,4%> 100 μm y 26,6% <100 μm (datos proporcionados por el fabricante), y se presenta dentro del lote A3178.
- Sal (marca Carrefour), azúcar (marca Hacendado) y aceite de girasol (marca Coosol): Los tres obtenidos en el supermercado.
- HPMC: (hidroxipropilmetilcelulosa) K4M suministrado por Down de la empresa Dow Chemical Company.
- Levadura: Se utilizó levadura de la marca European (Instant Dry Baker's Yeast).

- Agua potable: La procedencia del agua utilizada fue la red municipal de suministro de agua de la localidad de Valladolid.

3.2 Métodos.

3.2.1 Determinación de la humedad.

El método usado para medir la humedad de las harinas fue el oficial, 44-19 (AACC,1995). Se basa en pesar en una balanza 2g de muestra en una cápsula de acero inoxidable, previamente atemperada e introducirla en una estufa de secado por convección durante una hora a 130°C. Una vez seca la muestra, se introduce en un desecador en el cual, se deja enfriar durante 30 minutos, antes de pesarla. Para finalmente, calcular el contenido de humedad de la harina se empleó la siguiente fórmula:

$$\frac{(\text{Peso cápsula vacía} + \text{Peso muestra}) - \text{Peso final tras secado}}{\text{Peso muestra}} \cdot 100$$

3.2.2 Preparación de las harinas.

Humidificación.

Para obtener la harina con un grado de humedad del 30% se partió de harina nativa con una humedad del 13%. En primer lugar, se calculó la cantidad de agua que había que añadir a la harina en función de la cantidad total de harina al 30% que se iba a necesitar en este trabajo. A continuación, la harina se vertió en una batidora/mezcladora de la marca Kitchen Aid modelo SKPM5 (USA) y se pulverizó poco a poco el agua hasta llegar a añadir la necesaria para conseguir la humedad buscada. Terminada la humidificación, la harina se introdujo en un bote de polietileno y se dejó reposar a una temperatura de 4°C durante 24h, con el objetivo de equilibrar la humedad. Transcurrido este tiempo y después de comprobar que la humedad de la harina en ese momento era la adecuada, se procedió a llenar bolsas de PA/PP (poliamida y polipropileno) de la marca Cryovac, con 53g de la harina en cuestión, para después congelarla a -40°C para evitar su deterioro hasta el momento de su uso. Al momento de utilizarlas, las bolsas se sacaron del congelador y se dejaron atemperar durante aproximadamente 30 minutos, antes de iniciar el procesado.

Desecación.

Para obtener la harina con un grado de humedad del 8% se partió de harina nativa con una humedad del 13%. Primeramente, se calcularon los gramos de harina necesarios para las posteriores panificaciones. Seguidamente se repartió y extendió la harina sobre bandejas y se procedió a meter a la incubadora a una temperatura de 40°C durante 3 días. A continuación, se realizó la comprobación de la humedad para de este modo corroborar que se había conseguido la humedad objetivo. Finalmente, se procedió a llenar bolsas de PA/PP con aproximadamente 53g de la harina en cuestión, para después congelarla a -40°C con el objeto de proceder igual con todas las muestras. Al momento de utilizarlas, las bolsas se sacaron del congelador y se dejaron atemperar durante aproximadamente 30 minutos, antes de iniciar el procesado. Se comprobó que las condiciones aplicadas para el secado de la harina no afectaron a sus propiedades de empastado.

Tratamiento microondas.

El tratamiento hidrotérmico de las harinas se llevó a cabo en un microondas de la marca Sharp de 900W de potencia nominal.

Para comenzar el tratamiento, se pesaron 50g de la harina en un recipiente cilíndrico de PTFE (politetrafluoroetileno o teflón) de 1L de capacidad. El recipiente con la harina se introdujo en el microondas, el cual estaba adaptado permitiendo que el bote estuviese girando continuamente. De este modo se conseguía mantener la harina en movimiento para permitir una distribución homogénea de la radiación electromagnética. La duración total de cada tratamiento microondas fue de 56 minutos. Este se llevó a cabo en ciclos de 10s de radiación MW intercalados con 60s de parada; es decir la muestra estuvo expuesta a la radiación microondas realmente 8 minutos. Para llevar a cabo un control de temperatura, se introdujeron tiras de temperatura en el interior del bote (Testoterm de TESTO, Barcelona, España). Terminado el tratamiento MW, se mantuvo la muestra durante 40 minutos girando, para favorecer el enfriamiento de la misma. La harina obtenida después del tratamiento, se pasó por un molino de piedra de la marca FIDIBUS MEDIUM. Esto se realizó en todos los lotes para deshacer las pequeñas aglomeraciones de harina que se originaban durante el tratamiento y conseguir así una harina homogénea con un tamaño de partícula muy similar en todos los casos. Finalmente, la harina se almacenó en un recipiente de polietileno cerrado herméticamente en refrigeración.

3.2.3 Propiedades de empastado de las harinas.

Las propiedades de empastado se estudiaron utilizando el reómetro Kinexus Pro + (Malvern Instruments Ltd., Malvern, UK) con el accesorio para medida de almidón, de la misma marca. Para ello se pesaron 3,5 g de harina, con una humedad corregida al 14%, y se transfirieron al recipiente del reómetro, donde se agregaron 25 ml \pm 0.1 ml de agua destilada. Se empleó el método AACC International Method 76-21.01 método Standard 2 (AACC, 2000). Se utilizó el software rSpace versión 1.72 para calcular los siguientes parámetros (ver Figura 3): Temperatura de empastado o pasting temperature (PT) ($^{\circ}$ C): Temperatura inicial del empastado. Indica la temperatura mínima necesaria para la cocción (Scientific, 2001); Viscosidad de pico o peak viscosity (PV) (Pa·s): Viscosidad máxima. Indica la capacidad de retención de agua en una mezcla o pasta; Viscosidad de caída o though viscosity (TV) (Pa·s): Menor valor de viscosidad antes del comienzo de la retrogradación. Se produce al final del tramo de temperatura constante, antes de que comience el enfriamiento; Viscosidad de caída o breakdown (BD) (Pa·s): Diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad de caída que se produce en el tramo de temperatura constante; Viscosidad final o final viscosity (FV) (Pa·s): Viscosidad final en frío (Crosbie & Ross, 2007). Cuando la pasta se enfría, el almidón se reorganiza y la consistencia vuelve a aumentar; Retrogradación o setback (ST) (Pa·s): Diferencia entre la viscosidad final y la de caída.

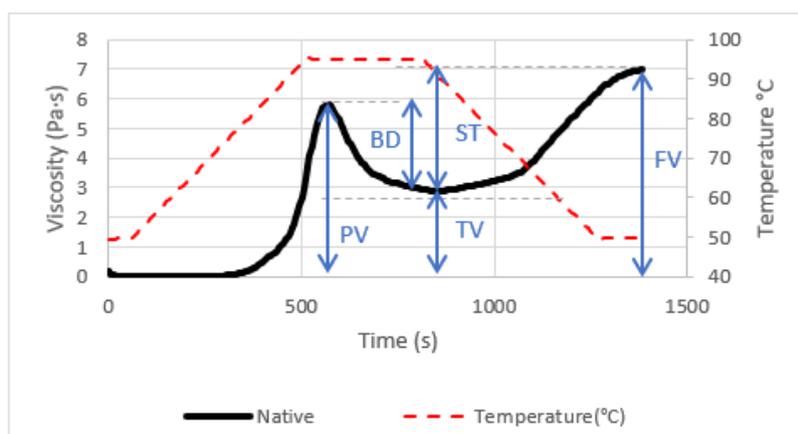


Figura 3. Curva RVA y parámetros.

3.2.4 Preparación de las masas.

Se prepararon un total de seis masas a partir de los 3 lotes de harina tratados con MW (8%, 13% y 30% de humedad) con 2 porcentajes de sustitución (15% y 30%). También se elaboró una masa de referencia, constituida en su totalidad (100%) por harina

nativa, fue tomada como masa control. Todas las masas, incluida la control, fueron elaboradas por duplicado. La fórmula empleada para la elaboración de las masas expresada en base a 100g de harina, fue la siguiente: 5g de azúcar, 1,5g de sal, 2g de HPMC, 6g de aceite y 98% de agua. Se realizaron ensayos preliminares para optimizar la hidratación de la masa. El agua agregada a la masa se adaptó dependiendo de la humedad de la harina de arroz.

El procedimiento de elaboración fue el siguiente: Primero se pesaron las cantidades correspondientes de cada harina y se mezclaron bien en una mezcladora giratoria durante 10 minutos. A continuación, se pesaron los sólidos: azúcar, sal, HPMC y el aceite. Posteriormente, y en un recipiente aparte, se pesó la cantidad de agua requerida, dependiente de la humedad de la harina o mezcla de harinas empleadas. El proceso de amasado fue realizado con una panificadora, *Auto Bakery*, de marca Funai. Al inicio, la velocidad era lenta, y era este el momento en el que se incorporaban los sólidos y el aceite; transcurridos unos minutos la velocidad de la hélice se incrementaba y se procedía a la incorporación del agua. El amasado tenía una duración total de 8 minutos. Una vez terminado el proceso de amasado, la masa se introducía en cuatro recipientes de plástico cerrados herméticamente; tres de ellos, con una capacidad de 35ml, eran utilizados para su ensayo reológico, mientras que la cantidad introducida en el cuarto recipiente se congelaba para su posterior liofilización. Antes de comenzar los ensayos reológicos se dejaba a la muestra en reposo durante 15 minutos.

3.2.5 Evaluación reológica de las masas.

Se llevaron a cabo barridos de frecuencia y deformación con el reómetro Kinexus Pro+ de marca Malvern mencionado en los ensayos de empastado. Se utilizó una geometría de placa paralela de 40 mm de diámetro y superficie serrada y una separación de 1mm entre placas. Se eliminó el exceso de masa y se aplicó vaselina para cubrir las superficies de la muestra expuestas al aire. Antes de la medición, la masa se dejó durante 15 minutos para permitir la relajación de la misma (Ronda et al., 2013). Los ensayos de barrido de deformación y frecuencia se realizaron por duplicado.

3.2.5.1 Barrido de deformación.

Los barridos de deformación se realizaron mediante un control de esfuerzos logarítmico entre 0,01 y 500 Pa a una frecuencia de 1Hz. La temperatura fue de 25 °C, gracias a un módulo Peltier KNX2002 C25P apoyado con un baño de recirculación

KNX2002 de la marca Marven Instruments Ltd. Dichos barridos permitieron localizar el esfuerzo máximo ($\tau_{\text{máx}}$), es decir, el mayor esfuerzo capaz de soportar la muestra antes de que perdiese su estructura. Este valor, que permitió establecer la zona viscoelástica lineal (LVR) de las masas, se identificó por el descenso del módulo elástico (G') y el aumento de la tangente de pérdida. También se determinó, a partir de este ensayo, el esfuerzo y la deformación correspondientes al punto de cruce de las curvas de G' y G'' . Dichas curvas, determinan el momento en que la masa pasa de tener un comportamiento predominantemente elástico a viscoso.

3.2.5.1 Barrido de frecuencia.

Los barridos de frecuencia se llevaron a cabo de 1 a 10 Hz en la región viscoelástica lineal (LVR) a un esfuerzo de 1 Pa. La temperatura fue de 25°C. Los datos de barrido de frecuencia se ajustaron al modelo de ley de potencia como en trabajos anteriores (Ronda et al., 2013).

$$G_1'(\omega) = G'_{\omega_1} \cdot \omega^a$$

$$G_1''(\omega) = G''_{\omega_1} \cdot \omega^b$$

$$\tan \delta(\omega) = G''_{\omega} / G'_{\omega} = (G'' / G')_1 \cdot \omega^{(b-a)} = (\tan \delta)_1 \cdot \omega^c$$

Los coeficientes G_1' , G_1'' y $(\tan \delta)_1$, representan los módulos elásticos y viscosos y la pérdida tangente a una frecuencia de 1 Hz. Los parámetros a, b y c representan constantes experimentales y ω la frecuencia angular (rad^{-1}) (Ronda, Oliete, Gómez, Caballero, & Pando, 2011).

3.2.6 Panificación.

Se realizaron un total de 6 panificaciones con diferentes porcentajes de sustitución (15% y 30%) de harina de arroz nativa por harina de arroz tratada por MW a diferentes humedades (8%, 13% y 30%), además de la elaboración del pan control (100% harina nativa). La fórmula de elaboración seguida por cada 100g de harina es la misma que para la elaboración de las masas, con la única diferencia de que, en este caso, a mayores se añadieron 3g de levadura por cada 100 g de harina. Se obtuvieron 3 panes por cada panificación, por lo que se partió de 300 g de harina. El procedimiento de elaboración fue el siguiente: Para los panes control, primero se pesaron los sólidos (300g de harina, 15g de azúcar, 4,5g de sal y 6g de HPMC) directamente en el recipiente de la amasadora Kitchen Aid Professional (KPM5). En el caso de los panes

elaborados con sustitución de harina nativa por modificada, el primer paso consistía en pesar la mezcla de las harinas correspondientes en un bote y mezclarlas durante 10 minutos. A continuación, se pesaban y añadían los sólidos junto a la harina, y de nuevo, se mezclaban durante otros 10 minutos. La mezcla de harinas y sólidos se traspasaba al recipiente de la amasadora. A continuación, y para ambas elaboraciones (panes control y panes con algún tipo de sustitución), se pesaban 100g del agua y se disolvían 9g de levadura. Una vez disuelta, se añadía el resto del agua. Se ponía la amasadora a velocidad 2 y se añadía el agua junto con la levadura durante 2 minutos. Finalizada la adición y mezcla de agua y levadura, se añadían 18g de aceite a la mezcla y seguidamente se mezclaba a velocidad 4 durante un total de 4 minutos. Transcurridos los 4 minutos se hacía un mezclado manual de la masa con una espátula, con el fin de homogeneizarla. De nuevo, se mezclaba en la amasadora 4 minutos más a velocidad 4. Finalmente, la mezcla se introducía en los moldes. Se añadían entre 180,5-181g de masa, que se extendía por el molde con una cuchara húmeda mediante golpes suaves. A continuación, se arreglaba la superficie de la masa ajustando el peso a 180g. Los moldes eran introducidos en la fermentadora a 28°C durante 40 minutos. Terminada la fermentación, los panes eran horneados a 170°C durante 20 minutos. Tras sacarlos del horno, se dejaban enfriar a temperatura ambiente durante 1h; pasados 40 minutos se procedía a desmoldar.

Estudios previos demostraron que el uso de diferentes amasadoras en las elaboraciones de pan y masas no interfería en los resultados.

3.2.7 Medida de las propiedades físicas de los panes.

En cada panificación se obtenían 3 panes, 2 de ellos eran destinados a la realización de medidas en fresco (peso, volumen, color, apariencia externa e interna y textura), mientras que el tercero se utilizaba para hacer un análisis del envejecimiento a los 2 días; este se conservaba en refrigeración, dentro de una bolsa herméticamente cerrada.

3.2.7.1 Peso.

Para determinar el peso de los panes se utilizó una balanza de la marca COBOS, con una precisión de 2 decimales.

3.2.7.2 Volumen.

Para determinar el volumen específico de los panes se utilizó un medidor de volumen de pan, Bread Volumen Tester JMTY que se basa en el método de desplazamiento de semillas (método 10-05 de la AACCC). Las medidas fueron realizadas por duplicado.

3.2.7.3 Color.

Para evaluar el color de los panes se establecieron medidas tanto de la corteza como de la miga. Para la corteza se realizaron un total de entre 4-6 medidas en 4-6 puntos diferentes. En el caso de la miga se realizaron 2 medidas por rebanada una en cada cara de la misma. Los instrumentos de medida empleados fueron el colorímetro PCE-CSM5 y el software CQCS3. Los resultados fueron expresados según las coordenadas del sistema CIE (Comisión Internacional de la Iluminación) en el espacio de color $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*h^*$ con el iluminante patrón D65 y el Observador 10°.

3.2.7.4 Apariencia.

Para examinar la apariencia externa del producto se realizaron fotografías frontales y laterales. También se tomaron imágenes de las rebanadas centrales de los panes elaborados. Se empleó una cámara Canon IXUS 285 HS.

3.2.7.5 Textura.

El análisis de la textura se realizó mediante un texturómetro universal TA-XT2 Texture analyzer (Stable Microsystems, Surrey, UK) con una sonda cilíndrica de aluminio de diámetro 20mm. Para proceder al ensayo, se dividió cada pan a la mitad y a partir de cada mitad se cortó una rebanada de 2 cm de espesor, obteniendo así dos rebanadas. Sobre cada una de ellas, se realizó un ensayo TPA de doble compresión, para penetrar 50% de profundidad, a 1mm/s de velocidad y con un tiempo de espera entre compresiones de 30s. Los resultados obtenidos fueron: dureza, elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia y se registraron mediante el software Texture Expert. Dicho ensayo fue llevado a cabo tanto en los dos panes frescos como en el pan guardado en refrigeración durante 2 días, con el fin, en este último caso, de evaluar envejecimiento.

3.2.8 Análisis estadísticos.

Para evaluar estadísticamente el impacto del tratamiento microondas sobre masas y panes, se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVII. Todos los datos se han

presentado como valores medios y han sido estudiados mediante un análisis simple de varianza (ANOVA) utilizando el test LSD de Fisher ($p < 0,05$) para establecer diferencias significativas entre muestras.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Características del tratamiento.

La tabla 1 recoge la humedad y máxima temperatura alcanzada por la harina durante el tratamiento MW. Se comprueba que la humedad se mantuvo constante a lo largo de todo el tratamiento microondas, con pequeñas disminuciones que no se consideran relevantes en comparación con las obtenidas en otros trabajos de modificación de harinas con MW, donde las harinas se secaron hasta un 7 – 8% de humedad tras 8 minutos de tratamiento MW, partiendo de una humedad inicial de la harina de 30% (Villanueva, Harasym, Muñoz, & Ronda, 2018). En la misma tabla puede observarse que la harina con un 30% de humedad alcanzó una temperatura máxima inferior a la de las harinas que tenían una humedad más baja, con un contenido de agua libre muy pequeño.

Tabla 1. Resultados tratamiento harinas.

Lote (%)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Tª máxima alcanzada durante el tratamiento (°C)
8	7,8	7,9	137
13	12,8	12,5	137
30	30,8	29,1	121

4.2 Propiedades de empastado de las harinas.

En la figura 4 y tabla 2, se muestra el impacto del tratamiento MW en las propiedades de empastado de las harinas tratadas. Se observa que el tratamiento microondas influye de forma notable en las propiedades de empastado de las harinas. Los gránulos de almidón no son solubles en agua fría, esta insolubilidad es debido a los fuertes enlaces de hidrógeno que sostienen las cadenas de almidón. Sin embargo, cuando el almidón se calienta en exceso de agua y por encima de la temperatura de empastado, sufre una transición de fase orden-desorden llamada gelatinización. Esta transición está asociada con la difusión de agua en el gránulo, la captación de agua por la región amorfa, la hidratación y el hinchamiento radial de los gránulos de almidón que da lugar a un aumento de la viscosidad, la pérdida

de birrefringencia óptica, la captación de calor, la pérdida del orden cristalino, el enrollamiento, la disociación de dobles hélices en las regiones cristalinas. Es decir que, la estructura cristalina que conforma los gránulos se altera, provocando un aumento en el tamaño de los gránulos y solubilización parcial del almidón, fundamentalmente amilosa (Hoover, 2001). Si el calentamiento persiste los gránulos residuales explotan y su contenido difunde fuera del gránulo, pasando a formar parte de la disolución. La solubilización de todos los compuestos sólo es total cuando se sobrepasan los 100°C y ocasiona la fusión de complejos amilosa-lípidos. La solubilidad total de las macromoléculas y la desaparición de los gránulos se traduce en una pérdida de viscosidad. Tras la cocción se produce una fase de enfriamiento, en la que se produce una cristalización parcial de la amilosa, formando una matriz más viscosa. Esto es lo que se conoce como retrogradación de la amilosa y se cuantifica con el parámetro *setback* (ST).

Los cambios de mayor importancia se observaron en la harina tratada al 30% pues es, en comparación con la masa control, la que proporciona valores significativamente inferiores durante el empastado y la gelificación.

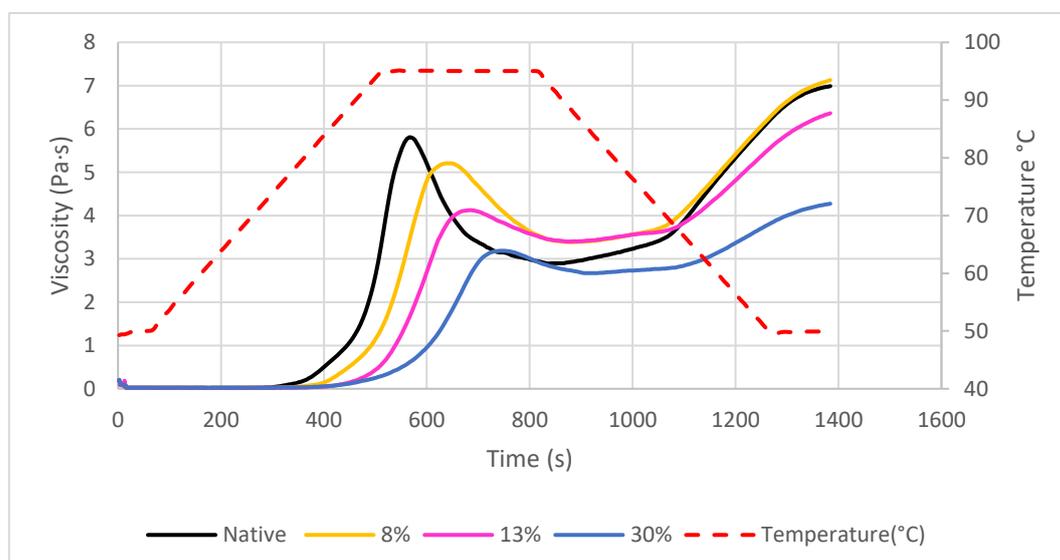


Figura 4. Curvas de empastado de las harinas de arroz tratadas con MW dependiendo del contenido de humedad (8%, 13% y 30%) con respecto a la harina nativa.

Como se observa en la figura 4, es destacable que existe una relación entre el descenso del pico de viscosidad (PV) a medida que aumenta la humedad con la que se ha tratado la muestra de harina. Ocurre lo mismo en el caso de la viscosidad final (FV) y la de caída (TV) (Ver tabla 2). Se observa que la temperatura de empastado aumenta a medida que el grado de hidratación de la harina se incrementa, así bien, en

el caso de la harina al 30% de humedad y con respecto al control existe una diferencia de 10,8°C, mientras que con las del 8% y 13%, la discrepancia es de 4,8°C y 9,6°C respectivamente.

Tabla 2. Efecto del tratamiento de microondas durante 8 min en los parámetros de empastado de harinas de arroz en función de la humedad durante el tratamiento.

Humedad harina (%)	Temperatura empastado (°C)	Viscosidad Pico (Pa·s)	Viscosidad Caída (Pa·s)	Viscosidad Final (Pa·s)	Break-down (Pa·s)	Set-back (Pa·s)
CONTROL	75,4	6,0	3,0	7,2	3,0	4,2
8	80,2	5,2	3,4	7,1	1,8	3,7
13	85,0	4,1	3,4	6,4	0,7	3,0
30	86,2	3,2	2,7	4,3	0,5	1,6

4.3 Reología de masas.

El impacto del nivel de sustitución de harina de arroz tratada con MW (15% y 30%) y su contenido inicial de humedad (8%, 13% y 30%) en masas se estudió mediante pruebas oscilatorias de pequeña amplitud. La tabla 3 resume los coeficientes G' , G'' y $\tan \delta_1$, así como los exponentes a, b, c y d obtenidos al ajustar los datos al modelo de ley de potencia. En las figuras 5 y 6, se muestran las gráficas relativas a los barridos de frecuencia (figura 5) y barridos de deformación (figura 6) de la masa control y la masa elaborada con harina MW-30% a un nivel de sustitución del 30%.

Tabla 3. Efecto del nivel de sustitución de harina de arroz nativa por harina tratada con MW (15% y 30%) a diferentes humedades durante el tratamiento (MW-8%, MW-13% y MW-30%) sobre las propiedades viscoelásticas de las masas de pan.

Propiedades viscoelásticas	Control Nivel (%)	MW - 8%		MW - 13%		MW - 30%		SE
		0	15	30	15	30	15	
G_1' (Pa)	1126ab	835a	1048ab	971ab	1188b	2249c	4777d	100
a	0,299d	0,282c	0,288cd	0,279c	0,286cd	0,234b	0,199a	0,005
G_1'' (Pa)	595b	416a	513ab	480a	614b	921c	1646d	40
b	0,339cd	0,333cd	0,344d	0,332cd	0,323c	0,278b	0,245a	0,006
$\tan \delta_1$	0,529d	0,499cd	0,490c	0,496cd	0,516cd	0,410b	0,345a	0,012
c	0,040ab	0,051bcd	0,056d	0,054cd	0,037a	0,045abc	0,046abcd	0,004
cross over (Pa)	6,4a	7,5a	6,6a	7,2a	6,8a	12,8b	18,7c	1,1
$\tau_{m\acute{a}x}$ (Pa)	3,7a	4,8a	4,7a	6,7ab	5,4a	10,3b	21,5c	1,7

Valores con letras distintas dentro de una misma fila indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). SE: Error estándar agrupado. Cross over: Esfuerzo en el punto de cruce. G_1' y G_1'' : valor que adopta el modulo cuando la frecuencia es 1.

En todas las masas estudiadas, el módulo elástico G' fue mayor que el módulo viscoso G'' proporcionando valores de $\tan \delta_1$ que oscilaron entre 0,345 y 0,529. G_1' no se modificó significativamente en las masas con harinas tratadas al 8% y 13%. Sin embargo, con la harina al 30% sí se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ya que el módulo elástico se duplicó en la sustitución del 15% y se cuadruplicó al sustituir el 30%. La disminución de los exponentes a y b (en ambas sustituciones) en harina del 30% denotan estructuras más estables (se produjo una mayor disminución con un 30% de sustitución que con un 15%). En el caso de las harinas del 8% y del 13% no se observó ningún efecto importante en dichos parámetros. El valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ (tensión máxima que las masas pueden soportar antes de que se rompa su estructura) aumentó en todas las masas con harina tratada, aunque solo lo hizo de manera significativa cuando se añadió MW-30% en ambas sustituciones (ver Tabla 3).

En general, a medida que aumentó el contenido de humedad de la harina tratada en el tratamiento microondas el efecto estructurante de ésta en la masa fue mayor. Esto puede deberse a los cambios ya observados en la estructura, la cristalinidad, las propiedades térmicas y de empastado de las muestras tratadas con microondas, que fueron más pronunciados con los niveles más altos de contenido inicial de humedad (Villanueva, Harasym, et al., 2018).

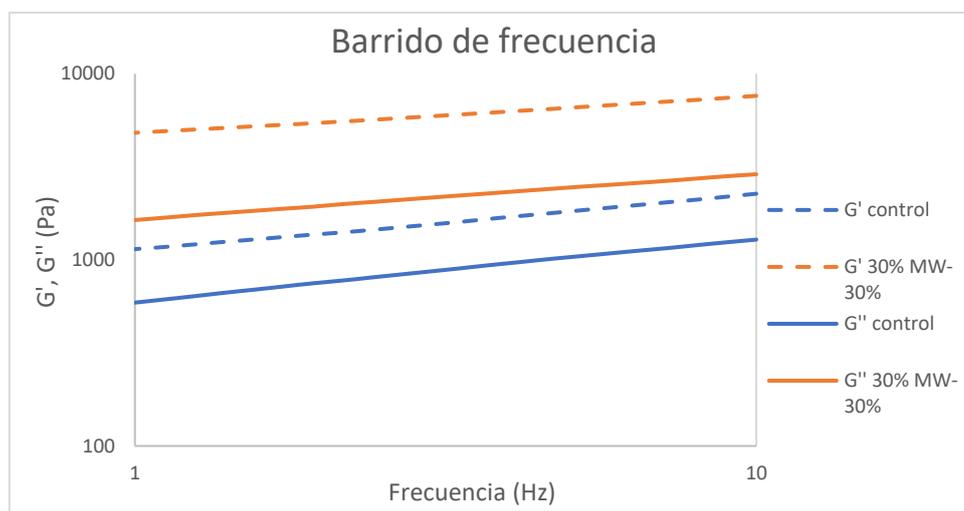


Figura 5. Barrido de frecuencia de las masas elaboradas con un 30% de sustitución de harina nativa por harina tratada 8 minutos por MW a una humedad del 30%. También se incluye el espectro mecánico de la masa control elaborada con 100% harina de arroz nativa

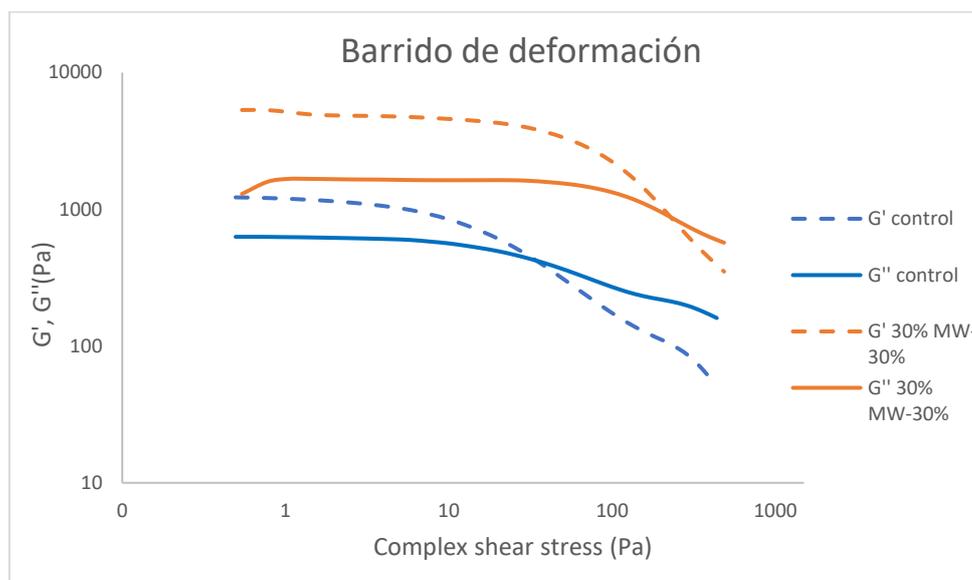


Figura 6. Barrido de deformación de las masas elaboradas con un 30% de sustitución de harina nativa por harina tratada 8 minutos por MW a una humedad del 30%. También se incluye la evolución de los módulos G' y G'' con la deformación para la masa control elaborada con 100% harina de arroz nativa.

4.4 Propiedades físicas de los panes.

4.4.1 Peso, volumen y parámetros texturales.

Peso y volumen específico.

La pérdida de peso de los panes durante el horneado da una idea de la capacidad de retención de agua que tienen los ingredientes que los constituyen. En la tabla 4 se observa que los panes con mayor pérdida de peso en comparación con el control fueron aquellos elaborados con las dos sustituciones, 15 y 30%, de harina nativa por la harina tratada, MW-30%. También es destacable la pérdida de peso en las sustituciones del 30% tanto con la harina MW-8% como con la MW-13%. Esta mayor pérdida de peso podría relacionarse con el mayor volumen de los panes obtenidos. Los panes más desarrollados ofrecen una mayor superficie al secado durante el horneado (Villanueva, Harasym, Muñoz, & Ronda, 2019). Como puede observarse en la Tabla 4, en general, todos los panes elaborados con harina tratada con MW, con independencia de la humedad de la harina durante el tratamiento, presentaron un volumen específico más alto que el pan control. Sin embargo, a medida que se aumentó el grado de sustitución de harina nativa por harina tratada se obtuvieron panes más voluminosos. El mayor volumen de los panes podría estar relacionado con la mayor temperatura de empastado de las harinas tratadas por MW. Una mayor temperatura de empastado permite un mayor desarrollo de la masa en el horno, antes

de que se fije su estructura como consecuencia de la gelatinización del almidón (Villanueva et al., 2019). En el caso de las harinas MW-30%, el aumento de la temperatura de empastado fue más acusado que en las tratadas a humedades más bajas. Ello podría explicar el mayor volumen de los panes elaborados con ellas. En este caso, el aumento en la consistencia de las masas descrito en el apartado anterior también podría haber contribuido al mayor volumen de los panes, ya que ello facilita la retención del CO₂ de la fermentación y por lo tanto un mayor desarrollo de la masa (Ziobro et al., 2013). Sin embargo, una consistencia excesiva, como se observó en la masa que contenía una sustitución del 30% con harina MW-30%, pudo representar un inconveniente ya que una consistencia excesiva puede dificultar la expansión de la masa bajo la acción de una presión dada del gas producido durante la fermentación que se expande en el horneado.

Tabla 4. Efecto del nivel de sustitución de la harina de arroz tratada con MW (15% y 30% con respecto a la cantidad total de harina de arroz) sobre el pan en función de la humedad de la harina durante el tratamiento (8, 13 y 30%).

Propiedades físicas del pan	Nivel (%)	Control	MW - 8%		MW - 13%		MW - 30%		SE
		0	15	30	15	30	15	30	
Pérdida peso (%)		16,57a	16,47a	18,50b	17,33a	18,73b	19,10b	18,27b	0,29
Volumen esp. (mL/g)		2,97a	3,26b	4,24d	3,68c	4,11d	4,14d	3,63c	0,074
Dureza (N)		1,860e	1,450d	0,820a	1,249c	1,019b	1,005b	1,050b	0,060
Elasticidad		0,885d	0,815c	0,676a	0,752b	0,774bc	0,724ab	0,835cd	0,022
Cohesividad		0,588ab	0,597ab	0,571a	0,580ab	0,609b	0,580ab	0,602ab	0,011
Masticabilidad (N)		0,968e	0,706d	0,315a	0,545c	0,48bc	0,422b	0,528c	0,032
Resiliencia		0,331bc	0,329bc	0,298ab	0,296a	0,294a	0,266a	0,337c	0,011
ΔDureza 2días (N)		2,436bc	1,856ab	1,367a	1,701ab	2,785c	1,318a	1,343a	0,260

Valores con letras distintas dentro de una misma fila indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). SE: Error estándar agrupado.

Dureza.

En la Tabla 4 se puede observar que todos los panes elaborados con harina tratada presentaron menores valores de dureza y por lo tanto, migas más blandas y frágiles que el pan elaborado con 100% harina nativa. En general, a mayor sustitución de

harina nativa por harina tratada, se obtuvo menor dureza; a excepción del pan elaborado con MW-30%, que presentó mayor dureza en la sustitución del 30% que del 15%. A pesar de disminuir la dureza al incorporar harina tratada, en ningún caso los valores fueron muy significativos, resultando migas blandas y tiernas. No se debe olvidar que una de las limitaciones de las migas de pan sin gluten elaboradas con hidrocoloides y altas hidrataciones, son precisamente las migas excesivamente fracturables (Villanueva et al., 2019). Resultados similares obtuvieron (Marston, Khouryieh, & Aramouni, 2016) quién tras estudiar el efecto de tratamiento de microondas en la harina de sorgo para elaborar panes sin gluten, observaron que los panes que contenían harina de sorgo tratada presentaban también menores valores de dureza.

Elasticidad.

En un pan de alta calidad se busca un buen grado de frescura, relacionado con altos valores de elasticidad. Un pan que presenta valores bajos tiende a desmigarse más cuando se rebana (McCarthy, Gallagher, Gormley, Schober, & Arendt, 2005). Se observa que la elasticidad de la miga disminuye en mayor o menor medida en todos los panes elaborados con harinas tratadas.

Cohesividad.

A mayor cohesividad, mayor resistencia de la estructura interna de la miga. Se observó que un aumento de la sustitución conllevaba un aumento de la resistencia interna, a excepción de la sustitución del 30% en la harina MW-8%.

Masticabilidad.

Los panes elaborados con harina tratada presentaron menores valores de masticabilidad, dando como resultado panes fácilmente desintegrables. Con respecto al control, las diferencias más significativas se obtuvieron en la sustitución del 30% en la harina al 8% de humedad.

Resiliencia.

Sobre la capacidad de recuperación instantánea, decir que la sustitución de harina nativa por harina tratada, a excepción de las sustituciones del 15% y 30% en la harina MW-8% y MW-30% respectivamente, hace disminuir este parámetro. A pesar de esto, en el resto de elaboraciones, no se observaron diferencias estadísticamente significativas.

ΔDureza a los 2 días.

El incremento en la dureza de la miga a los 2 días, con respecto al control, es menor en los panes elaborados con la harina tratada, a excepción de la sustitución del 30% en la harina al 13% de humedad, en la cual se obtiene un valor ligeramente superior.

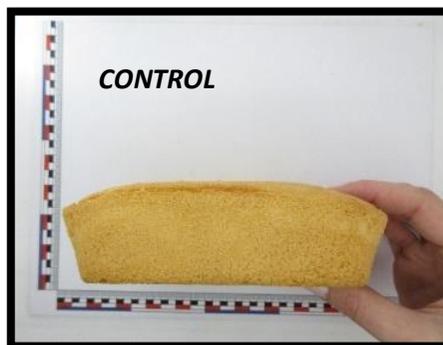
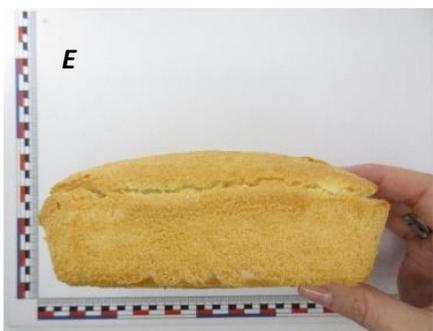
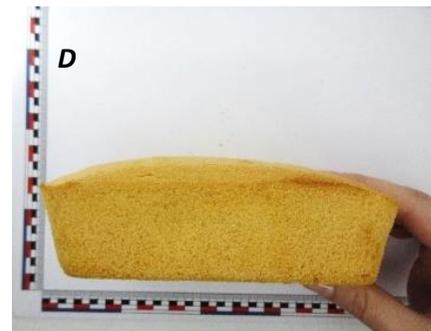
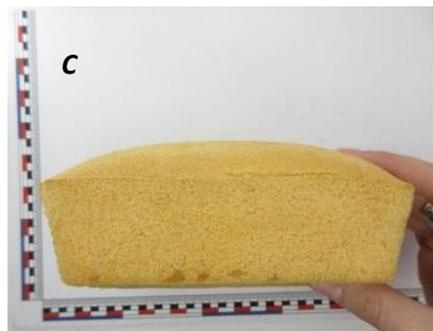
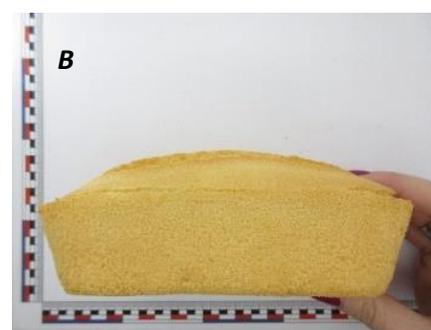
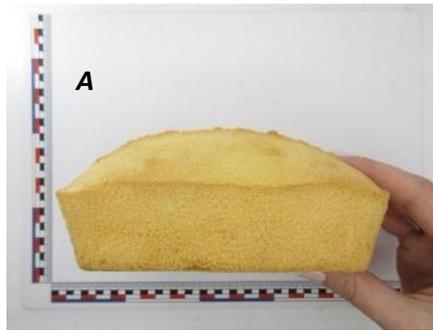


Figura 7. Efecto de la adición de harina de arroz tratada con MW sobre la apariencia externa y las estructuras internas de los panes sin gluten según el contenido de humedad de la harina en el tratamiento. A: 30% de sustitución de harina tratada al 13%, B: 15% de sustitución de harina tratada al 13%, C: 30% de sustitución de harina tratada al 8%, D: 15% de sustitución de harina tratada al 8%, E: 30% de sustitución de harina tratada al 30%, F: 15% de sustitución de harina d tratada al 30%, Control: 100% harina nativa.

4.4.2 Color.

Luminosidad (L).

En general los valores de luminosidad de la corteza se deben a las reacciones de Maillard, influenciadas por la distribución de agua y la reacción de los azúcares reductores y aminoácidos. Como se observa en la tabla 5, con respecto al pan control, únicamente se aprecian diferencias significativas en el color de la corteza, en el caso de la sustitución del 30% de harina al 13% de humedad. En el resto de humedades y sustituciones no se observan cambios importantes. El oscurecimiento de la corteza es deseable en panes sin gluten, ya que, dichos panes tienden a tener un color de la corteza más claro que los panes de trigo blancos haciéndoles menos atractivos (Gallagher, Gormley, & Arendt, 2003). En el caso de la miga, las variaciones en el color de ésta pueden ser debidas además de por tratamiento hidrotérmico recibido, al color de los ingredientes. De nuevo, los cambios más importantes se dan en ambas sustituciones (15% y 30%) de la harina con un 30% de humedad y también en la sustitución del 30% en la harina al 13% de humedad, en todos ellos, el valor de la L disminuye, obteniéndose así migas ligeramente más oscuras.

Tono (h).

Se obtuvieron valores de tono de la corteza desde 62 hasta 65. Prácticamente no se obtuvieron variaciones en la harina al 8% ni tampoco en la sustitución del 15%, en la harina del 13% de humedad. Los cambios más importantes se dieron en los panes elaborados con la harina al 30% de humedad, aunque no se aprecian diferencias entre ambas sustituciones. Es en la miga donde sí se observa una mayor variación en el tono obteniendo valores desde 83 hasta 90. En general, en todos los casos el valor de h disminuye en la miga, con respecto al pan control, a excepción del pan elaborado sustituyendo el 30% de la harina nativa por la tratada al 13% de humedad. El cambio más significativo se produce en ambas sustituciones de la harina MW-30%, por lo que se puede concluir que, a mayor humedad de la harina, se obtienen tonos más pálidos.

Saturación o croma (C).

En general se concluye que no hay cambios significativos en la C ni en la corteza ni en la miga de los panes elaborados con harina tratada. Si se observa, que el pan elaborado con el 30% de harina tratada al 30% de humedad presenta un color ligeramente más vivo en la corteza y que el pan elaborado con el 30% de harina

tratada al 13% de humedad es el único con una C más baja que el control en el caso de la miga.

Tabla 5. Efecto del nivel de sustitución de la harina de arroz tratada con MW (15% y 30% con respecto a la cantidad total de harina de arroz) sobre el color del pan.

Color del pan	Nivel (%)	Control	MW - 8%		MW - 13%		MW - 30%		SE
		0	15	30	15	30	15	30	
L*Corteza		67,3ab	68,8bc	68,9bc	67,5ab	70,8c	65,9a	66,0a	0,8
H Corteza		64,1b	64,6bc	64,3b	64,1b	65,5c	62,8a	63,1a	0,3
C*Corteza		34,8ab	34,6ab	35,1b	35,3b	34,0a	35,1b	36,2c	0,4
L*Miga		77,8b	77,7b	78,9b	76,6b	72,9a	72,8a	73,4a	1,1
H Miga		88,2c	85,6b	85,2ab	85,7b	90,9d	83,5a	84,3ab	0,8
C*Miga		5,9ab	6,2bc	6,4bc	6,6c	5,4a	6,4bc	6,3bc	0,2

Valores con letras distintas dentro de una misma fila indican que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). SE: Error estándar agrupado.

4.4.3 Apariencia.

Como se observa en la figura 7, no se obtuvieron diferencias significativas ni en cuanto a la densidad alveolar ni en cuanto al tamaño de los alveolos de cada una de las migas estudiadas. En cuanto a la apariencia externa de los panes, se observa con respecto al control un aumento importante del volumen de los mismos. Por lo general, a medida que se aumenta la dosis de sustitución se obtienen panes con cortezas más doradas.

5. CONCLUSIÓN.

El tratamiento MW de las harinas de arroz dio como resultado cambios sustanciales en las propiedades viscoelásticas y de empastado de las masas, de modo que la panificación, con respecto a la harina control (sin tratamiento MW) fue significativamente diferente. Los resultados obtenidos mostraron que, las masas elaboradas con harina al 30% de humedad en sus dos sustituciones, presentaron un comportamiento más elástico y, en consecuencia, una mayor resistencia a la deformación.

En cuanto a las propiedades físicas de los panes se ha demostrado que, en todos los panes, el empleo de harina tratada hidrotérmicamente mediante MW, independientemente del tratamiento y del nivel de sustitución de harina nativa, dieron como resultado panes con un mayor volumen específico y menor dureza. Sobre el

aspecto externo, se comprueba que a medida que se aumenta la sustitución, mejoran sustancialmente, obteniéndose cortezas más doradas.

6. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto AGL2015-63849-C2-2-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (MINECO/FEDER) y de los proyectos de la Junta de Castilla y León/FEDER (Ref: VA072P17 y VA165G18).

7. BIBLIOGRAFÍA.

- American Association of cereal Chemists. (1995). Approved methods (9th ed.). Minneapolis, USA: American Association of cereal Chemists.
- American Association of Cereal Chemists (AACC) (2000). Method 76-21.01. Anonymous approved methods of the AACC (10th ed.). St. Paul: The Association.
- Amin, T., Naik, H. R., Hussain, S. Z., Rather, A. H., Murtaza, I., & Dar, B. N. (2017). Structural properties of high-protein, low glycaemic index (GI) rice flour. *International Journal of Food Properties*, 20(11), 2793–2804.
- Bustamante, M., Fernández-Gil, M., Churruga, I., Miranda, J., Lasa, A., Navarro, V., & Simón, E. (2017). Evolution of gluten content in cereal-based gluten-free products: An overview from 1998 to 2016. *Nutrients*, 9(1), 21.
- Cappa, C., Barbosa-Cánovas, G. V., Lucisano, M., & Mariotti, M. (2016). Effect of high pressure processing on the baking aptitude of corn starch and rice flour. *LWT*, 73, 20–27.
- Choi, W., Nguyen, L. T., Lee, S. H., & Jun, S. (2011). A microwave and ohmic combination heater for uniform heating of liquid–particle food mixtures. *Journal of Food Science*, 76(9), E576–E585.
- Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). Effects of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chemistry*, 129(1), 84–91.
- Crosbie, G. B., & Ross, A. S. (2007). *RVA handbook*. AACC International.
- da Rosa Zavareze, E., & Dias, A. R. G. (2011). Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 317–328.
- de la Barca, A. M. C., Rojas-Martínez, M. E., Islas-Rubio, A. R., & Cabrera-Chávez, F. (2010). Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), 241–246.
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 295–303.
- Deora, N. S., Deswal, A., & Mishra, H. N. (2014). Alternative approaches towards gluten-free dough development: recent trends. *Food Engineering Reviews*, 6(3),

89–104.

- Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*, *56*(2–3), 153–161.
- Gao, Y., Janes, M. E., Chaiya, B., Brennan, M. A., Brennan, C. S., & Prinyawiwatkul, W. (2018). Gluten-free bakery and pasta products: prevalence and quality improvement. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(1), 19–32.
- Glover, K. (2009). Companies expand gluten free offerings.
- Gómez, M., & Martínez, M. M. (2016). Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *Journal of Cereal Science*, *67*, 68–74.
- Haros, C. M., & Schoenlechner, R. (2017). *Pseudocereals: Chemistry and Technology*. John Wiley & Sons.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, *45*(3), 253–267.
- Jiménez, A. I. O., Martínez, R. M. G., Quiles, M. J. B., Majid, J. A. A. N., & González, M. J. I. (2016). Celiac disease and new diseases related to gluten. *Nutricion Hospitalaria*, *33*(Suppl 4), 345.
- Kowalski, S., Lukasiewicz, M., Bednarz, S., & Panuś, M. (2012). Diastase number changes during thermal and microwave processing of honey. *Czech Journal of Food Sciences*, *30*(1), 21–26.
- Lohani, U. C., & Muthukumarappan, K. (2017). Modeling of continuous ultrasonication to improve total phenolic content and antioxidant activity in sorghum flour: A comparison between response surface methodology and artificial neural network. *International Journal of Food Engineering*, *13*(4).
- Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT-Food Science and Technology*, *65*, 637–644.
- McCarthy, D. F., Gallagher, E., Gormley, T. R., Schober, T. J., & Arendt, E. K. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, *82*(5), 609–615.
- Padalino, L., Conte, A., & Del Nobile, M. (2016). Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread. *Foods*, *5*(4), 87.
- Patil, S. P., & Arya, S. S. (2017). Nutritional, functional, phytochemical and structural characterization of gluten-free flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *11*(3), 1284–1294.
- Pérez-Quirce, S., Ronda, F., Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2017). Effect of microwave radiation pretreatment of rice flour on gluten-free breadmaking and molecular size of β -glucans in the fortified breads. *Food and Bioprocess Technology*, *10*(8), 1412–1421.
- 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 & Technology*, *49*(5), 1375–1382.
- Polanco, I., & Ribes, C. (1995). Enfermedad celíaca. *Pediatría Integral*, *1*(2), 124.

- Renzetti, S., & Rosell, C. M. (2016). Role of enzymes in improving the functionality of proteins in non-wheat dough systems. *Journal of Cereal Science*, 67, 35–45.
- Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P. A., & Pando, V. (2011). Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 272–277.
- 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(2), 252–262.
- Rosell, C. M., Barro, F., Sousa, C., & Mena, M. C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 354–364.
- Rotsch, A. (1954). Chemische und technische Untersuchungen an künstlichen Teigen. *Brot Gebaeck*, 8, 129.
- Schuppan, D., Junker, Y., & Barisani, D. (2009). Celiac disease: from pathogenesis to novel therapies. *Gastroenterology*, 137(6), 1912–1933.
- Scientific, N. (2001). Interpreting Test Results Rapid Visco Analyser: Instalation and Operation Manual. *Newport Scientific Pty Limited, Warriewood, Australia*, 37–40.
- Sosa-Morales, M. E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., Garcia, H. S., & Lopez-Malo, A. (2009). Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part I: Relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering*, 103(3), 297–303.
- Swain, M. V. L., Russell, S. L., Clarke, R. N., & Swain, M. J. (2004). The development of food simulants for microwave oven testing. *International Journal of Food Science & Technology*, 39(6), 623–630.
- Villanueva, M., De Lamo, B., Harasym, J., & Ronda, F. (2018). 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. (2018). 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. (2019). Rice flour physically modified by microwave radiation improves viscoelastic behavior of doughs and its bread-making performance. *Food Hydrocolloids*, 90, 472–481.
- Villanueva, M., Mauro, R. R., Collar, C., & Ronda, F. (2015). Acidification of protein-enriched rice starch doughs: effects on breadmaking. *European Food Research and Technology*, 240(4), 783–794.
- Witczak, M., Ziobro, R., Juszcak, L., & Korus, J. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems—A review. *Journal of Cereal Science*, 67, 46–57.
- WU, Y., DONG, Y., & XU, B. (2008). Comparative research on the stabilization methods of wheat germ [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 6, 34–37.
- Xu, B., Zhou, S.-L., Miao, W.-J., Gao, C., Cai, M.-J., & Dong, Y. (2013). Study on the stabilization effect of continuous microwave on wheat germ. *Journal of Food Engineering*, 117(1), 1–7.

- Yang, Q., Qi, L., Luo, Z., Kong, X., Xiao, Z., Wang, P., & Peng, X. (2017). Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch. *Food Hydrocolloids*, *69*, 473–482.
- Yano, H., Fukui, A., Kajiwara, K., Kobayashi, I., Yoza, K., Satake, A., & Villeneuve, M. (2017). Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism. *LWT-Food Science and Technology*, *79*, 632–639.
- Ziobro, R., Witczak, T., Juszcak, L., & Korus, J. (2013). Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids*, *32*(2), 213–220.