



DESARROLLO DE PANES SIN GLUTEN CON ELEVADO CONTENIDO EN FIBRA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Curso: 2021/22

**Alumno: Bugarín Labrador Raquel
Tutor: Gómez Pallarés Manuel**

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

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA.	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
ENSAYOS SOBRE FIBRAS	6
Propiedades de hidratación.....	7
Propiedades de empastado.....	7
Perfil de Textura.....	8
Color de geles.....	8
Análisis estadístico	8
DETERMINACIÓN DE HUMEDA ÓPTIMA Y MÉTODO DE ELABORACIÓN DE PANES.	8
ENSAYOS SOBRE PANES	10
Propiedades Reológicas.....	11
Pérdida de peso.....	11
Volumen específico	11
Perfil de textura.....	12
Color de corteza y miga.....	12
Imagen de rebanada.....	12
Focus group.....	12
Presencia de moho.....	12
Análisis estadístico	12
RESULTADOS	13
FIBRAS.....	13
Propiedades de hidratación y perfil de textura.....	13
Propiedades de empastado.....	14
Color de geles.....	16
DETERMINACIÓN DE HUMEDAD ÓPTIMA DE CADA PAN.....	17
PANES FINALES	19
Reología de masas, volumen específico y pérdida de peso	19
Perfil de textura.....	21
Color de corteza y miga de panes.....	22
Focus group.....	22
Aparición de moho.....	23
CONCLUSIÓN	23
BIBLIOGRAFÍA	24

ABSTRACT

Nowdays increasing awareness of celiac disease and market demands have driven interest in the development of gluten-free breads with differentiated value. The absence of gluten results in a liquid dough unable to retain the maximum gas produced during fermentation, resulting in products of low organoleptic quality and high rate of hardening. The efficacy of dietary fibers in their formulation has been proven thanks to their water retention and gelling capacity. Citrus fiber is a by-product of the food industry with potential for reincorporation into the food chain due to its technological properties and nutritional benefits, but little studied in this field. This project aims to incorporate citrus fiber to develop a gluten-free bread formulation with optimal characteristics. Its physicochemical properties have been studied in dilutions with starch, showing an increase in water retention when subjected to stress, an increase in maximum viscosity and a decrease in the hardness of the gels formed. The tests for their incorporation into the doughs resulted in the need for greater hydration to reach their maximum volume. From the analysis of the breads obtained, it was concluded that the addition of 6% citric fiber had a certain inhibitory effect on the elasticity and viscosity of the dough, as well as on its growth. It improved the preservation of the breads by decreasing their drying and delaying starch retrogradation, although mold growth increased due to the high availability of water. The organoleptic characteristics of breads with citrus fiber were declared adequate by a group of experts.

Key Words: citrus fibers, gluten free bread, rheology, water-holding capacity, viscosity

INTRODUCCIÓN

La enfermedad celíaca es una enteropatía autoinmune, sistémica y crónica producida por el consumo de gluten, que se da en individuos predispuestos genéticamente, que afecta al 1% de la población adulta. Actualmente se están estudiando numerosas alternativas a la dieta sin gluten (Banai, 2004; Spaenij et al., 2005; De Angelis et al., 2006; Bethune y Khosla, 2012; Mooney et al., 2014; Shan et al, 2014; Kaukinen y Lindfors, 2015; Moscoso y Quera, 2015; Caio *et al.*, 2019; Wei et al, 2020). Sin embargo, a día de hoy no existen opciones terapéuticas autorizadas (Mooney et al., 2014), ya que cualquier fármaco nuevo para tratar la enfermedad debería ser tan eficaz y seguro como la dieta sin gluten, y de inocuidad probada (Kaukinen y Lindfors, 2015).

Por otro lado, la alergia al gluten es una reacción inmune cuya sintomatología puede resultar incluso en shock anafiláctico (Asri y Rostami-Nejad, 2022). Aunque la

prevalencia de esta enfermedad es mucho menor entre la población (Catassi et al., 2013), debe prestarse especial cuidado debido a su gravedad.

También se está estudiando la posible existencia de una sensibilidad al gluten no celíaca ni alérgica (Aziz y Syers, 2012; Di Sabatino et al., 2015) denominada enteropatía sensible al gluten o enteritis linfocítica, que no cuenta con pruebas específicas (Zevallos et al., 2013) y se estima que afecta al 6% de la población (Pérez, 2021).

Pero sumado a la urgencia por satisfacer las necesidades alimenticias de estos sectores enfermos, actualmente está en auge una tendencia hacia la dieta libre de gluten (Sapone et al., 2012; Golley et al., 2017), propiciada por la difusión masiva de información no contrastada, que la reaccionan con numerosos beneficios para la salud (Lis et al. 2015; Staudacher y Gibson 2015; Barnett et al., 2016).

Una gran parte del esfuerzo en la industria alimentaria está enfocado en el desarrollo de productos sin gluten que, debido a las crecientes oferta y demanda de estos, deben aportar algún componente novedoso, valor añadido, y sobre todo, ser de gran calidad organoléptica. Y es en este aspecto donde se encuentra uno de los mayores hándicap del desarrollo de productos de panadería. Científicos y tecnólogos de alimentos se centran en el estudio del aporte funcional de cada polímero de la harina de trigo, la búsqueda de ingredientes alternativos que cumplan la función deseada, y la mejora de la calidad nutricional y organoléptica de los productos.

A grandes rasgos, las contribuciones del trigo a la formación de la masa vienen dadas por dos componentes: el almidón, que actúa como fuente de azúcares fermentables, y la red proteica de gluten, responsable de las propiedades viscoelásticas y extensibilidad de la masa, y de la retención del gas producido durante la fermentación. (Gómez y Román, 2018; Belorio y Gómez, 2022). Durante el amasado y la fermentación de la masa, el almidón dañado en etapas anteriores del procesado, es hidrolizado por las amilasas presentes en el grano, produciendo glucosa y maltosa fermentables por las levaduras (Struyf et al. 2016). Entonces entra en juego la red de gluten, formada por la interacción entre gliadinas y gluteninas provocada con el trabajo mecánico del amasado y en presencia de agua. Esta red retiene el CO₂ liberado durante la fermentación, y al ser elástica permite la adecuada expansión de la masa y la aparición de un pan final con volumen y textura aireada (Delcour et al. 2012). Otras reacciones contribuyen también a las características organolépticas del pan, como la gelatinización y retrogradación del almidón, y la reacción de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos. Para sustituir en cierta forma estas propiedades funcionales, en los panes sin gluten se emplea: almidón y/o harina de cereales sin gluten o tubérculos en lugar del almidón de

trigo; e hidrocoloides en lugar de la red de gluten (Mancebo et al., 2015a; Mancebo et al., 2015b Gómez y Román, 2018; Gómez, 2021).

En caso de emplearse almidones es importante tener en cuenta que en sus procesos de producción la cantidad de gránulos dañados resulta mínima, y que se eliminan las amilasas presentes. Por ello, para posibilitar el proceso de fermentación, deben añadirse azúcares fermentables como ingrediente, normalmente en forma de sacarosa. A mayores, si estos azúcares no son totalmente consumidos por las levaduras, participan en las reacciones de Maillard contribuyendo al color final de la corteza (Gómez y Román, 2018). Entre los almidones más empleados se encuentran el de maíz, que aumenta el volumen de la masa, aunque el pan final se encuentra más seco; y el de tapioca, que mejora la textura y disminuye su sequedad (Mancebo et al., 2015b; Gómez, 2021; Innograin, 2021). Al emplearse harinas sin gluten, la elección más recurrente es la de arroz, debido a su menor precio, mayor disponibilidad, sabor suave y propiedades hipoalergénicas. Al igual que el almidón de tapioca, mejora la textura y disminuye la sequedad (Mancebo et al., 2015b; Gómez y Román, 2018; Gómez, 2021). Conociendo los ingredientes, pueden combinarse para obtener las características deseadas en el producto final. La harina de arroz da lugar a panes con menor volumen específico y masas con parámetros reológicos menos favorables que los elaborados con almidón de maíz (Martínez y Gómez 2017), pero en su combinación se observa una mejora en el sabor y el aspecto externo de los panes (Mancebo et al. 2015a).

Los hidrocoloides se engloban dentro del grupo de las fibras hidrosolubles. Estas se disuelven en la fase acuosa, envuelven las partículas de almidón y de harina y crean una estructura interna más uniforme, que también retiene mejor el CO₂. De igual modo, por su gran capacidad de absorción de agua y propiedades espesantes, aumentan la viscosidad de la masa y evitan la sedimentación del almidón y de la levadura, y con ello la coalescencia de las burbujas de aire (Mariotti et al., 2013b). Este cambio en la consistencia de la masa contribuye a la extensibilidad y retención de gas perdidas con la ausencia de gluten. No obstante, una mayor viscosidad de la masa está también relacionada con su menor desarrollo, según los estudios de Mariotti et al. (2013b) y Martínez et al. (2014). A diferencia del caso de los panes de trigo, en la elaboración de panes sin gluten no es posible obtener el valor de la hidratación óptima mediante el farinógrafo, ni se relaciona con unos valores de reología concretos, por lo que es crucial estudiar el óptimo de hidratación para cada formulación en concreto. También ha de tenerse en cuenta la influencia del tamaño de partícula (Lundberg et al, 2013; Martínez et al., 2014)., así como su interacción con otros ingredientes alimentarios (Willats et al., 2006; Saha y Bhattacharya 2010; BeMiller 2011), y la influencia de las condiciones del

medio (Belorio y Gómez, 2022). Las fibras dietéticas también contribuyen al aumento de vida útil de los panes porque retrasa la retrogradación del almidón y disminuye el endurecimiento del pan (Tsatsaragkou et al., 2016; Askari et al., 2018). Su adición aumenta los beneficios nutricionales del producto (Bosscher et al., 2006; Hu et al., 2011; Li y Nie, 2015; Tsatsaragkou et al., 2016;) y supone la posibilidad de añadir una declaración de propiedades saludables, reconocidas bajo el Artículo 13.1 de la EFSA (R (UE) nº 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, del 20 de diciembre de 2006). Por su relevancia en este proyecto, cabe destacar entre los hidrocoloides la hidroxipropil metil celulosa (HPMC) y el psyllium, junto a aquellos de uso más generalizado entre los productos sin gluten, como la xantana y la goma guar (Gómez y Román, 2018; Román et al., 2019). Al igual que en el caso de los almidones y harina, la mejor opción para obtener los resultados deseados es emplear la mezcla de hidrocoloides que más se adecúen (Tsatsaragkou et al., 2015; Belorio y Gómez, 2022).

La HPMC es el hidrocoloide más utilizado para lograr las mismas funciones que el gluten (Belorio y Gómez, 2022) y en general da lugar a panes con mayor volumen que otros hidrocoloides (Sabanis y Tzia 2011). Con calentamiento, los derivados de la celulosa forman una estructura de red que aumenta la retención de gas y favorece una estructura continua y elástica. (Hager y Arendt, 2013; Mariotti et al., 2013a; Moreira et al., 2013; Mancebo et al., 2015a, Tsatsaragkou et al., 2015; Gómez y Román, 2018, Gómez, 2021). También reduce la difusión de agua en el producto, y por tanto su pérdida, lo que conlleva el retraso del endurecimiento del pan y aumento de su vida útil. No obstante, los panes que incluyen HPMC presentan una textura más seca y desmenuzable, por lo que es aconsejable combinarlo con otros hidrocoloides con mayor capacidad de capacidad de retención de agua.

Actualmente se está empleando el psyllium; un hidrocoloide de origen natural procedente de las semillas de *Plantago ovata*, que presenta numerosos e interesantes beneficios sobre la salud (Singh 2007; Theuwissen y Mensink, 2008; Warnberg et al., 2009; Gunness y Gidley, 2010; Nie et al., 2018; Belorio y Gómez, 2022). Está compuesto principalmente por fibra soluble, en concreto arabinosilanos (Innograins, 2020). En la industria alimentaria permite la incorporación de mayor porcentaje de agua en los productos, y con ello la disminución de otros ingredientes y sus calorías (Belorio y Gómez, 2022). Además no se considera aditivo, por lo que facilita el desarrollo de los productos de etiqueta limpia o “clean label” (Gómez y Román, 2018) tan demandados actualmente (Aschemann-Witzel et al., 2013; Román et al., 201; Verain et al., 2016; Vidal, 2018; Janssen 2018; Pagán, 2021). En la aplicación a panes sin gluten se ha probado la mejora de sus características y aceptación de los consumidores (Mariotti et

al., 2009; Zyonadi et al, 2009; Cappa et al. 2013, Belorio et al, 2020; Belorio y Gómez, 2022); también en aquellos que incluían HPMC (Haque et al., 1993; Mancebo et al., 2015a). Pero a pesar de sus múltiples propiedades, el psyllium presenta algunas desventajas: textura excesivamente gomosa en los productos, problemas de contaminación y elevado coste (Belorio y Gómez, 2022), entre otros.

Existe un subproducto de la industria alimentaria que, por su contribución a la sostenibilidad medioambiental, reducción de costes de producción, propiedades tecnológicas, y beneficios nutricionales y de etiqueta limpia, es una potencial muy buena opción como ingrediente en la elaboración de panes sin gluten. Se trata de la fibra cítrica. Esta se obtiene fundamentalmente a partir de la corteza en la industria del procesado de cítricos (Marín et al., 2007). Esta se compone básicamente de pectinas y celulosa. La estructura ramificada y cadenas laterales largas de la pectina, contribuyen a las propiedades de hidratación rápida, Además la naturaleza cargada de sus componentes promueve la reticulación entre cadenas, con lo que aparecen sus propiedades de captación de agua (Willats et al., 2006; Sila et al., 2009), Por otro lado, la celulosa presenta estructura ramificada y amorfa que contribuye al aumento de viscosidad (Valdés, 2006).

Actualmente por sus propiedades tecnológicas se está estudiando principalmente en la industria cárnica (Lundberg, 2005; Qi et al., 2021; Rivera y Flores, 2022). Sin embargo, son limitados los estudios sobre su incorporación en pan: Miller (2011) y Spina et al (2019) lo centran en panes de trigo, Ozturk y Mert (2018) no optimizan la hidratación de las masas, Korus et al (2020) proponen su incorporación en fórmulas que contaban con otros hidrocoloides, y O'Shea et al. (2015) emplean porcentajes de fibra cítrica muy bajos. Además, todos ellos coinciden en la necesidad de mejora de textura en el producto final. No obstante, también incitan a seguir estudiando su uso, pues los productos finales presentan propiedades de horneado y puntuaciones de evaluación sensorial aceptables (Korus et al., 2012; O'Shea et al, 2015); además de una composición nutricional mejorada (Matos y Rosell, 2015; Mir et al., 2015). Su elevada capacidad de retención de agua lo convierte en un hidrocoloide potencialmente adecuado para su combinación con la HPMC y reemplazar al psyllium.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA.

Objetivo general:

Desarrollar una formulación de pan sin gluten que incorpore fibra cítrica con características organolépticas adecuadas. Se espera que por su capacidad de retención

de agua aporte estructura y extensibilidad a la masa y aumente la retención del gas producido durante la fermentación.

Objetivos específicos:

- Estudiar las propiedades físicas y morfología de la fibra cítrica y su dilución con almidón a distintos porcentajes.
- Comparar las propiedades de la fibra cítrica con el de otras fibras empleadas actualmente en panes sin gluten: psyllium y celulosa.
- Determinar la hidratación óptima de las distintas formulaciones de panes a estudiar.
- Estudiar la influencia de la fibra cítrica a distintos porcentajes sobre las características de los panes.
- Comparar los parámetros con los de panes elaborados con psyllium a distintos porcentajes, y con mezcla de ambas fibras, a distintos porcentajes de mezcla.
- Relacionar las propiedades estudiadas en los ensayos sobre fibras con las características de los panes elaborados.
- Estudiar el envejecimiento de los panes en base a la variación en el perfil de textura de la miga y la aparición de moho.
- Determinar la adecuación de la fibra cítrica para su combinación con HPMC
- Determinar su adecuación de la fibra cítrica para la sustitución del psyllium en panes sin gluten.

MATERIALES Y MÉTODOS

ENSAYOS SOBRE FIBRAS

Se llevó a cabo un estudio de las propiedades de las fibras: celulosa, cítrica y psyllium. Para ello, se mezclaron con almidón de maíz, en porcentajes del 3, 6 y 9 % cada una. Como control de las pruebas se empleó almidón de maíz al 100%.

Cada muestra y el control se analizaron por duplicado:

- Propiedades de hidratación: Water Binding Capacity (WBC) y Water Holding Capacity (WHC), o capacidades de retención de agua con y sin estrés en centrifugadora, respectivamente.
- Propiedades de empastado del almidón: curva de viscosidad- tiempo- temperatura.
- Perfil de textura del gel a las 24 horas: dureza o fuerza necesaria para alcanzar determinada deformación.
- Color del gel a las 24 horas: luminosidad (L^*), croma del espectro verde-rojo (a^*) y azul-amarillo (b^*) del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.
- Imagen de microscopio electrónico.

Para ello se emplearon los siguientes materiales:

- Psyllium Vitacel (Rettenmaier Iberica, Barcelona, España)
- Fibra Cítrica Vitacel (Rettenmaier Iberica, Barcelona, España)
- Celulosa (fibra de trigo) Vitacel (Rettenmaier Iberica, Barcelona, España)
- Almidón de maíz (Tereos, Syral Iberia SAU, Zaragoza, España)
- Agua destilada

Propiedades de hidratación

La WHC se determinó siguiendo el método de De la Hera et al. (2014). Se tomó como control una suspensión de 5 g ($\pm 0,1$ g) de almidón en 100 mL de agua destilada, en probetas de plástico de 200 ml. Se elaboraron y pesaron las mezclas muestra (W_0). Se sometieron a un período de reposo de 24 horas a temperatura ambiente. Se decantó el sobrenadante y se obtuvo el peso del residuo (W_f). El peso de la muestra inicial seca (W_0) y el peso de la muestra hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) se emplearon para calcular la WHC mediante la Ecuación 1 (Marcondes y Gómez, 2018).

Ecuación 1: fórmula para el cálculo de la capacidad de retención de agua (WHC).

$$WHC = \frac{W_f - W_0}{W_0} = \frac{g}{g_0}$$

La WBC se determinó mediante el método *AACC method 56-30.01* (AACC, 2012a) sobre el que se aplicaron algunas variaciones, pues la muestra con Celulosa al 9% absorbió todo el agua tras centrifugación y no se obtuvo precipitado. Se tomó como control una suspensión de 1,5 g ($\pm 0,1$ g) de almidón en 25 mL de agua destilada, en un tubo falcon de 50 ml. Se elaboraron y pesaron las mezclas muestra (W_0). Las suspensiones se homogeneizaron en el vortex (modelo MS2 Minishaker, de IKA) y a continuación se centrifugaron a una velocidad de 4000 rpm (2320 g) durante 15 minutos (centrífuga modelo Bunsen Koch 1460, Madrid, España) (Mancebo et al., 2016). Se decantó el sobrenadante y se obtuvo el peso del residuo (W_f). El peso de la muestra inicial seca (W_0) y el peso de la muestra hidratada tras retirar el exceso de agua (W_f) se emplearon para calcular la WBC a través de la Ecuación 2 (Marcondes y Gómez, 2018).

Ecuación 2: fórmula para el cálculo de la capacidad de retención de agua tras la centrifugación (WBC).

$$WBC = \frac{W_f - W_0}{W_0} = \frac{g}{g_0}$$

Propiedades de empastado

El perfil de viscosidad de las diferentes fibras se analizó sometiendo las mezclas muestra a un ciclo térmico mediante el Rapid Visco Analyser (modelo RVA-4C, de

Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, Australia), siguiendo el método *AACC method 76-21.02* (AACC, 2012b; Guerra, 2022).

Se obtuvo la curva viscosidad-tiempo-temperatura de cada una de las muestras y control.

Perfil de Textura

Para realizar el ensayo de Perfil de Textura, en primer lugar se elaboraron geles en el RVA siguiendo el método *AACC method 76-21.02* (AACC, 2012b) con 24 horas de antelación. Los geles se vertieron aún calientes en recipientes de plástico cilíndricos de 100 mm de diámetro interno y 20 mm de altura, y se mantuvieron en refrigeración a 4 °C durante 24 horas. Tras el enfriamiento y previa realización del ensayo, los geles se aatemperaron durante 20 minutos a temperatura ambiente.

La dureza de los geles se midió someténdolos a un ciclo de compresión en el texturómetro (modelo TA.XT2i Texture Analyzer, de Stable Micro Systems Ltd., Surrey, Reino Unido) equipado con el software Texture Expert versión 1 para Windows. Para ello se montó con una carga de 5 kg y una sonda cilíndrica de 50 mm de diámetro, y se calibró con una distancia de retorno de 50 mm, velocidad de retorno de 20 mm/s, y fuerza de contacto de 5g.

Se obtuvo una curva fuerza-tiempo, y se seleccionó el dato del Pico positivo de fuerza (N), que es el primer pico de fuerza observado durante la compresión (Bravo et al., 2019)

Color de geles

El color de los geles se midió con el colorímetro PCE-CSM 2 (PCE Instruments, Meschede, Alemania) empleando el iluminante D65 con un observador estándar de 2°. Se obtuvieron los parámetros L^* , a^* y b^* , el tono $h^* = \arctg(b/a^*)$, y la saturación $C^* = ((a^*)^2 + (b^*)^2)^{1/2}$ (Fernández et al., 2021).

Análisis estadístico

Los resultados se evaluaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA simple) utilizando el software Statgraphics Centurion XVII (StatPoint Technologies, Warrenton, EE.UU.). Se utilizó la prueba de diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher para diferenciar las medias con un nivel de significación del 95% ($p < 0,05$).

DETERMINACIÓN DE HUMEDA ÓPTIMA Y MÉTODO DE ELABORACIÓN DE PANES.

Las formulaciones de las muestras de panes y el control se muestran en la Tabla 1.

Se estableció emplear la hidratación que permita obtener el máximo volumen específico de cada formulación, entendida como hidratación óptima. Para determinarla, se realizaron pruebas con distintos porcentajes de agua para cada formulación, y se midió

el volumen específico de los panes obtenidos (Figura 2).

Tabla 1. Formulación de las muestras de pan previo a determinación de su humedad óptima.

Ingredientes	CONTROL	PSY 3%	PSY 6%	FC3%	FC 6%	PSY 3%+ FC 3%	PSY 6% + FC 6%
Agua		x	x	x	x	x	x
Harina de arroz	160	160	160	160	160	160	160
Almidón de maíz	160	160	160	160	160	160	160
Almidón de tapioca	80	80	80	80	80	80	80
Aceite de girasol	24	24	24	24	24	24	24
Azúcar blanco	20	20	20	20	20	20	20
Levadura	12	12	12	12	12	12	12
Sal	8	8	8	8	8	8	8
HPMC	8	8	8	8	8	8	8
Psyllium	-	12	24	-	-	6	12
Fibra cítrica	-	-	-	12	24	6	12

PSY: psyllium, FC: fibra cítrica.

Se utilizó una mezcladora Kitchen-Aid Artisan (5KSM150, KitchenAid, St. Joseph, Michigan, EE.UU.) con un gancho de la pasta (K45DH). Se mezclaron los ingredientes, excepto la levadura y el agua, a velocidad 1 durante 1 minuto. Se hidrató la levadura con el agua a temperatura constante de 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). Se mezclaron todos los ingredientes a velocidad 2 durante 8 minutos parando cada minuto para remover, hasta llegar a los últimos tres minutos de amasado continuo. Las masas se colocaron en moldes de aluminio de 159 x 109 x 39 mm (Gustav Ehlert GmbH & Co, Gütersloh, Alemania), en 5 porciones de 150 gramos. Se introdujeron en la cámara fermentadora FC-K (Salva, Lezo, España) a 30°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) y 95% de humedad, durante 60 minutos. A continuación se cocieron en un horno eléctrico modular (Salva, Lezo, España) a 190°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) durante 40 minutos. Una vez horneados se desmoldaron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 60 minutos. Se anotó el peso 1 hora tras horneado. Se envasaron en bolsas de polietileno selladas para prevenir la deshidratación y se introdujeron en la cámara de temperatura ambiente a 20 °C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

En la elaboración de masas destinadas al ensayo de reología, se procede al mezclado de ingredientes de igual modo pero omitiendo la adición de levadura. Finalizado el amasado, las muestras se analizan inmediatamente.

Se consideran pertenecientes a una única repetición a los 5 panes resultantes de una sola elaboración (Tabla 1). La muestra empleada en cada ensayo se recoge de forma esquemática en la Figura 1 del Anexo 1.

Una hora tras el horneado, con los 5 panes se obtiene el dato de una repetición de pérdida de peso (%). Los 5 panes obtenidos se almacenan durante 24 horas para obtener los datos de una repetición de volumen específico. Con dos de ellos, a su vez, se obtiene una repetición del perfil de textura de la miga, medidas de color de corteza y miga, y análisis de imagen de la rebanada. Otros dos panes se conservan durante 7 días para obtener datos de envejecimiento, a través del perfil de textura de la miga (una repetición) y aparición de moho. El quinto pan se congela. El diagrama de flujo de elaboración de los panes, incluyendo los ensayos a realizar, se recoge en la Figura 1 del Anexo 2.

ENSAYOS SOBRE PANES

Se estudió la influencia de la incorporación de las fibras: cítrica y psyllium a panes sin gluten. Para ello, se incorporaron individualmente en los porcentajes 3 y 6%; y mezcladas en los porcentajes 1,5 y 3% de cada una (Tabla 1), con la hidratación óptima determinada para cada una (Tabla 6). Como control se empleó la formulación sin la adición de ninguna fibra.

- Reología de masas: módulo elástico o capacidad de almacenar energía (G'), módulo viscoso o capacidad de disipar energía (G''), amortiguación ($\tan\delta = G''/G'$), y módulo complejo o resistencia general a la deformación (G^*).
- Pérdida de peso (%) a las 24 horas.
- Volumen específico a las 24 horas.
- Perfil de textura de la miga a las 24 horas y 7 días: dureza o fuerza necesaria para lograr una deformación determinada, cohesividad o resistencia a la segunda deformación respecto a una primera, y resiliencia o capacidad de volver a la forma original.
- Color de corteza y miga: luminosidad (L^*), croma del espectro verde-rojo (a^*) y azul-amarillo (b^*) del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.
- Imagen de rebanada.
- Focus group
- Presencia de moho a los 7 días.

Para ello se emplearon los siguientes materiales:

- Harina de arroz de grano grueso (Harinera Castellana Fraga S.A., Medina del Campo, España)
- Almidón de maíz (Tereos, Syral Iberia SAU, Zaragoza, España)
- Agua procedente de la red local
- Aceite refinado de girasol Langosta (Daimiel, España)

- Azúcar blanquilla (Acor, Valladolid, España)
- Levadura seca Eagle (Palenzuela, Palencia, España)
- Sal refinada seca (Esco European Salt Company, Niedersachsen, Alemania)
- Hidroxipropilmetilcelulosa Vivapur K4M Food grade (JRS, Rosenberg, Alemania)
- Psyllium Vitacel (Rettenmaier Iberica, Barcelona, España)
- Fibra Cítrica Vitacel (Rettenmaier Iberica, Barcelona, España)
- Vaselina Panreac (Panreac Química SA, Castellar del Vallés, España).

Propiedades Reológicas

Las propiedades dinámicas viscoelásticas y de flujo constante se determinaron realizando un ensayo en dos partes: barridos de deformación a frecuencia constante (1 Hz), y barridos de frecuencia (0.01–100 Hz) a deformación constante dentro del rango viscoelástico lineal. Se utilizó un reómetro de esfuerzo controlado Thermo Scientific Haake RheoStress 1 (Thermo Fischer Scientific, Scheverte, Alemania), conectado a una unidad de control de temperatura (30°C) Phoenix II P1-C25P, y equipado con platos de titanio de superficie rugosa y 60 mm de diámetro colocados en paralelo (PP60Ti).

Con el barrido de deformación se determinó la región viscoelástica lineal (Fernández et al., 2021) y se identificó un valor del esfuerzo (τ) en el cual G' y G'' se mantuvieran constantes (pendiente 0). Este dato se empleó en el barrido de frecuencias, del que se obtuvieron los valores de G' , G'' y $\tan \delta$ en función de la frecuencia (f) (Rivera y Gómez, 2015; Marcondes y Gómez, 2018).

Pérdida de peso

Los pesos de las masas introducida en los moldes y 1 hora tras el horneado se obtuvieron con una balanza TE 6101 Sartorius (Goettingen, Germany). Con ambos datos se obtuvo el porcentaje de pérdida de peso siguiendo la Ecuación 3 (Suances y Gómez, 2013).

Ecuación 3: fórmula para el cálculo pérdida de peso de los panes tras el horneado.

$$(\text{Peso (g) 1 h tras horneado}-\text{Peso masa (g)}) * 100 / 150$$

Volumen específico

El volumen del pan se determinó utilizando un analizador de volumen Volscan Profiler (Stable Micro Systems, Godalming, UK). El peso de los panes a las 24 horas del horneado se obtuvo con una balanza TE 6101 Sartorius (Goettingen, Germany). Con ambos datos se obtuvo el volumen específico de los panes a través de la Ecuación 4 (Suances y Gómez, 2013).

Ecuación 4: fórmula para el cálculo del volumen específico de los panes a las 24 horas de su elaboración.

$$\text{Volumen específico (ml/g)} = \text{Volumen (ml)} / \text{Peso 24 h (g)}.$$

Perfil de textura

Para determinar el perfil de textura de la miga se realizó en un ensayo de doble compresión "Texture Profile Analysis" (TPA), con un TA-XT2 Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) provisto con el software "Texture Expert", sobre rebanadas de 30 mm de grosor. Se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 25 mm de diámetro y las condiciones del ensayo de Gómez et al. (2007).

Color de corteza y miga

El color se midió a través del espectrofotómetro PCE-CSM 2 (PCE Instruments, Meschede, Alemania). Se utilizó un iluminador estándar D65 y un observador estándar de 2° (San Miguel y Gómez 2012). El color de la corteza se midió en los lados opuestos del pan, y el color de la miga se midió en el punto central de la rebanada.

Imagen de rebanada

Se utilizó un escáner HP Scanjet G3110 (HP, Palo Alto, EEUU).

Focus group

Para evaluar las características organolépticas de las muestras se convocó un grupo de discusión integrado por cuatro expertos de entre 24 y 60 años. Se habilitó una sala con espacio y luminosidad adecuados y agua potable. Se presentaron dos rebanadas de cada muestra para cada experto, codificadas con números de 3 dígitos. En primer lugar se realizó una valoración individual por escrito, se hizo una puesta en común y discusión, y finalmente se registraron las decisiones. Se realizó una evaluación visual de corteza, volumen y alveolado, olfativa y gustativa.

Presencia de moho

Se comprobó la presencia o ausencia de moho a los 7 días mediante recuento visual.

Análisis estadístico

Los resultados se evaluaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA simple) utilizando el software Statgraphics Centurion XVII (StatPoint Technologies, Warrenton, EE.UU.). Se utilizó la prueba de diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher para diferenciar las medias con un nivel de significación del 95% ($p < 0,05$)

RESULTADOS

FIBRAS

Propiedades de hidratación y perfil de textura

Los valores relativos a la capacidad de retención de agua con (WBC) y sin (WHC) estrés de fibras y dureza de geles se muestran en la Tabla 2. Los datos se recogen de forma gráfica en el Anexo 4.

La retención de agua de la celulosa no varió respecto al control en ningún caso. Tampoco aumentó la WHC de las muestras con fibra cítrica. Sí aumentó la WBC en las muestras con fibra cítrica y psyllium y en mayor medida según se aumentó el porcentaje de fibra, excepto en la muestra de fibra cítrica al 6% que no varió respecto al control. En las muestras al 3% ambas fibras muestran el mismo valor de WBC, pero al 9% la WBC del psyllium fue mayor.

En la Figura 1 del Anexo 3 se observa que el almidón posee estructura de red, que probablemente se mantenga intacta al centrifugar, y por ello su WBC y WHC no varían. Sin embargo las fibras poseen estructura lineal, y puede ser que al someter a estrés 1) la fibra se rompa y por tanto sea mayor la superficie disponible para retener agua o 2) que las fibras se reorganicen e interaccionen entre sí, formándose una estructura de red que recoge agua

Según Lundberg et al. (2013), con un tamaño de partícula menor habría un aumento de sitios de unión de agua, de grupos polares y de superficie, lo que aumentaría la capacidad de retención de agua.

Willats et al., (2006) señalaron que el ácido galacturónico de la pectina es un monosacárido con radicales metoxilo entre los que se establecen puentes de hidrógeno y fuerzas hidrofóbicas, promovidos por la adición de sacarosa. Esto da lugar a una estructura de red que retiene el agua. También que gracias a la estructura ramificada y generalmente amorfa de la hemicelulosa, presenta una alta captación de agua. El anterior estudio de Lundberg et al. (2013) también mostró en imágenes al microscopio cómo las fibras captan agua en sus estructuras de red y se expanden, con lo que el agua no está simplemente ligada a la superficie de la fibra

Debe tenerse en cuenta que debido a la naturaleza parcialmente soluble de la fibra cítrica, parte puede perderse en los métodos de capacidad de retención de agua que descartan el sobrenadante, lo cual hace cuestionarse los resultados obtenidos, sobre todo respecto a la WHC.

La dureza de los geles no varió en las muestras con celulosa y psyllium al 3%, pero sí disminuyó en el resto de muestras. Las muestras con fibra cítrica presentaron el menor

valor de dureza, seguidas de las de psyllium, y por último las de celulosa, independientemente del porcentaje de incorporación. Esto podría deberse a 1) la influencia de las fibras sobre la microestructura de los geles y 2) influencia de la retrogradación durante el almacenamiento.

En la figura 2 del Anexo 3 se observa que el almidón presenta estructura “de colmena”, con celdas pequeñas y organizadas, que podría ser más resistente a la ruptura. Los geles de fibra cítrica y psyllium presentan una estructura más irregular, sin delimitación clara y celdas más grandes, lo que podría debilitar su dureza. Esto coincide con los resultados del estudio de Askari et al. (2018).

Tsatsaragkou et al. (2016) mostraron que las fibras dietéticas retrasaron el fenómeno de retrogradación del almidón, y lo asociaron a un mayor contenido en agua, consecuencia de la elevada capacidad de hidratación de las fibras. El ya mencionado estudio de Askari et al. (2018) también achacó las diferencias en la dureza de los geles con fibras a diferencias en la movilidad del agua y la reorganización de las moléculas de almidón durante el almacenamiento. Por otro lado, la adición de fibra disminuye el contenido en almidón, disminuyendo así la retrogradación.

Tabla 2. Capacidad de retención de agua con (WBC) y sin (WHC) estrés de las mezclas de fibras en diferentes porcentajes con almidón de maíz. Dureza de sus geles.

Muestra	WBC (g agua/ g sólido)	WHC (g agua/ g sólido)	Dureza (N)
Control	0,84 ± 0,01a	2,59 ± 0,22a	35,51 ± 6,02g
Celulosa 3%	1,12 ± 0,03a	2,69 ± 1,67a	33,85 ± 1,27fg
Celulosa 6%	1,01 ± 0,13a	1,32± 0,26a	28,46 ± 2,19def
Celulosa 9%	1,11 ± 0,07a	1,13± 1,01a	26,89 ± 1,84cde
Fibra cítrica 3%	1,69 ± 0,05b	2,56 ± 0,52a	21,94 ± 0,27bc
Fibra cítrica 6%	0,96 ± 0,05a	2,08 ± 0,19a	17,07 ± 0,92ab
Fibra cítrica 9%	3,35 ± 0,31d	2,57 ± 2,17a	14,08 ± 3,17a
Psyllium 3%	1,69 ± 0,19b		29,46 ± 6,44efg
Psyllium 6%	3,02 ± 0,04c		17,87 ± 1,20ab
Psyllium 9%	3,98 ± 0,09e		22,03 ± 1,07bcd

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). WBC: capacidad de retención de agua sin estrés, WHC: capacidad de retención de agua con estrés, N: Newton.

Propiedades de empastado

El perfil de viscosidad de las muestras y el control se muestran en la Figura 1.

Las mezclas con celulosa no presentaron grandes diferencias a lo largo de la curva de empastado respecto al control. El valor del pico de viscosidad de las muestras con celulosa disminuyó ligeramente a medida que aumentó el porcentaje de la fibra.

Las muestras con fibra cítrica alcanzaron un valor de viscosidad mayores que el control, tanto en el pico como al final del ensayo, de nuevo debido a su contenido en pectina y celulosa (Willats et al., 2006; Sila et al., 2009). No presentó diferencias entre porcentajes, lo cual podría deberse a que los componentes insolubles de la fibra cítrica,

al ser insensibles al calor, ayudan a estabilizar la viscosidad a medida que aumenta la temperatura (Lundberg et al, 2013)

Las muestras con psyllium alcanzaron un valor de viscosidad notablemente mayores que el control, tanto en el en el pico como al final del ensayo; sin diferencias entre las muestras al 3 y 6%, e incrementado al 9%. Las muestra con psyllium al 6 y 9% presentaron un comportamiento muy diferente a todas las anteriores por su curva “dentada”, más marcada al 9%. Esta irregularidad se debe, según Belorio et al. (2020), a la formación de estructuras rotas (tipo gel). Esto, sumado al mayor valor de viscosidad y al retraso en la temperatura de gelatinización, podría estar relacionado con la baja disponibilidad de agua (BeMiller, 2011; Belorio et al., 2020). La tendencia al retraso de la gelatinización al aumentar el porcentaje de psyllium podría estar asociada a la formación de complejos con la amilopectina,(Belorio y Gómez, 2022), lo que influiría también en un retraso en la retrogradación.

Los valores de viscosidad al final del ensayo fueron mayores en las muestras con psyllium. El psyllium podría tener un tamaño menor de partícula (Lundberg et al., 2013, Tampoco existieron grandes diferencias de viscosidad entre las muestras con fibras y el control, y sin embargo sí hubo diferencias en la dureza del gel obtenido a las 24 horas de su elaboración. Con esto se podría reforzar la idea sobre el efecto de las fibras sobre la retrogradación (Tsatsaragkou et al., 2016; Askari et al., 2018).

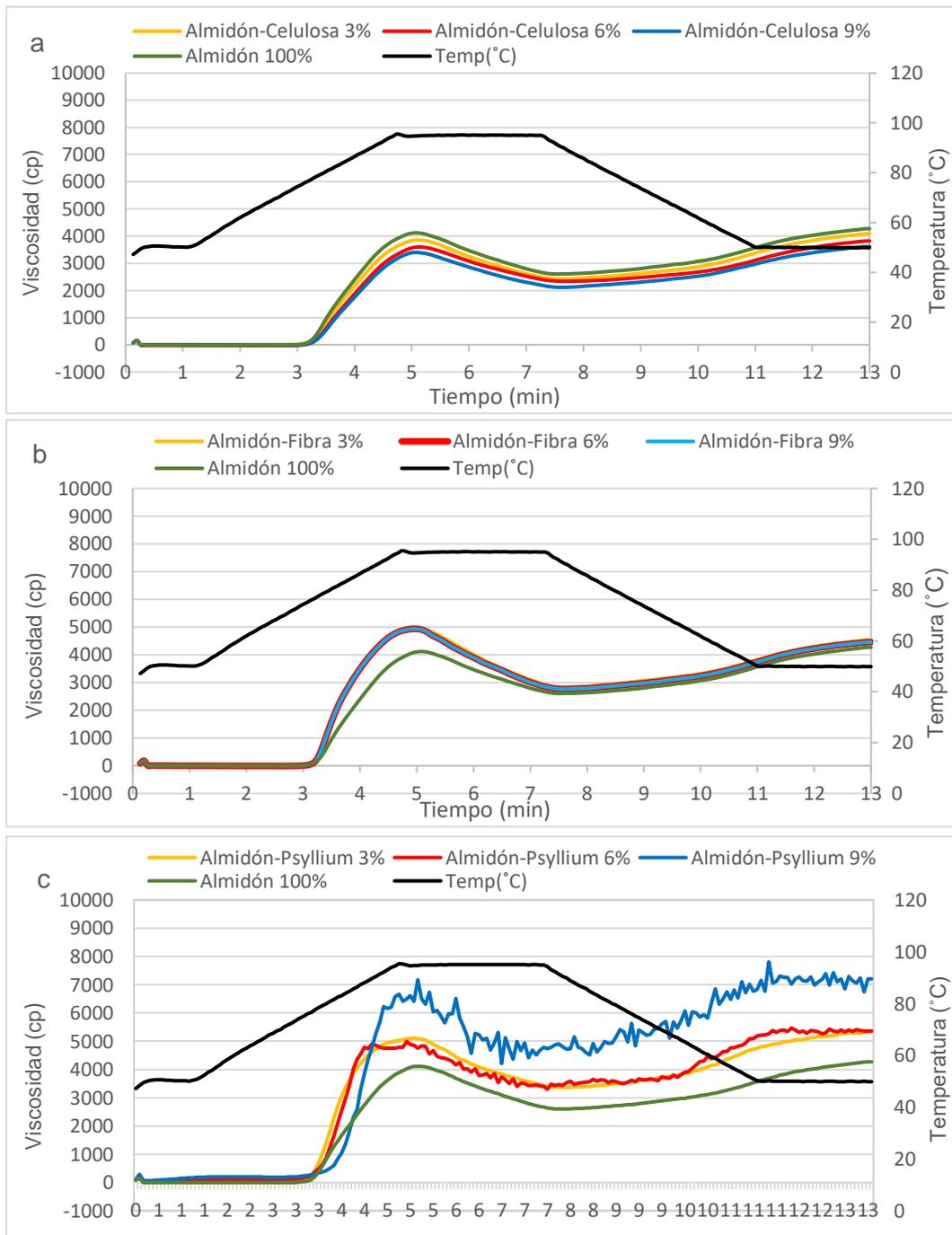


Figura 1: Propiedades de gelificación del almidón en función de la adición de fibras: celulosa (a), fibra cítrica (b) y psyllium (c) en diferentes porcentajes.

Color de geles

Los valores de los parámetros de color de geles se encuentran recogidos en la Tabla 3. Ninguna muestra presentó diferencias significativas en los valores de a^* y L^* respecto al control. La presencia de fibras en alto porcentaje modifica el valor de b^* . Los geles no se formaron a temperaturas superiores a 100°C , por lo que no se produjeron reacciones de Maillard o de caramelización, y el color de los geles depende principalmente del color

de los sólidos. Por tanto las fibras presentan un croma amarillo-azul diferente. También hubo diferencias entre los porcentajes más altos y más bajos de cada fibra.

Tabla 3. Parámetros de color de geles elaborados con diferentes porcentajes de sustituciones de almidón de maíz por celulosa, fibra cítrica y psyllium

Muestra	Color geles				
	L*	a*	b*	C*	h*
Control	53,72 ± 2,64ab	-4,420 ± 0,38ab	-7,98 ± 1,34ab	9,14± 1,29cd	240,69± 3,25b
CEL 3%	52,94 ± 0,08ab	-4,83 ± 0,11a	-8,73 ± 0,14a	9,98 ± 0,18d	241,06 ± 0,11abc
CEL 6%	53,54 ± 0,81ab	-4,08 ± 0,22cd	-7,57 ± 0,28abc	8,59 ± 0,35bcd	241,71 ± 0,40abc
CEL 9%	54,545 ± 0,08 ab	-3,76 ± 0,04de	-6,41 ± 0,09cd	7,43 ± 0,06ab	238,35± 0,62ab
FC 3%	52,76 ± 0,95ab	-4,91 ± 0,04a	-7,96 ± 0,08ab	9,35 ± 0,09cd	238,33 ± 0,04ab
FC 6%	53,825 ± 1,61ab	-4,34 ± 0,18bc	-7,17 ± 0,95bcd	8,39 ± 0,72bc	238,67 ± 4,39ab
FC 9%	51,82 ± 0,86a	-4,68 ± 0,06ab	-4,82 ± 0,22e	6,71 ± 0,19a	225,83 ± 0,97a
PSY 3%	55,67 ± 3,32b	-4,49 ± 0,12abc	-7,49 ± 0,07abc	8,73 ± 0,00bcd	239,06 ± 0,93ab
PSY 6%	53,62 ± 0,48ab	-3,81 ± 0,18de	-6,33± 0,76cde	7,39 ± 0,74ab	256,83 ± 23,62c
PSY 9%	51,49 ± 1,09a	-3,59 ± 0,24e	-5,82 ± 0,23de	6,84 ± 0,32a	238,35 ± 0,61ab

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). PSY: psyllium, FC: fibra cítrica, CEL: celulosa

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD ÓPTIMA DE CADA PAN

Los datos de las pruebas de hidratación se recogen en la Tabla 1 del Anexo 5. Las curvas hidratación (%) volumen específico (ml/g) se presentan en la Figura 2. Las humedades óptimas seleccionadas se encuentran en la Tabla 6.

En las curvas obtenidas se confirma que cuanto mayor es la hidratación, menor es la viscosidad, y mayor la expansión de los panes; hasta cierto punto en que esta es excesiva y las masas caen durante la fermentación u horneado, de acuerdo con los estudios de Mancebo et al. (2017) y Sahagún y Gómez (2018).

El hecho de que las muestras con fibra cítrica requieran una mayor hidratación para alcanzar el máximo volumen podría deberse al menor valor de WBC de esta fibra.

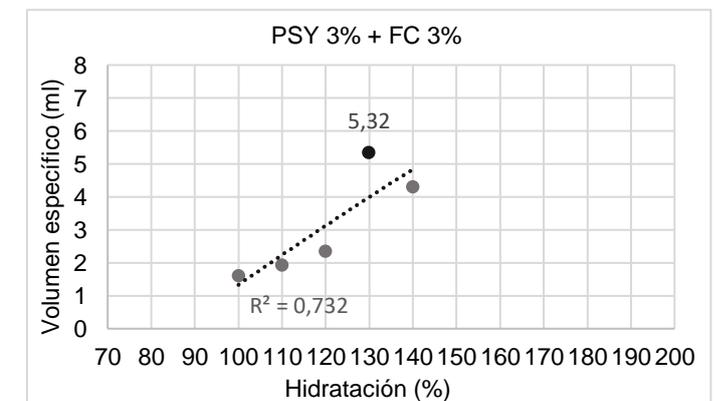
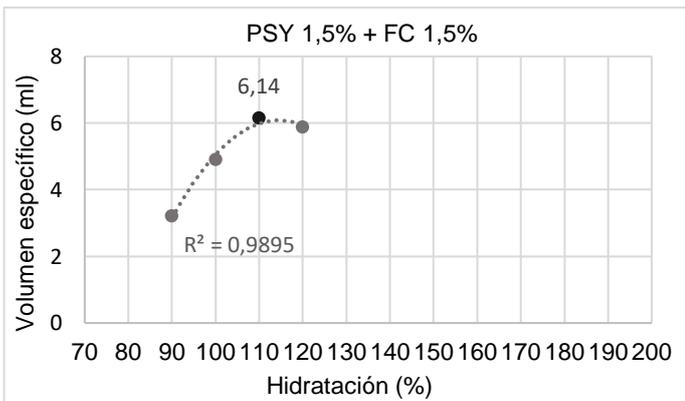
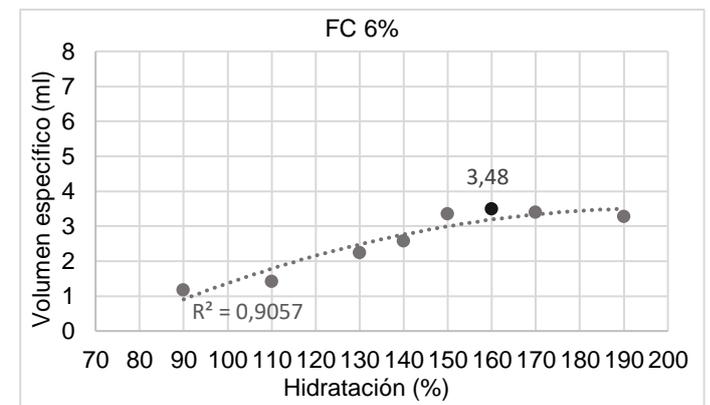
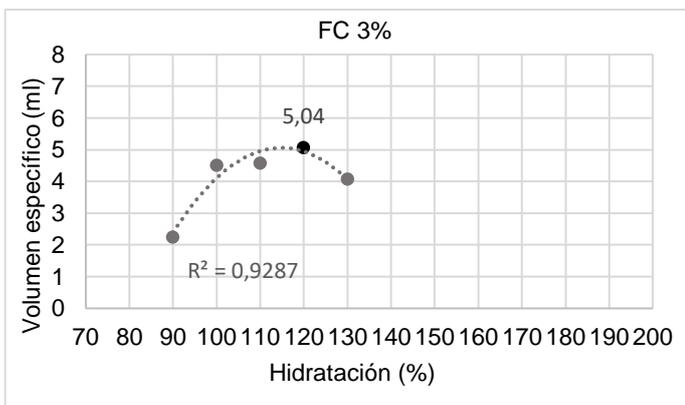
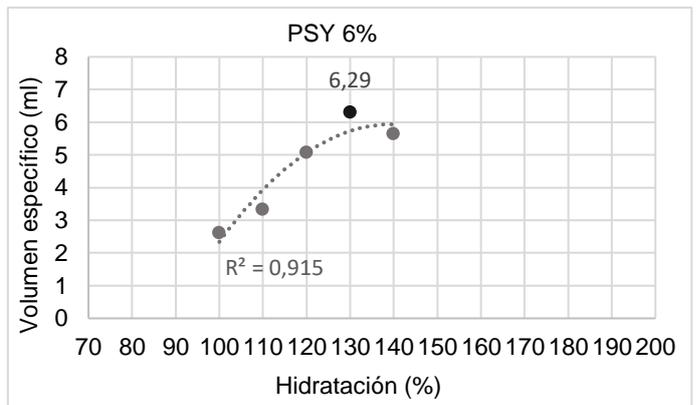
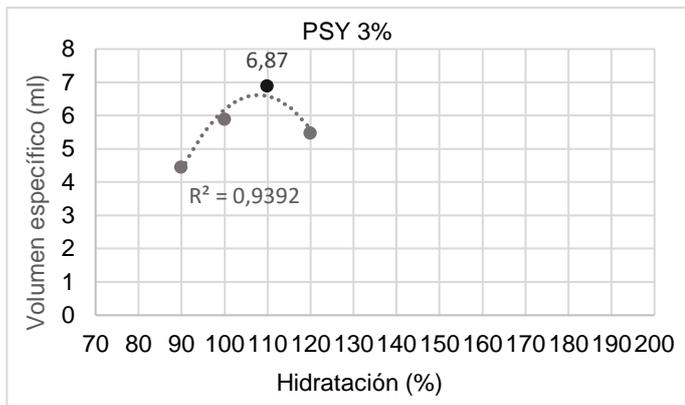
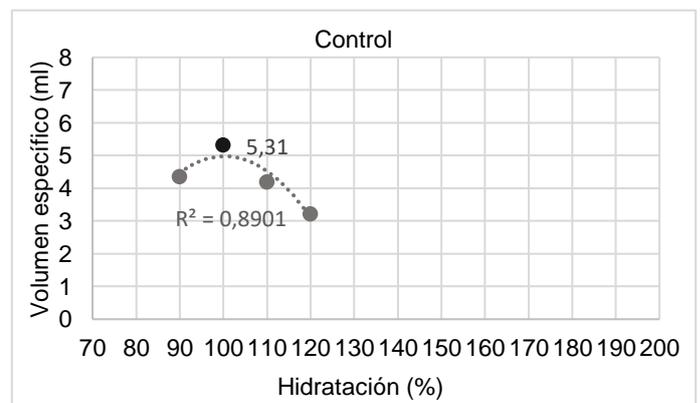


Figura 2: Curvas hidratación-volumen específico de los panes elaborados con las fibras psyllium (a) (b), fibra cítrica (c) (d) y sus mezclas (e) (f) en diferentes concentraciones. Los valores de volumen específico se muestran en la Tabla 5. Las barras de error estándar se calcularon usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%. PSY: psyllium, FC: fibra cítrica.



PANES FINALES

Reología de masas, volumen específico y pérdida de peso

Los valores de los parámetros de reología de masas se recogen en la Tabla 4.

Las muestras de psyllium al 6% y con mezcla de fibras al 3% presentaron un valor de G' mucho mayor que el control, y se diferenciaron del resto de muestras. Se observaron diferencias entre fibras, independientemente del porcentaje.

La muestra con fibra cítrica al 6% fue la única que no se diferenció respecto al control en los parámetros G'' , $\tan \delta$ y G^* . La muestra con mezcla de fibras al 3% se diferenció del resto de muestras con un valor de G'' y G^* mucho mayor. Entre muestras con la misma fibra(s), su porcentaje sí influyó en el valor de $\tan \delta$.

Tabla 4. Parámetros de reología de masas elaboradas con diferentes porcentajes de fibra cítrica, psyllium, o sus mezclas, en diferentes concentraciones, con hidratación óptima. Medidas en el momento de la elaboración.

Muestra	G'	G''	$\tan \delta$	G^*
Control	181,25 ± 4,38 a	203,68 ± 8,17 a	1,25 ± 0,06 c	274,08 ± 9,29 a
PSY 3%	1090,58 ± 85,24 bc	757,40 ± 20,72 cd	0,70 ± 0,04 a	1330,00 ± 82,02 cd
PSY 6%	1802,50 ± 228,395 c	1051,93 ± 136,58 d	0,58 ± 0,01 a	2088,75 ± 266,23 d
FC 3%	950,95 ± 797,687 ab	578,18 ± 261,59 bc	0,78 ± 0,39 ab	1124,55 ± 808,86 bc
FC 6%	323,40 ± 88,53 ab	350,55 ± 61,87 ab	1,15 ± 0,11 bc	477,38 ± 105,96 ab
PSY 1,5%+FC1,5%	878,53 ± 264,42 ab	708,53 ± 174,69 c	0,83 ± 0,05 ab	1131,53 ± 316,04 bc
PSY 3% + FC 3%	2598,25 ± 15,20 d	1500,50 ± 14,14 e	0,58 ± 0 a	3003,00 ± 20,51 e

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). El error estándar se calculó usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%. PSY: psyllium, FC: fibra cítrica, G' : módulo elástico (capacidad de almacenar energía); G'' : módulo viscoso (capacidad de disipar energía); $\tan \delta = G''/G'$ (amortiguación), G^* : módulo complejo (resistencia general a la deformación).

Los cálculos de volumen específico y pérdida de peso obtenidos con las hidrataciones óptimas se recogen en la Tabla 5.

Las únicas muestras que presentaron diferencia en el volumen respecto al control fueron las de fibra cítrica, excepto en su mezcla con psyllium al 1,5%. De los datos se dedujo que: a) la adición de fibra cítrica a porcentaje igual ó mayor que el 3% afecta significativamente al volumen, b) el psyllium no afecta significativamente al volumen, c) al emplear ambas fibras de forma conjunta, el efecto de la fibra cítrica predomina (al porcentaje suficiente, según lo anterior, del 3%) el volumen de los panes con la(s) misma(s) fibra(s) no se diferencia al variar el porcentaje de esta(s).

No se obtuvieron diferencias con el control ni entre muestras en la pérdida de peso (%).

Tabla 5. Hidratación óptima, volumen específico, pérdida de peso de panes elaborados con diferentes porcentajes de fibra cítrica, psyllium, o sus mezclas, en diferentes concentraciones, en su hidratación óptima. Medidas a las 24 horas de la elaboración.

Muestra	Hidratación (óptima) (%)	Volumen específico (ml/g)	Pérdida de peso (%)
Control	100	5,93 ± 1,12 cd	28,40±2,34 a
Psyllium 3%	110	6,48 ± 0,42 d	26,49±1,1 a
Psyllium 6%	130	6,22 ± 0,03 cd	26,69±0,05 a
Fibra cítrica 3%	120	4,59 ± 0,88 abc	25,66±2,99 a
Fibra cítrica 6%	160	3,69 ± 0,25 a	26,82±0,32 a
PSY 1,5%+FC1,5%	110	5,71 ± 1,00 bcd	26,51±3,39 a
PSY 3% + FC 3%	130	4,11 ± 0,84 ab	25,17±0,69 a

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$).

El equilibrio entre la elasticidad (módulo elástico G') y la extensibilidad (módulo viscoso G'') de la masa determina su capacidad de retención de gas (Burešová et al., 2014). Por otro lado, a medida que se incrementa la hidratación, disminuye la viscosidad (Mariotti et al., 2013b; Martínez et al., 2014). Todo ello está relacionado con el crecimiento de los panes.

Los valores de elasticidad y extensibilidad de la masa aumentaron respecto al control con la adición de fibras. Fueron mucho mayores en los panes con psyllium que con fibra cítrica, y más a medida que se incrementó su porcentaje. Así, los panes con psyllium alcanzaron un volumen específico mayor que los de fibra cítrica, a pesar de presentar un menor porcentaje de hidratación óptima. La muestra con mezcla de cada fibra al 3% presentó los mayores valores de elasticidad y extensibilidad, y sin embargo un volumen específico menor que el de los panes con una sola fibra. Fue mucho menor que en el pan con psyllium al 6%, pese a presentar la misma hidratación, y menor que el del pan con psyllium al 3%, a pesar de incluir el mismo porcentaje de fibra. Con todo esto se puede deducir que la fibra cítrica posee cierto efecto negativo sobre la expansión de la masa, que puede deberse a 1) su microestructura 2) interacción con el resto de ingredientes

Un mayor grosor de partícula podría romper la estructura de la masa, dificultando la retención de gas y su crecimiento (Lundberg et al., 2013).

La mayoría de los hidrocoloides presentan interacciones con otros componentes alimentarios, como el azúcar (Belorio, et al., 2020; Saha y Bhattacharya 2010), los almidones (BeMiller 2011) o las proteínas; y también se ven influenciados por las condiciones del medio, como pH y presencia de calcio (Belorio y Gómez, 2022). Por ejemplo, Li et al. (2020) demostraron que la incorporación de azúcares hasta un 4% no afectaba a la viscosidad en las soluciones de psyllium; mientras que este ingrediente promueve la interacción entre cadenas de fibra cítrica (Willats et al., 2006). Un aumento excesivo en la viscosidad de los panes con fibra cítrica podría ser la razón de su menor crecimiento.

Perfil de textura

Los valores de los parámetros de textura se recogen en la Tabla 6. La representación gráfica de los datos se encuentra en el Anexo 6.

La incorporación de fibras no influyó sobre la dureza de los panes a las 24 horas respecto al control, a diferencia de lo ocurrido en los geles. Esto podría deberse a la influencia del resto de ingredientes de la formulación. Sí que existieron diferencias de dureza entre las muestras con psyllium y las de fibra cítrica, siendo mayor el valor en las muestras con psyllium, al igual que en la dureza de geles. Las muestras con mezclas se diferenciaron entre sí, asemejándose la de la mezcla al 1,5% con las muestras de psyllium, y la de mezcla al 3% con las de fibra cítrica. Por tanto, al igual que en el caso del volumen específico, el efecto de la fibra cítrica comenzó a ser notable a partir de su adición al 3%.

La dureza de los panes aumentó durante el almacenamiento, pero de forma mucho más acusada en el control. Con esto se corroboró el efecto de las fibras en la disminución de la retrogradación (Tsatsaragkou et al., 2016; Askari et al. (2018). Pero además, el menor endurecimiento respecto al control podría deberse a la alta captación de agua por las fibras (Willats et al., 2006; Lundberg et al., 2013), que evita que se pierda por secado.

La única muestra que se diferenció respecto al control en el valor de resiliencia a las 24 horas fue muestra con psyllium al 6%. La resiliencia aumentó ligeramente durante el almacenamiento en el caso del control, pero disminuyó de forma muy acusada al incorporarse fibras en la formulación, sin diferencias entre el tipo o sus porcentajes.

Las muestras con psyllium al 3% y al 6% se diferenciaron respecto al control en el valor de cohesividad a las 24 horas. La cohesividad de los panes disminuyó durante el almacenamiento, y de forma más acusada en las muestras con fibras. La disminución en cohesividad fue mayor en la muestra con psyllium al 6%, seguida por las muestras: psyllium al 3%, después las muestras con fibra cítrica y por último las muestras de mezcla, sin diferencias entre porcentajes.

En el caso de la resiliencia y la cohesividad de los panes, es la incorporación de psyllium y no la de fibra cítrica la que parece afectar, tanto de manera inmediata como a los 7 días.

Tabla 6. Parámetros de textura: dureza, resiliencia y cohesividad de los panes elaborados con diferentes porcentajes de fibras o sus mezclas, en diferentes concentraciones, en su hidratación óptima. Medidas a las 24 horas y diferencia entre esta y la medida a los 7 días.

Muestra	Medida	Dureza	Resiliencia	Cohesividad
Control	N	2,84 ± 1,25 ab	9,99 ± 2,81 a	0,27 ± 0,03 a
	Δ (%)	14, 444,41 ± 168,88 b	7,79 ± 20,49 b	-8,35 ± 2,77 c
PSY 3%	N	2,17 ± 0,07 a	17,46 ± 1,93 ab	0,41 ± 0,03 b
	Δ (%)	158,13 ± 84,39 a	-52,70 ± 7,38 a	-42,98 ± 4,43 ab

PSY 6%	N	1,623 ± 0,00 a	25,05 ± 0,00 b	0,55 ± 0,00 c
	Δ (%)	155,61 ± 5,41a	-67,76 ± 0,492 a	-57,13 ± 0,11 a
FC 3%	N	3,76 ± 1,91 ab	16,89 ± 5,87 ab	0,39 ± 0,09 ab
	Δ (%)	90,83 ± 33,03 a	-53,35 ± 14,68 a	-42,74 ± 12,30 ab
FC 6%	N	5,89 ± 0,28 ± b	18,41 ± 7,27 ab	0,33 ± 0,08 ab
	Δ (%)	82,07 ± 20,85 a	-50,22 ± 31,98 a	-45,13 ± 8,94 ab
PSY 1,5%+FC1,5%	N	2,32 ± 0,85 a	15,35 ± 1,18 a	0,38 ± 0,01 ab
	Δ (%)	198,53 ± 113,28 a	-48,17 ± 8,41 a	-40,07 ± 1,92 b
PSY 3% + FC 3%	N	5,64 ± 0,28 b	12,37 ± 4,15 a	0,350,076 ab
	Δ (%)	83,49 ± 32,66 a	-43,34 ± 3,61 a	-38,66 ± 6,288 b

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). PSY: psyllium, FC: fibra cítrica.

Color de corteza y miga de panes

Los valores de los parámetros de color medidos en panes se encuentran recogidos en la Tabla 7.

Ninguna muestra presentó diferencias respecto al control en la luminosidad de la corteza ni de la miga. Las muestras con fibra cítrica se diferenciaron del control en los valores de a^* y b^* de la corteza, a diferencia de en los ensayos sobre el color de geles. Esto podría deberse a la influencia del resto de componentes de la formulación y a la reacción de Maillard a la temperatura de horneado. La muestra con mezcla de cada fibra al 3% presentó diferencias en la a^* y la b^* de la miga, por lo que podría estar influyendo mucho la fibra cítrica en el color de los panes. No obstante, en el focus group se concluyó que el color de los panes con fibra cítrica es atractivo.

Tabla 7. Parámetros de color de miga y corteza de panes elaborados con diferentes porcentajes de fibra cítrica, psyllium, o sus mezclas, en diferentes concentraciones, en su hidratación óptima. Medidas a las 24 horas de la elaboración.

Muestra	Color corteza			Color miga		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Control	77,17±1,34 abc	6,05±1,62bc	22,356±2,17 c	59,42±4,55 a	-0,53±0,054 a	3,75± 0,96 a
PSY 3%	76,78±1,69 ab	4,43±0,84ab	15,40±0,74 abc	56,00±5,15 a	-0,20±0,11 ab	3,49±0,24 a
PSY 6%	71,63±1,93 a	7,55±0,57c	11,84±0,98 bc	56,98±0,34 a	-0,13±0,18 ab	4,71±1,52 ab
FC 3%	83,31±1,41 c	2,66±0,31a	17,34±3,96 a	56,45±0,10 a	-0,16±0,04 ab	5,20±1,04 ab
FC 6%	74,00±1,77 ab	1,74±0,57a	15,165±3,40 a	52,97±8,37 a	0,15±0,21 ab	5,81±2,18 ab
PSY 1,5%+FC1,5%	80,42±5,44 bc	4,03±1,71ab	17,23±1,99 abc	55,52±2,94 a	-0,23±0,19 ab	3,97±0,56 ab
PSY 3% + FC 3%	77,98±3,19 abc	3,63±1,57ab	20,08±2,7 ab	59,24±5,36 a	0,29±0,48 b	6,85±1,63 b

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). PSY: psyllium, FC: fibra cítrica

Focus group

Las imágenes relativas a las muestras de pan proporcionadas al grupo de expertos para su evaluación organoléptica se encuentran en el Anexo 8.

A grandes rasgos, en la puesta en común sobre los panes con fibra cítrica se destacó la diferencia visual en la corteza de la muestra al 3% respecto a los demás con este

porcentaje. En la miga se observó un mayor tamaño de alveolo e la muestra al 3% respecto a la de psyllium; y a su vez un mayor alveolado de estas dos muestras con fibra individual que el de mezcla a este mismo porcentaje. Destacó el menor volumen de las muestras con fibras, sobre todo el de la muestra al 6%. Al incluir la fibra cítrica de forma individual, los panes presentaron claras notas cítricas; que las muestras con mezcla de fibras se pierden. El sabor de los panes con fibra cítrica se consideró agradable y con personalidad. El control se percibió muy seco y con “off flavours” o aromas secundarios, mientras que el psyllium neutralizó este aroma en los panes que lo incluyen individualmente. A mayor porcentaje de fibra, aumentaron la jugosidad, humedad y cohesividad de la miga, y la ternura del pan; de forma más acusada en los panes con fibra cítrica. Los panes desarrollados con fibra cítrica se consideraron adecuados en todos los aspectos, a mejorar el volumen de la muestra con 6%.

Aparición de moho

Las imágenes relativas al recuento de moho en los panes tras el almacenamiento durante 7 días se encuentran en el Anexo 9.

La aparición de mayor cantidad de moho en los panes tras un almacenamiento 7 días se relaciona con el mayor contenido en agua de estos. La actividad de agua de los panes supone una condición adecuada para su aparición, y el mayor contenido en agua propicia la difusión de las esporas a mayor velocidad (Setlow y Johnson, 1997).

CONCLUSIÓN

Las propiedades físicas, texturales y sensoriales de los panes sin gluten están relacionadas en gran medida con su estructura a varios niveles, y su caracterización tiene un papel esencial en el desarrollo de productos con calidad deseada. Al incorporar fibra cítrica a las formulaciones de pan sin gluten aumenta la capacidad de hidratación de la masa, lo que posibilita la obtención de un mismo volumen de producto a menor costo, además de reducir su contenido calórico. Además la fibra cítrica demora el envejecimiento del pan, al conservar su hidratación y retrasar la retrogradación del almidón. Se obtuvieron buenos resultados en la combinación de fibra cítrica con HPMC para la formulación de panes sin gluten. No obstante, no puede emplearse como sustituto del psyllium por la diferencia en sus propiedades y efectos.

El presente estudio ha supuesto un avance en las pruebas de incorporación de fibra cítrica en la formulación de panes sin gluten. Mejoras posteriores en la investigación en este campo se enfocan a la optimización del volumen de los panes. Para ello, por un lado, se elimina la harina de la formulación, reemplazando este contenido por almidón de maíz; y por otro se rompe la estructura de la fibra cítrica sometiéndola a ultraturax.

BIBLIOGRAFÍA

- AACC. (2012a). Method 56–40.01. Water hydration capacity of protein materials. ,AACC International Approved Methods, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN.
- AACC. (2012b).Method 76–21.02. General pasting method for wheator rye flour of starch using the Rapid Visco analyser. AACC International Approved Methods, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN.
- De Angelis M., Rizzello C.G., Fasano A., Clemente M.G., De Simone C., Silano M., De Vincenzi M., Losito I., Gobbetti M. (2006). Probiotic preparation has the capacity to hydrolyze gliadin polypeptides responsible for Celiac Sprue. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1762, nº1, pp. 80-93. Doi: 10.1016/j.bbadis.2005.09.008.
- Aschemann-Witzel, J.; Maroscheck, N. & Hamm, U. (2013). Are organic consumers preferring or avoiding foods with nutrition and health claims? *Food Quality and Preference*, 30(1), pp. 68–76.
- Askari, F.; Sadeghi, E. & Mohammadi, R. (2018). The physicochemical and structural properties of psyllium gum/modified starch composite edible film. *Journal of Food Process Preservation*, 42. Doi./10.1111/jfpp.13715
- Asri, N.; Rostami, M. (2022). Chapter 4 Gluten-related disorders definition. In: M. Rostami-Nejad (Ed.) *Gluten Related Disorders* (pp. 49-57). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821846-4.00003-6>
- Aziz,I. & Syers, D.S. (2012) Emerging concepts: from coeliac disease to non-coeliac gluten sensitivity. *Proc Nutr Soc.*, 71, pp. 576–580
- Banai, J. (2004) Treatment of celiac disease, *Orvosi hetilap*, 145(3), pp. 147–148. Doi: 10.1016/b978-0-12-420220-7.00003-1.
- Barnett, J. M.; Dripps, R.W.; Blomquist, K.K. (2016). Organivore or organorexic? Examining the relationship between alternative food network engagement, disordered eating, and special diets. *Appetite*, 105, pp. 713-720. Doi:10.1016/j.appet.2016.07.008.
- Bethune, M. T. & Khosla, C. (2012) Oral Enzyme Therapy for Celiac Sprue. *Methods in Enzymology*, 502, pp. 241-271. Doi: 10.1016/B978-0-12-416039-2.00013-6.
- Belorio, M. & Gómez, M. (2022) Psyllium: a useful functional ingredient in food systems, *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 62(2), pp 527-538, Doi:10.1080/10408398.2020.1822276
- Belorio, M.; Marcondes, G. & Gómez, M. (2020). Influence of psyllium versus xanthan gum in starch properties. *Food hydrocolloids*, 105.
- Bemiller, J.N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), pp. 386-423. Doi. 10.1016/j.carbpol.2011.05.064.
- Bosscher, D., Van Loo, J., & Franck, A. (2006). Inulin and oligofructose as functional ingredients to improve bone mineralization. *International Dairy Journal*, 16, pp. 1092-1097.

- Bravo, Á.; Garzón, R.; Rosell, C.M. & Gómez, M. (2019) Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. *Foods*, 8(5).
- Burešová, I.; Kráčmar, S.; Dvořáková, P. Středa, T. (2014). The relationship between rheological characteristics of gluten-free dough and the quality of biologically leavened bread. *Journal of Cereal Science*, 60(2), pp. 271-275.
- Caio, G.; Ciccocioppo, R.; Zoli, G.; De Giorgio, R & Volta, U. (2020) Therapeutic options for coeliac disease: What else beyond gluten-free diet?, *Digestive and Liver Disease. Editrice Gastroenterologica Italiana*, 52(2), pp. 130–137. Doi: 10.1016/j.dld.2019.11.010.
- Catassi, C.; Bai, J.C.; Bonaz, B.; Bouma, G; Calabrò, A; Carroccio, A.; Castillejo, G.; Ciacci, C.; Cristofori, F. ; Dolinsek, J.; Francavilla, R.; Elli, L.; Green, P.; Holtmeier, W.; Koehler, P.; Koletzko, S; Meinhold, C.; Syers, D.; Schumann, M.; Schuppan, D.; Ullrich, R.; Vécsei, A.; Volta, U.; Zevallos, V.; Sapone, A. & Fasano, A.. Non-Celiac Gluten sensitivity: the new frontier of gluten related disorders. *Nutrients*. 26(10), pp. 3839-3853. Doi: 10.3390/nu5103839.
- De la Hera, E.; Rosell, C. M. & Gómez, M. (2014). Effect of water content y flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry*, 151, pp. 526-531.
- Delcour, J.A.; Joye, I.J.; Pareyt, B., Wilderjans, E., Brijs, K.; Lagrain, B. (2012) Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products. *Annual Review on Food Science and Technology*, (3), pp. 469–492.
- Demirkesen, I.; Kelkar, S., Campanella, O. H.; Sumnu, G.; Sahin, S.; Okos, M. (2014). Characterization of structure of gluten-free breads by using X-ray microtomography. *Food Hydrocolloids*, 36, pp. 37-44. Doi:10.1016/j.foodhyd.2013.09.002.
- Di Sabatino, A; Volta, U; Salvatore,C et al. (2015). Small amounts of gluten in subjects with suspected nonceliac gluten sensitivity: a ryomized, double-blind, placebo-controlled, cross-over trial. *Clin Gastroenterol Hepatol*, (13), pp.1604–1612.
- Fernández, J.; Guerra, P.; Gallego, C. & Gómez, M. (2021). Physical properties of flours obtained from wasted bread crusts y crumbs. *Foods*, 10(2), 282. Doi: 10.3390/foods10020282.
- Rivera, J. A. y Flores, E. (2022). La fibra dietética como ingrediente funcional en la formulación de productos cárnicos. *Tecnociencia Chihuahua*, 16(1), pp. 892. Doi: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v16i1.892>
- Golley, S.; Corsini, N. & Mohr, P. (2017). Managing symptoms y health through self-prescribed restrictive diets: what can general practitioners learn from the phenomenon of wheat avoidance? *Australian Family Physician*; 46(8), pp. 603–608.
- Gómez, M. (2021). Gluten-free bakery products: Ingredients y processes. *Advances in Food y Nutrition Research*, 99, pp. 189-238. Doi:10.1016/bs.afnr.2021.11.005
- Gómez, M.; Ronda, F.; Caballero, P.; Blanco, C., & Rosell, C.M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality y shelf-life of yellow layer cakes. *Foods Hydrocolloids*, 21(2), pp. 167-173. Doi. 10.1016/j.foodhyd.2006.03.012.

- Gómez, M. & Román, L. (2018). Role of Different Polymers on the Development of Gluten-Free Baked Goods. In: T. Gutiérrez, (Ed) *Polymers for Food Applications* (pp. 693-724). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_25
- Guerra, P.; Fernández, J.; Gallego, C. & Gómez, M. (2022). Effects of particle size in wasted bread flour properties. *International Journal of Food Science y Technology*, 57(8), 4782–4791. Doi:10.1111/ijfs.15656©2022.
- Gunness, P. & Gidley, M.J. (2010). Mechanisms underlying the cholesterol-lowering Properties of soluble dietary fibre polysaccharides. *Food & Function*, 1(2), pp. 149-155.
- Hager, A. S. & Arendt, E. K. (2013). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice,maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32(1), pp. 195-203. Doi. 10.1016/j.foodhyd.2012.12.021.
- Haque, A., Richardson, R. K., Morris, E. R & Dea, I. C. M., (1993). Xanthan-like weak gel rheology from dispersions of ispaghula seed husk. *Carbohydrate Polymers*, 22(4), pp. 223–232. Doi: 10.1016/0144-8617(93)90124-M.
- Hu, X. Z.; Xing, X. H.; Zhang, Z. M.; Wu, R. Q.; Guo, Q., Cui, S. W. (2011). Antioxidant effects of Artemis sphaerocephala Krasch. gum, on streptozotocin induced type 2 diabetic rats. *Food Hydrocolloids*, vol. 25(2), pp. 207-213. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2009.12.006
- Innograin (2021). *Panes sin gluten. Otros ingredientes*. Innograin. [https:// innograin.uva.es/category/sin-gluten/](https://innograin.uva.es/category/sin-gluten/)
- Innograin (2020). *Psyllium, un ingrediente muy interesante*. Innograin. <https://innograin.uva.es/2020/10/06/psyllium-un-ingrediente-muy-interesante/>
- Janssen, M. (2018). Determinants of organic food purchases: Evidence from household panel data. *Food Quality and Preference*, 68, pp. 19–28. Doi:10.1016/j.foodqual.2018.02.002
- Kaukinen, K. & Lindfors, K. (2015) Novel treatments for celiac disease: Glutenases and beyond. *Digestive Diseases*, 33(2), pp. 277–281. Doi: 10.1159/000369536.
- Korus, J.; Juszczak, L.; Ziobro, R.; Witczak, M.; Grzelak, K. & Sojka, M. (2012). Defatted strawberry and blackcurrant seeds as functional ingredients of gluten free bread. *Journal of Texture Studies*, 43, pp. 29-39. Doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00314.x.
- Li, J. M. & Nie, S. P. (2015). The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids*, 53, pp. 46–61. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.035>.
- Lis, D.M.; Stellingwerff, T.; Shing, C.M.; Ahuja, K.D. & Fell, J.W. (2015) Exploring the popularity, experiences, and beliefs surrounding gluten-free diets in nonceliac athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 25(1), pp. 37–45. Doi: 10.1123/ijsnem.2013-0247.
- Lundberg, B.M., (2005). Using highly expanded citrus fiber to improve the quality and nutritional properties of foods. *Cereal Foods World*, 50(5), pp. 248–252.

- Lundberg, B.; Pan, X.J.; White, A.; Chau, H. & Hotchkiss, A (2013) Rheology and composition of citrus fiber. *Journal of Food Engineering*, 125(1), pp. 97–104.
Doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.021
- Mancebo, C.M.; Merino, C.; Martínez, M.M. & Gómez, M. (2015b) Mixture design of rice flour, maize starch and wheat starch for optimization of gluten free bread quality. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), pp.6323–6333. Doi: 10.1007/s13197-015-1769-4
- Mancebo, C.M., Rodríguez, P. & Gómez, M. (2016). Assessing rice flour-starch-protein mixtures to produce gluten free sugar-snap cookies. *Food Science and Technology*, 67, pp. 127-132. Doi:10.1016/j.lwt.2015.11.045.
- Mancebo, C.M.; San Miguel; M.A.; Martínez, M.M. & Gómez M (2015a) Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science*, 6(1), pp. 8–15.
- Marcondes, L. y Gómez, M. (2018) Estudio de las propiedades funcionales del psyllium y de la goma xantana [TFM, Universidad de Valladolid]. ítem:<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37453>
- Marín, F.R.; Soler C.; Benavente, O.; Castillo, J. & Pérez, J.A. (2007) By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres *Food Chemistry*, 100(2), 736–741. Doi: 10.1016/j.foodchem.2005.04.040.
- Mariotti, M.; Lucisano, M.; Pagani, M. & Perry, K.W., (2009). The role of corn starch, amaranth flour, pea isolate, and Psyllium flour on the rheological properties and the ultrastructure of gluten-free doughs. *Food Research International*, 42(8), pp. 963-975. Doi: 10.1016/j.foodres.2009.04.017.
- Mariotti, M.; Pagani, M.A. & Lucisano, M. (2013a). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 30(1), pp. 393-400. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.07.005.
- Mariotti, M.; Cappa, C. & Lucisano, M., (2013b). Influence of Psyllium, sugar beet fibre and water on gluten-free dough properties and bread quality. *Carbohydrate. Polymers*, 98(2), pp. 1657-1666. Doi:10.1016/j.carbpol.2013.08.007.
- Martínez, M.M.; Gómez, M. & Díaz, A. (2014). Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making. *Journal of Food Engineering*, 142, pp. 49-56. Doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.020.
- Martínez, M.M. & Gómez, M. (2017) Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours y starches during bread fermentation y baking. *Journal of Food Engineering*, 197, pp. 78–86. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008.
- Matos, M. E. & Rosell, C. M. (2015). Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, pp. 653-661. Doi: 10.1002/jsfa.6732.

- Mir, S. A.; Bosco, S. J. D.; Shah, M. A.; Santhalakshmy, S. & Mir, M. M. (2015). Effect of apple pomace on quality characteristics of brown rice based cracker. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), pp. 25-32. Doi:10.1016/j.jssas.2015.01.001.
- Mooney, P. D., Hadjivassiliou, M. & Syers, D. S. (2014). Emerging drugs for coeliac disease, *Expert Opinion on Emerging Drugs*, 19(4), pp. 533–544. Doi: 10.1517/14728214.2014.959490.
- Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M. D. (2013). Rheology of gluten-free doughs from blends of chestnut y rice flours. *Food y Bioprocess Technology*, 6(6), pp. 1476-1485. Doi:10.1007/s11947-012-0927-1.
- Moscoso, F. & Quera, R. (2015). Enfermedad celiaca: revisión. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 26(5), pp. 613-627. Doi: 10.1016/j.rmclc.2015.09.007.
- Nie, H.; Cui, S. W. & Xie, M.. (2018). Chapter 8-Psyllium polysaccharide. In: S. Nie, S. W. Cui, M. Xie (Eds.). *Bioactive polysaccharides* (pp. 395–443). Academic Press <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809418-1.00008-3>.
- Vidal, N. (2018). Alimentación saludable, la gran tendencia de consumo actual. 7 claves orientativas. Ainia. <https://www.ainia.es/ainia-news/alimentacion-saludable-la-gran-tendencia-de-consumo-actual-7-claves-orientativas/>
- Observatorio Industrial del Sector Agroalimentario de Castilla y León (2006). Informe sobre el sector cerealista en Castilla y León, pp. 1- 105. http://www.jcyl.es/web/jcyl/AgriculturaGanaderia/es/Plantilla100Detalle/1284250174899/_/1284254766153/Redaccion
- O'Shea, N., Roble, C., Arendt, E and, Gallagher, E. (2015). Modelling the effects of orange pomace using response surface design for gluten-free bread baking. *Food Chemistry*, 166(1), pp. 23-230. Doi: 10.1016/j.foodchem.2014.05.157.
- Pagán, R. T. (2021). Evolución de la industria alimentaria durante las últimas tres décadas. *Alimentolociencia*. <https://alimentolociencia.esciencia.es/2021/07/26/evolucion-de-la-industria-alimentaria-durante-las-ultimas-tres-decadas/>
- Pérez, L. (2021) *¿Intolerancia al gluten? No: celiacía, sensibilidad y alergia*. Celicidad <https://celicidad.net/intolerancia-al-gluten/>
- Qi, J.R.; Song, L.W.; Zeng, W.Q. & Liao, J.S. (2021) Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network. *Food Chemistry*, 343(1).
- Reglamento (UE) nº 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, del 20 de diciembre de 2006 sobre las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en los alimentos. Diario Oficial de la Unión Europea, L404/9, de 20 de diciembre de 2006. <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1924/oj>
- Rivera, J.O. y Gómez, M (2015). Cambios microestructurales y reológicos de masas y panes sin gluten [TFM, Universidad de Valladolid], pp. 1-31. Ítem:<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/12940>

- Román, L.; Belorio, M. & Gómez, M. (2019). Gluten-free breads: The gap between research y commercial reality. *Comprehensive reviews in food science y food safety*, 18(3), pp. 690-702. Doi:10.1111/1541-4337.12437
- Román, S.; Sánchez, L. M., & Siegrist, M. (2017). The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 67, pp.44–57. Doi:10.1016/j.tifs.2017.06.010.
- Sabanis, D. & Tzia, C. (2011). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food Science and Technology International*, 17(4), pp. 279–291. Doi: 10.1177/1082013210382350.
- Saha, D. and Bhattacharya, S. (2010) Hydrocolloids as Thickening and Gelling Agents in Food: A Critical Review. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 587-597.
- San Miguel, M. A. y Gómez, M. (2012). Influencia de la hidroxipropilmetilcelulosa, el psyllium y su combinación en las propiedades morfogeométricas y texturales de panes sin gluten elaborados con harina de arroz, [TFM, Universidad de Valladolid] pp. 31. ítem:<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/3902>.
- 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(13), Doi: 10.1186/1741-7015-10-13
- Setlow, P.& Johnson, E. A. (1997). Las esporas y su trascendencia. In: M. Doyle, L. Beuchat, T. Montville (Eds). *Food Microbiology. Fundaments and Frontiers*. (pp. 31-68). American Society for Microbiology, Washington DC.
- Shan, L.; Bethune M.; Khosla, C. & Gass, J. (2014). Prolil endopeptidasa (PEP) y glutamina endoproteasa para el tratamiento de la celiacía. <https://patents.google.com/patent/ES2437569T3/es>
- Sila, D.; Van Buggenhout, S.; Duvetter, T.; Fraeye, I., De Roeck, A.; Van Loey, A. & Hendrickx, M. (2009). Pectins in Processed Fruits and Vegetables: Part II—Structure—Function Relationships. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8:, pp .86-104. Doi: 10.1111/j.1541-4337.2009.0007
- Singh, B. (2007). Psyllium as therapeutic and drug delivery agent. *International Journal of Pharmaceutic*, 334 (1-2), pp.1–14. Doi: 10.1016/ j.ijpharm.2007.01.028.
- Spaenij, L. D.; Kooy, Y. W., Van Veelen, P.; Drijfhout, J.W.; Jonker, H.; Van Soest, L.; Smulders, M.J.; Bosch, D.; Gilissen, L.J. & Koning, F. (2005) Natural variation in toxicity of wheat: Potential for selection of nontoxic varieties for celiac disease patients, *Gastroenterology*, 129(3), pp. 797–806. Doi: 10.1053/j.gastro.2005.06.017.
- Staudacher, H.M. & Gibson, P.R. (2015). How healthy is a gluten-free diet? *British Journal of Nutrition*, 114(10), pp. 1539–1541. Doi:10.1017/S000711451500330X

- Struyf, N.; Verspreet, J. & Courtin, C.M. (2016) The effect of amylolytic activity and substrate availability on sugar release in non-yeasted dough. *Journal of Cereal Science*, 69, pp.111–118. Doi: 10.1016/j.jcs.2016.02.016.
- Suances, C. y Gómez, m. (2013) Mejora de la calidad de panes sin gluten a través de la mezcla de almidones y harinas, [TFM Universidad de Valladolid], pp. 1–33. ítem:<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/3886>.
- Theuwissen, E. & Mensink, R.P. (2008). Water-soluble dietary fibers and cardiovascular disease. *Physiology & Behavior*. 94(2), pp 285-292. Doi: 10.1016/j.physbeh.2008.01.001
- Tsatsaragkou, K.; Protonotariou, S. & Myala, I. (2016) Structural role of fibre addition to increase knowledge of non-gluten bread. *Journal of Cereal Science*, 67, pp. 58–6. Doi: 10.1016/j.jcs.2015.10.003.
- Valdés, S. E. (2006). Hidratos de Carbono. In: S. Badui, E. Quintanar (Eds.). *Química de los Alimentos* (pp. 29-118). Pearson Educación, México.
- Gómez, M. & Román, L. (2018). Role of Different Polymers on the Development of Gluten-Free Baked Goods. In: T. Gutiérrez, (Ed) *Polymers for Food Applications* (pp. 693-724). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_25
- Verain, M. C. D., Sijtsema, S. J., & Antonides, G. (2016). Consumer segmentation based on food-category attribute importance: The relation with healthiness and sustainability perceptions. *Food Quality and Preference*, 48(A), pp. 99–106. Doi:10.1016/j.foodqual.2015.08.012
- Warnberg, J.; Marcos, A.; Bueno, G. & Moreno, I.A. (2009). Functional benefits of psyllium fibre supplementation. *Current Topics in Nutraceutical Research*, 7, pp. 55–63.
- Wei, G.; Helmerhorst, E.J.; Darwish, G.; Blumenkranz, G. & Schuppan, D. (2020) Gluten degrading enzymes for treatment of celiac disease. *Nutrients*, 12(7), pp. 1–15. Doi: 10.3390/nu12072095.
- Willats, G.T.; Kox, P.J.; Mikkelsen, J. D. (2006). Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science & Technology*, 17(3), PP. 97-104. Doi: 10.1016/j.tifs.2005.10.008.
- Zevallos, V.; Sapone, A. & Fasano, A. (2013) Non-celiac gluten sensitivity: the new frontier of gluten related disorders. *Nutrients*, 5(10), pp. 3839–3853. Doi: 10.3390/nu5103839

ANEXO 1: Diagrama de flujo para la elaboración de panes

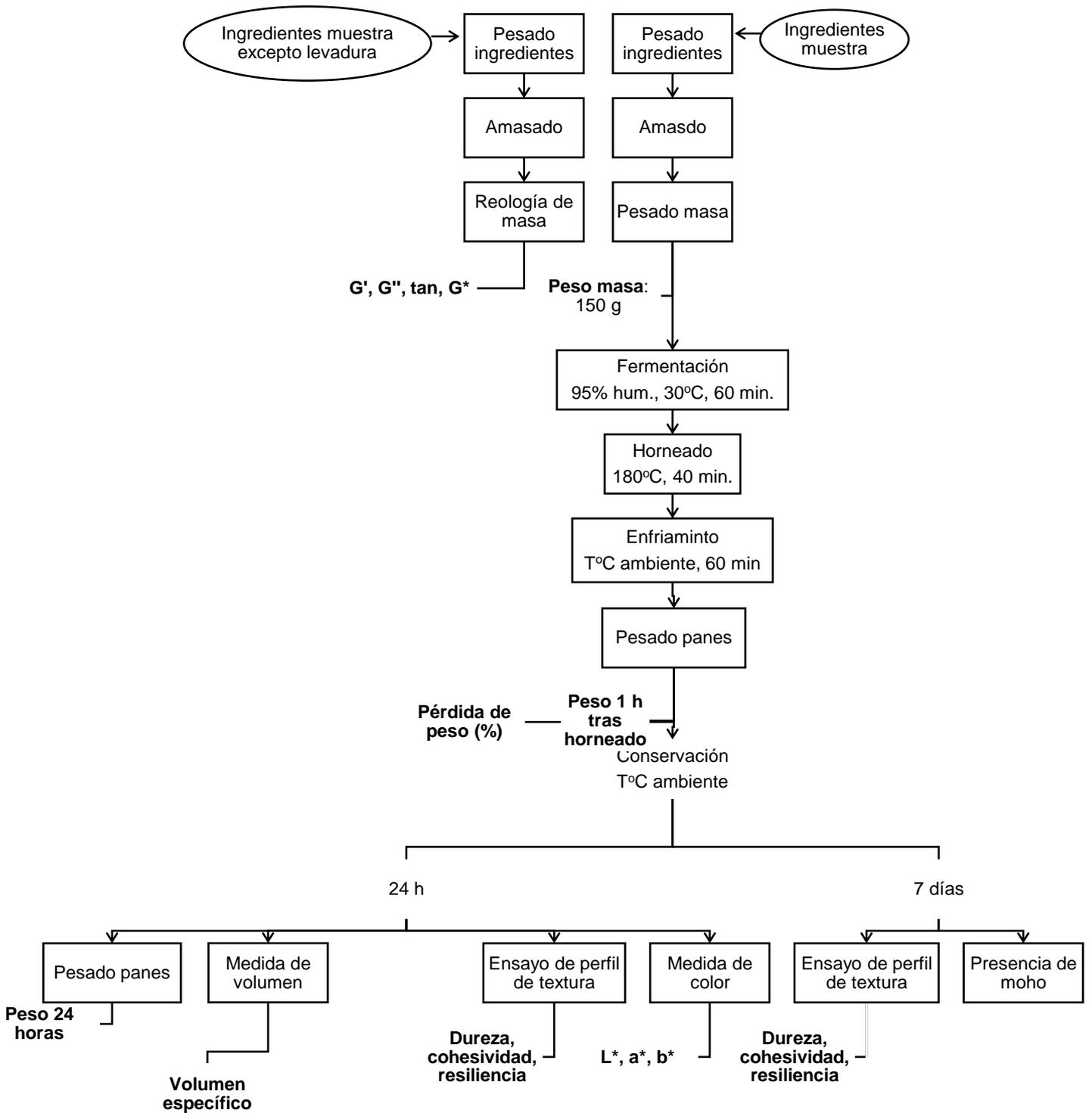


Figura 1: Diagrama de flujo para la elaboración de panes, ensayos y parámetros obtenidos.

ANEXO 2: Repeticiones empleadas en cada uno de los ensayos sobre panes

Conservación		ENSAYOS → REPETICIÓN 1				
5 PANES	1 hora Cámara T°C ambiente	5 PANES	.PÉRDIDA DE PESO (%)			
	24 horas Cámara T°C ambiente	5 PANES	VOLUMEN ESPECÍFICO 24 HORAS			
			TEXTURA 24 HORAS	PAN 1 PAN 2	REBANADA 1.1 REBANADA 1.2 REBANADA 2.1 REBANADA 2.2	
		2 PANES	COLOR CORTEZA	PAN 1 PAN 2	EXTREMO 1.1 EXTREMO 1.2 EXTREMO 2.1 EXTREMO 2.2	
			COLOR MIGA	PAN 1 PAN 2	REBANADA 1.1 REBANADA 1.2 REBANADA 2.1 REBANADA 2.2	
		2 PANES	IMAGEN REBANADA	PAN 1 Pan 2	REBANADA 1.1 REBANADA 1.2 REBANADA 2.1 REBANADA 2.2	
			7 días Cámara T°C ambiente	2 PANES	TEXTURA 7 DÍAS	PAN 3 PAN 4
		PRESENCIA DE MOHO				
		Congelador	1 PAN	PAN 5		

Figura 1: Esquema de las repeticiones empleadas en cada uno de los ensayos sobre panes

ANEXO 3. Imágenes con fibras al microscopio electrónico

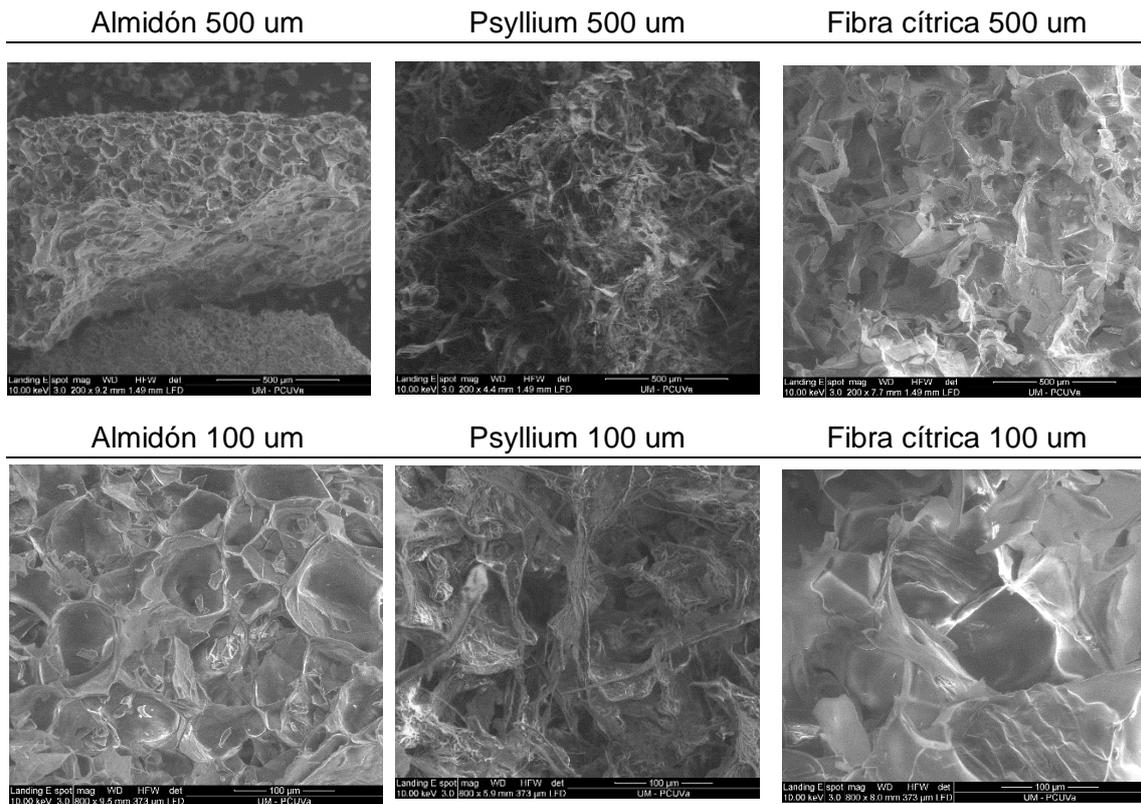


Figura 1. Imágenes de fibras hidratadas obtenidas al microscopio electrónico

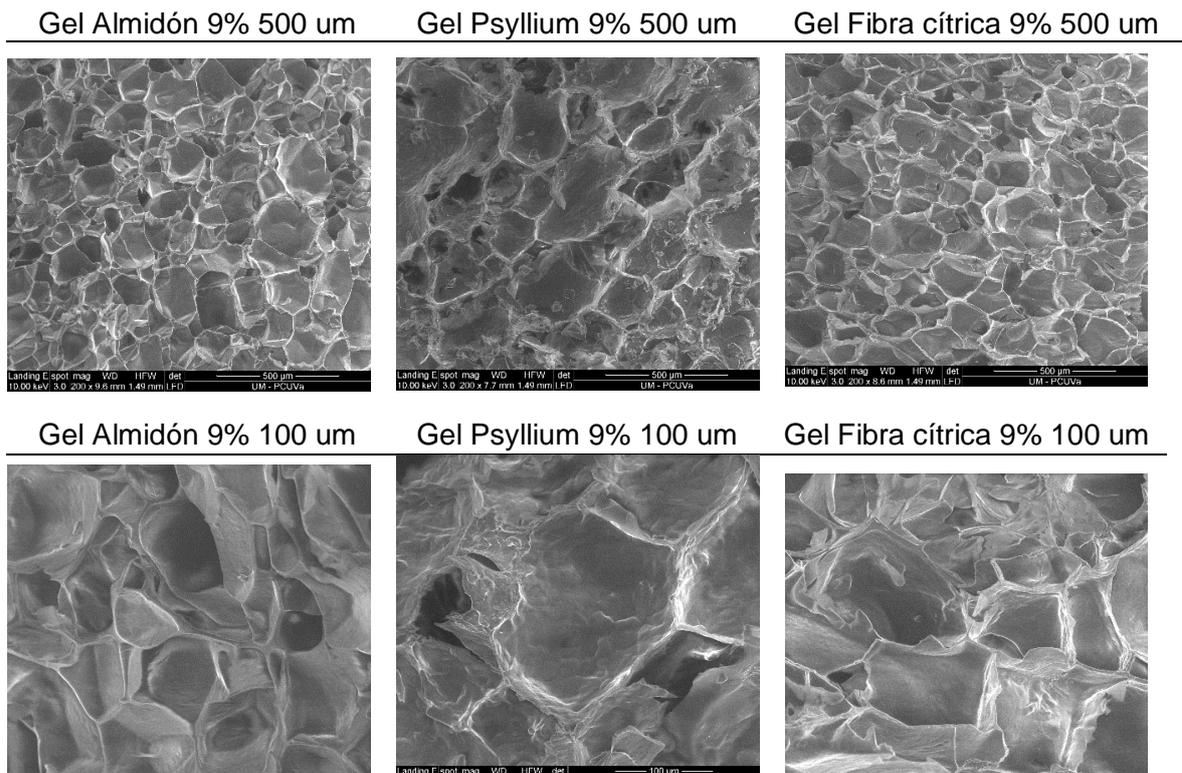


Figura 2. Imágenes de geles de fibras obtenidas al microscopio electrónico

ANEXO 4: Representación gráfica de los resultados de los ensayos realizados a fibras

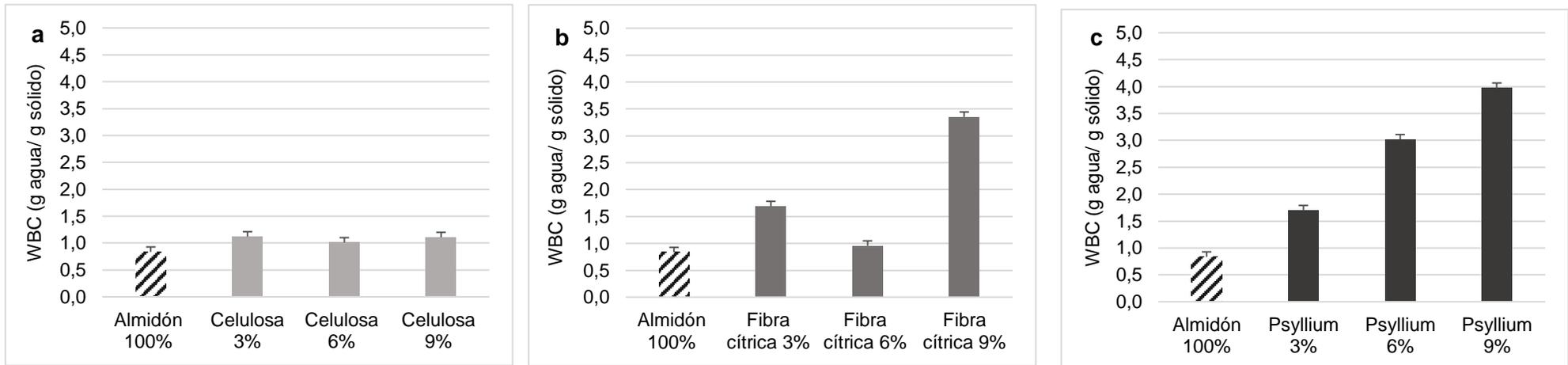


Figura 1: Water Binding Capacity de las fibras: celulosa (a), fibra cítrica (b) y psyllium (c) en su mezcla a diferentes concentraciones con almidón. Los valores de WBC se muestran en la Tabla 2. Las barras de error estándar se calcularon usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%. WBC: capacidad de retención de agua con estrés.

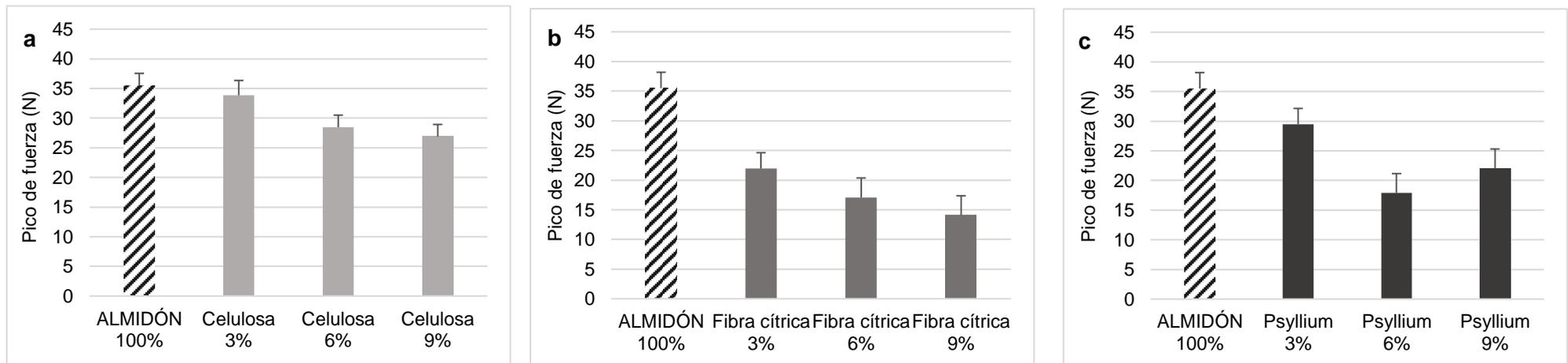


Figura 2: Dureza de geles de almidón con celulosa (a), fibra cítrica (b) y psyllium (c) a diferentes concentraciones. Los valores de WBC se muestran en la Tabla 2. Las barras de error estándar se calcularon usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%.

ANEXO 5: Resultados de hidratación óptima para las formulaciones muestra.

Tabla 1. Volumen específico de los panes elaborados con diferentes porcentajes de fibras o sus mezclas en diferentes concentraciones y con diferente porcentaje de hidratación.

Muestra	Hidratación (%)									
	90	100*	110*	120*	130*	140	150	160	170	190
CONTROL	4,36 ± 0,16 hij	5,31 ± 0,03 mn	4,19 ± 0,10 h	3,21 ± 0,05 g	-	-	-	-	-	-
PSY 3%	4,45 ± 0,13 hij	5,89 ± 0,41 op	6,87 ± 0,36 ir	5,48 ± 0,29 gmn	-	-	-	-	-	-
PSY 6%	2,23 ± 0,07 de	2,62 ± 1,31 f	3,35 ± 0,21 g	5,08 ± 0,11 lm	6,29 ± 0,04 q	5,65 ± 0,50 no	-	-	-	-
FC 3%	2,25 ± 0,03 de	4,5 ± 0,27 ijk	4,58 ± 0,06 jk	5,04 ± 0,36 l	4,07 ± 0,13 h	-	-	-	-	-
FC 6%	1,18 ± 0,01 a	1,41 ± 0,03 ab	-	-	2,24 ± 0,05 de	2,58 ± 0,04 ef	3,36 ± 0,07 g	3,48 ± 0,18 g	3,40 ± 0,11 g	3,28 ± 0,31g
PSY 1,5%+FC1,5%	3,20 ± 0,14 g	4,89 ± 0,26 kl	6,14 ± 0,12 pq	5,88 ± 0,08 op	-	-	-	-	-	-
PSY 3% + FC 3%	1,55 ± 0,02 ab	1,61 ± 0,02 bc	1,94 ± 0,02 cd	2,36 ± 0,04 ef	5,32 ± 0,39 mn	4,30 ± 0,23 hij	-	-	-	-
Volumen específico (ml/g)										

Los datos se expresan como media ± Desviación Estándar de ensayos duplicados. Los valores con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p < 0,05$). PSY: psyllium, FC: fibra cítrica.

ANEXO 6: Representación gráfica de los resultados de los ensayos realizados a panes.

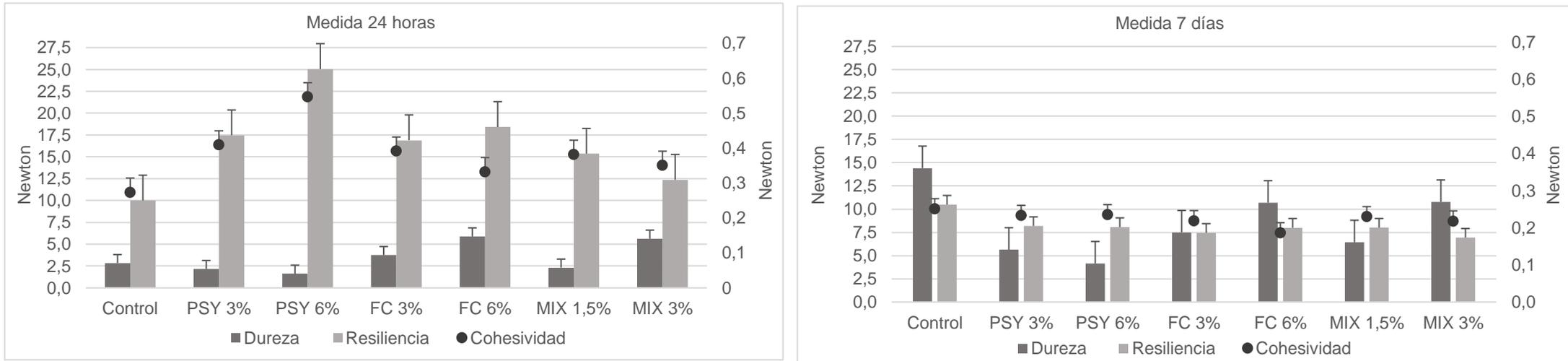


Figura 1: Parámetros de textura: dureza, resiliencia y cohesividad de los panes en su hidratación óptima. Los valores se muestran en la Tabla 6. Las barras de error estándar se calcularon usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%. PSY: psyllium, FC: fibra cítrica, MIX 1,5% y MIX 3%: mezcla de cada fibra Al 1,5%y 3% respectivamente.

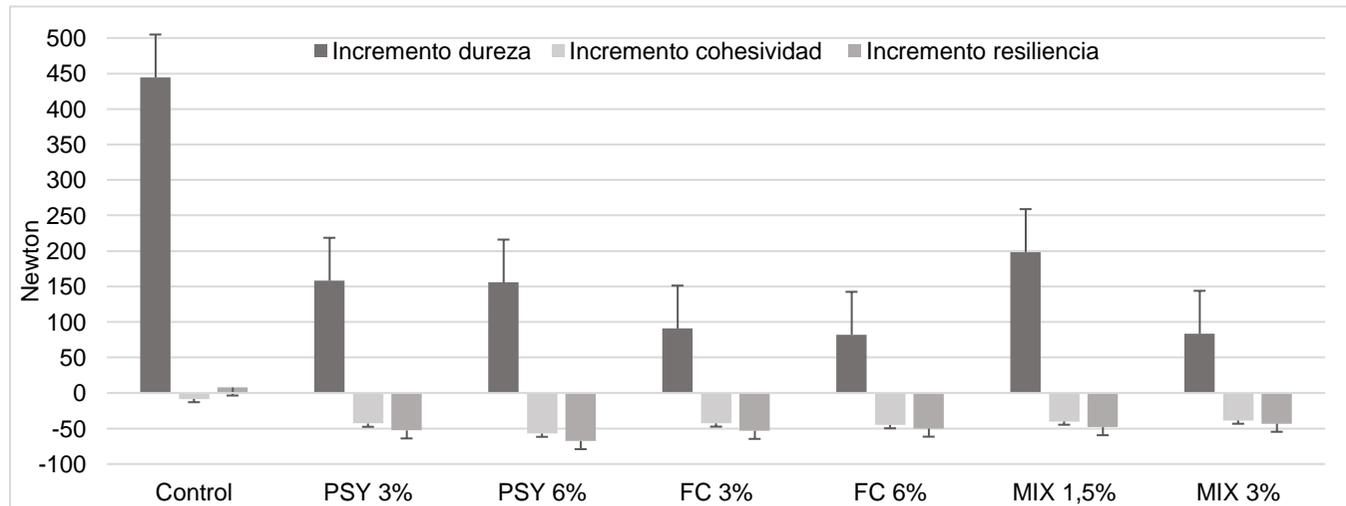


Figura 2: Diferencia de dureza, resiliencia y cohesividad de los panes en su hidratación óptima. Los valores se muestran en la Tabla 6. Las barras de error estándar se calcularon usando la distribución-t con un intervalo de confianza del 95%. PSY: psyllium, FC: fibra cítrica, MIX 1,5% y MIX 3%: mezcla de cada fibra Al 1,5%y 3% respectivamente

ANEXO 7: Imágenes con fibras al microscopio electrónico

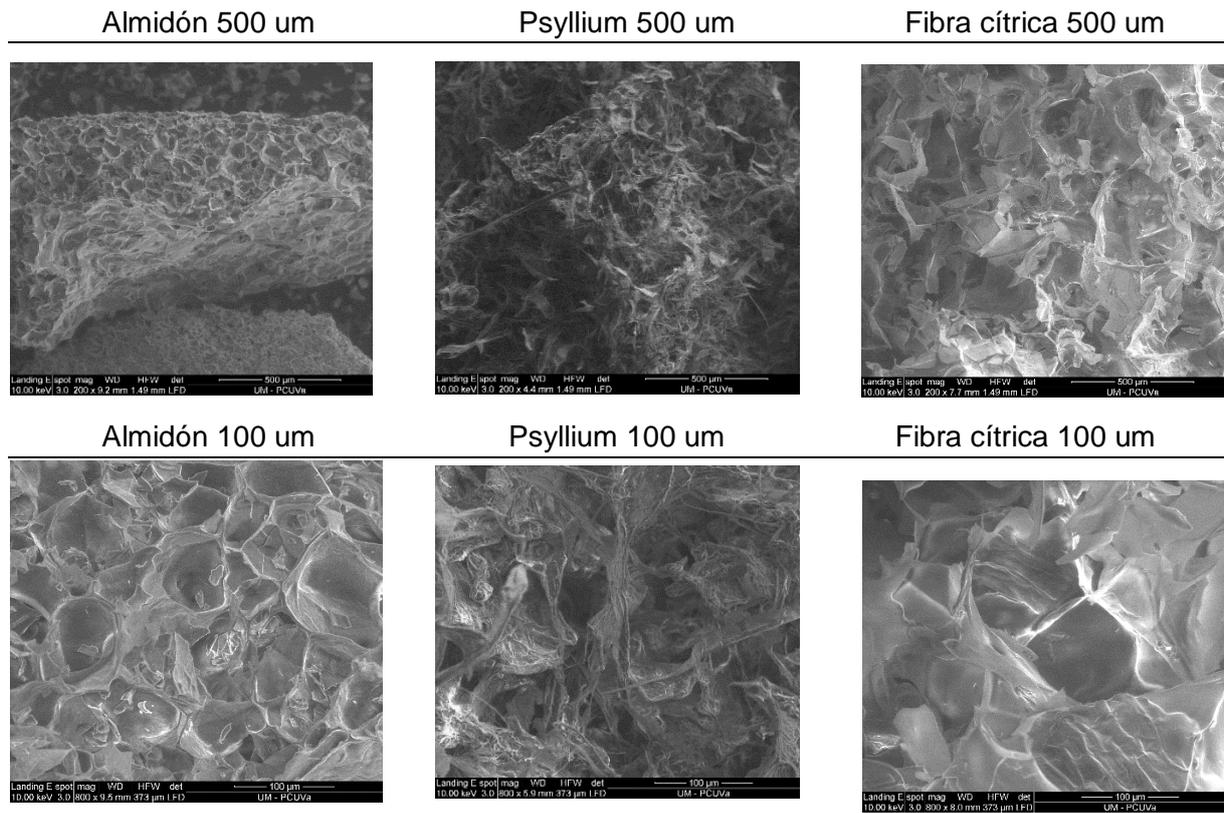


Figura 5. Imágenes de fibras hidratadas obtenidas al microscopio electrónico

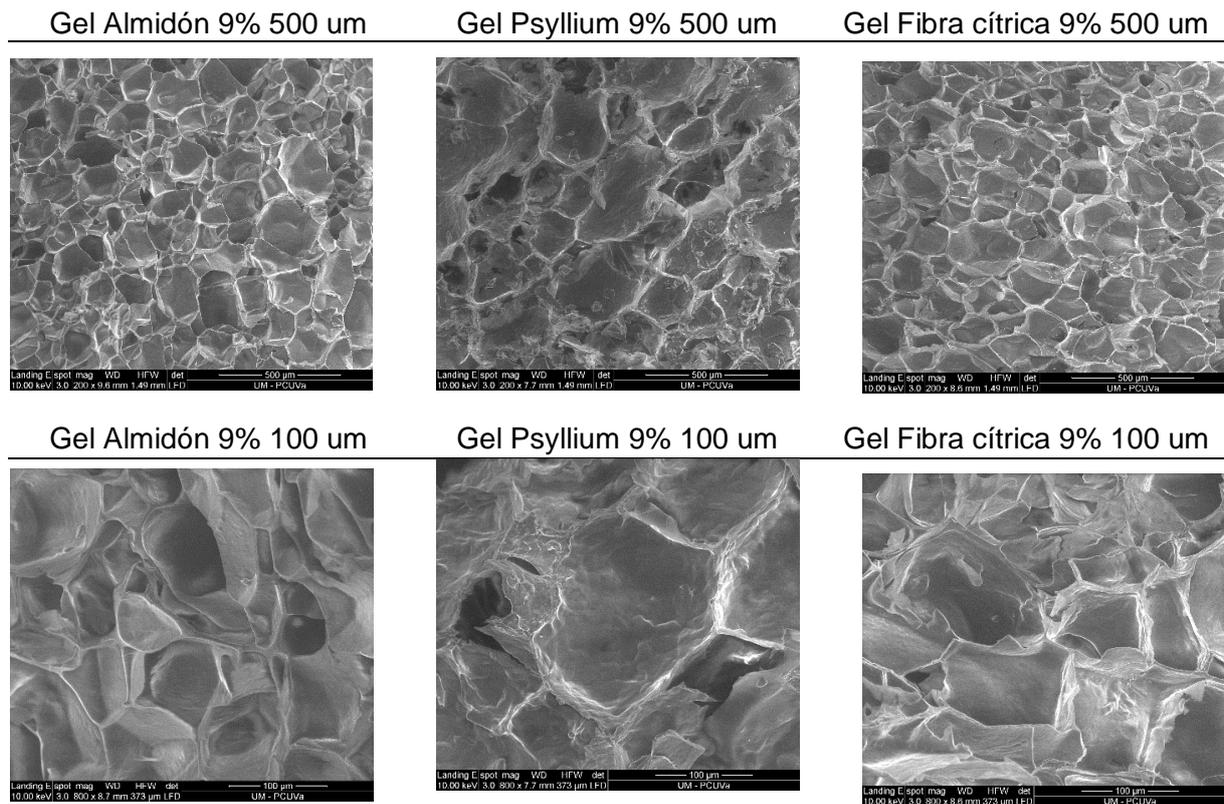


Figura 6. Imágenes de geles de fibras obtenidas al microscopio electrónico

ANEXO 8: Imagen de rebanada de los panes

PSY 3%, 110% HUM



PSY 1,5% + FC 1,5%, 110% HUM



FC 3%, 120% HUM



PSY 6%, 130% HUM



PSY 3% + FC 3%, 130% HUM



FC 6%, 160% HUM



CONTROL, 100% HUM



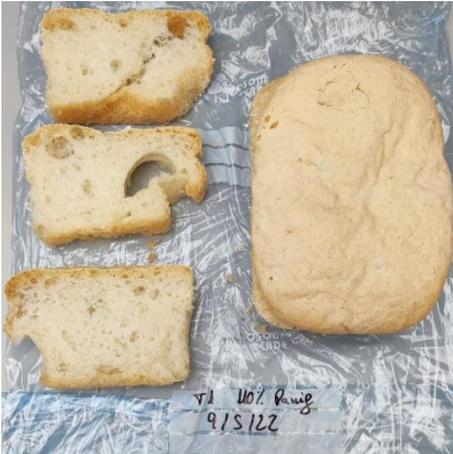
Figura 3: dimensiones de rebanada (3 cm de grosor), e imagen de la miga de las muestras de pan. PSY: psyllium, C. fibra cítrica, HUM. Humedad.

ANEXO 9: Presencia de moho en los panes tras almacenamiento 7 días

PSY 3%, 110% HUM

PSY 1,5% + FC 1,5%, 110% HUM

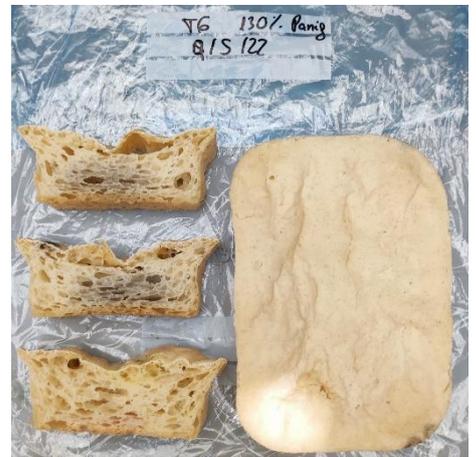
FC 3%, 120% HUM



PSY 6%, 130% HUM

PSY 3% + FC 3%, 130% HUM

FC 6%, 160% HUM



CONTROL, 100% HUM

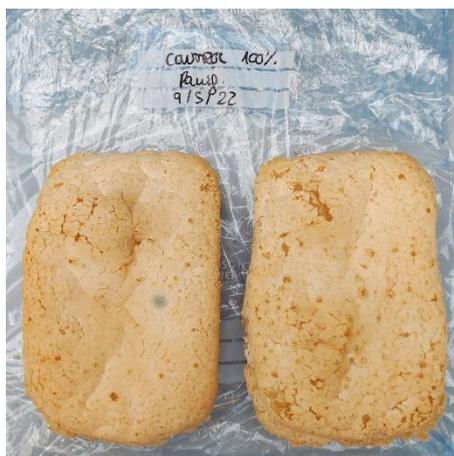


Figura 4: análisis visual de presencia de moho en las muestras de panes almacenados 7 días en la cámara de temperatura ambiente. PSY: psyllium, C. fibra cítrica, HUM.: Humedad.