

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL MEDI
NATURAL

IMPACTO DE LA SUSTITUCIÓN DE GRASA POR FIBRA EN LA ESTRUCTURA DE BIZCOCHOS

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNA: MARIA ELISA PARÍS ZARAGOZA

TUTORA: Isabel Hernando Hernando

COTUTORA: Amparo Quiles Chuliá

Curso Académico: 2015/2016

VALENCIA, JUNIO 2016



IMPACTO DE LA SUSTITUCIÓN DE GRASA POR FIBRA EN LA ESTRUCTURA DE BIZCOCHOS

RESUMEN

En un contexto social en el que cada vez predominan más las enfermedades causadas por el excesivo consumo de calorías y el déficit de fibra en la dieta, los consumidores empiezan a valorar de forma más positiva los alimentos saludables y bajos en grasa. Debido a la relación que existe entre la alimentación y la salud, se ha estudiado la reformulación de bizcochos para disminuir su contenido lipídico. En el presente trabajo se ha evaluado el efecto de la sustitución del 50% de la grasa por fibras en la formulación de bizcochos. Las fibras que han sido empleadas son; Vitacel KF 200, ingrediente natural procedente de la fibra de patata, rico en fibra insoluble (FI), Fibersol-2, que es una maltodextrina resistente y es considerada rica en fibra soluble (FS) y una mezcla a partes iguales de ambas fibras (M). Para ello se analizó las propiedades de las masas de los bizcochos, evaluándose la viscosidad aparente y la estructura por microscopía óptica. En la viscosidad aparente se obtuvieron resultados de menor viscosidad cuando se añadió fibra, debido a que la fibra era necesaria hidratarla con agua, lo que provocaba una disminución de la viscosidad. En la microscopía óptica se observó que la grasa actúa de estabilizante de las burbujas de aire, formando una película en la interfaz aire-matriz, mientras que la sustitución parcial de grasa provoca una disminución de la estabilidad, coalesciendo las burbujas y formando canales de difusión, los cuales se observan en la estructura macroscópica de la miga. La formulación FI presentó mayor cantidad de canales de difusión y un porcentaje mayor de aire ocluido en el interior. Junto con la estructura macroscópica de la miga de los bizcochos, se analizó también la textura y la microestructura por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) y se realizó la digestión *in vitro*. En la textura de los bizcochos se obtuvo que las propiedades de dureza y masticabilidad aumentaban notablemente en la formulación M y FI, mientras que la formulación FS se mantenía igual que la formulación control (C). A nivel microestructural, se apreció que la estructura de los bizcochos con fibra era más compacta. Los resultados de la digestión *in vitro* mostraron que la formulación FS contenía mayor cantidad de almidón resistente que las demás formulaciones.

Palabras clave: bizcocho, fibra, reemplazo de grasa, estructura, textura, viscosidad, digestión.

Autora: Maria Elisa París Zaragoza

Tutora: Isabel Hernando Hernando

Cotutora: Amparo Quiles Chuliá

Valencia, junio de 2015

EFFECT OF FIBRE AS FAT REPLACER IN CAKES STRUCTURE

ABSTRACT

In a social context in which diseases are more prominent caused by the excessive calorie intake and the lack of fibre in the diet, consumers value healthy and low fat foods more positively. Because of the relation between food and health, cakes reformulation have been studied to decrease its lipid content. In this study, the effect of replacing 50% of the fat with fibre in the formulation of cakes have been evaluated. The fibres that have been used are; Vitacel KF 200, a natural ingredient from the potato fibre, rich in insoluble fibre (FI), Fibersol-2, resistant maltodextrin and is considered as rich in soluble fibre (FS) and a mixture of equal parts of both fibres (M). To achieve it, the properties of the cake batter was analysed, evaluating the apparent viscosity and the structure by optical microscopy. Apparent viscosity results in lower viscosity were obtained when fibre was added, because fibre was necessary to hydrate with water, which was causing a decrease in viscosity. The optical microscopy shows that fat acts as stabilizing air bubbles, forming a film at the air-matrix, while partial fat replacement results in decreased stability, coalescing and forming diffusion partways, which are observed in the macroscopic structure of the crumb. The FI formulation obtained the biggest amount of distribution partways and a higher percentage of air occluded inside. Along with the macroscopic structure of the crumb, the texture and microstructure by field emission scanning electron microscope (FESEM) was also analysed, and the changes in the starch digestibility with the *in vitro* digestion. In the texture of the cakes, chewiness and hardness properties increased with the M and FI formulation, while FS was the same as C formulation. A microstructural level showed that the structure of the cakes with fibre it was more compact. The results of *in vitro* digestion showed that FS contained as much resistant starch as other formulations.

Keywords: cake, fibre, fat replacement, structure, texture, viscosity, digestion.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	6
3.1 INGREDIENTES	6
3.2 ELABORACIÓN DE LA MASA DE LOS BIZCOCHOS	6
3.3 ANÁLISIS DE LA MASA	8
3.3.1. VISCOSIDAD APARENTE.....	8
3.3.2. MICROSCOPIA ÓPTICA	8
3.4 ANÁLISIS DEL BIZCOCHO	8
3.4.1. TEXTURA.....	8
3.4.2. ESTRUCTURA MACROSCÓPICA DE LA MIGA	9
3.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE EMISIÓN DE CAMPO (FESEM)	9
3.4.4. DIGESTIÓN <i>IN VITRO</i>	9
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4.1 VISCOSIDAD APARENTE	11
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	12
4.3 TEXTURA.....	14
4.4 ESTRUCTURA MACROSCÓPICA DE LA MIGA	15
4.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE EMISIÓN DE CAMPO (FESEM)	17
4.2 DIGESTIÓN <i>IN VITRO</i>	18
5. CONCLUSIONES	21
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Composición de las formulaciones estudiadas (g); C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.	7
TABLA 2. Valores medios de la viscosidad aparente de las masas. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.	11
TABLA 3. Valores medios de las propiedades texturales de los bizcochos, en función de su formulación. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.....	14
TABLA 4. Valores medios de las características estructurales de la miga de los bizcochos para las diferentes formulaciones. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.....	15

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Imagen de las burbujas en expansión a diferentes temperaturas durante la micrococción simulada en el microscopio (10x). C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.....	12
FIGURA 2. Histograma de la distribución de tamaños de las burbujas a diferentes temperaturas. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.....	13
FIGURA 3. Imágenes escaneadas de los bizcochos C (bizcocho control), FS (bizcocho elaborado con fibra soluble) M (bizcocho elaborado con mezcla de fibras) y FI (bizcocho elaborado con fibra insoluble), campo de 10 x 4 cm y sus imágenes binarizadas correspondientes (118 pixeles/cm). Flechas: canales de difusión.	16
FIGURA 4. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). A: Fibra soluble Fibersol-2 (100x). B: Fibra insoluble Vitacel KF-200 (100x). gr: gránulos de almidón, pc: pared celular. Magnificación (100x). Barra = 20 μ m.....	17
FIGURA 5. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). C: Bizcocho control. FS: Bizcocho elaborado con fibra soluble. FI: Bizcocho elaborado con fibra insoluble. gr: gránulos de almidón. Magnificación de los bizcochos (250x). Barra = 20 μ m.....	18
FIGURA 6. Proporción almidón hidrolizado (mg glucosa/g de bizcocho) durante la digestión <i>in vitro</i> de los bizcochos, en función de la formulación	19
FIGURA 7. Histograma de distribución del almidón de rápida digestibilidad (RDS), almidón de lenta digestibilidad (SDS) y el almidón resistente (RS), respecto a los mg almidón/ g bizcocho, en función de las distintas formulaciones (C, FS y FI).....	19

1. INTRODUCCIÓN

El creciente interés de los consumidores por su salud y bienestar, junto con la preocupación por incluir en su alimentación diaria alternativas que contribuyan a elevar su nivel de satisfacción, ha obligado a la industria de alimentos a enfocarse en la búsqueda de soluciones que le permitan satisfacer estas necesidades. De este modo, en la actualidad el consumidor valora de forma positiva aquellos alimentos que, además de proporcionar nutrientes esenciales para el normal desarrollo y funcionamiento del organismo (vitaminas, hidratos de carbono, lípidos, proteínas...) poseen sustancias con posibles efectos saludables a largo plazo, como los alimentos funcionales (León-Espinosa *et al.*, 2015). Los ingredientes funcionales promueven beneficios específicos para la salud, al mismo tiempo que ayudan a prevenir y contrarrestar el riesgo de algunas enfermedades; los ingredientes funcionales generan alimentos funcionales.

Según el Real Decreto 2419/1978, se entiende como productos de bollería aquellos preparados alimenticios elaborados básicamente con masa de harinas comestibles fermentada, cocida o frita, a la que se han añadido o no otros alimentos, complementos panarios y/o aditivos autorizados. La masa está compuesta por una base de harina que incorpora grasa y azúcar como elementos principales y como opcionales huevos, leche y otros componentes. Los productos de pastelería se clasifican según los distintos tipos de masas: masas de hojaldre, masas azucaradas, masas escaldadas, masas de repostería y masas batidas. Los bizcochos están formados por masas batidas, que son las elaboradas con huevos, azúcares, harinas y que ha sido sometida a un batido, resultando masas de gran volumen, tiernas y suaves.

Según el Real Decreto 1124/1982 se entiende por 'bizcocho' el producto elaborado con harina, azúcar y huevos, batidos a gran velocidad para conseguir que monte adecuadamente, depositándose en moldes o en chapa lisa para su horneado. La clasificación en secos y blandos obedece al mayor o menor porcentaje de humedad que contienen a la salida del horno, pudiendo adoptar toda clase de formas. La masa de bizcocho es una emulsión compleja de grasa en agua que consta de una fase discontinua de burbujas de aire y una fase continua de huevo, azúcar, agua y grasa, en la que se dispersan las partículas de harina; durante el mezclado es cuando se incorpora el aire en la masa del bizcocho (Kocer *et al.* 2007).

Conforme a las cifras que recopilan los Paneles de Consumo Alimentario del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), durante el 2014, los hogares españoles consumieron 618,8 millones de kilos de bollería, pastelería, galletas y cereales y gastaron 2.760 millones de euros en estos productos. En términos per cápita, se llega a 13,8 kilos de consumo y 61,57 euros de gasto. El consumo más notable se asocia a la bollería y pastelería (5,93 kilos/persona/año), seguido de las galletas (5,39 kilos per cápita). Respecto a los productos de bollería con fibra, el consumo es de 0,34 kilos/persona/año.

En la actualidad la dieta de los países desarrollados es deficiente en fibra, lo que conduce a numerosas complicaciones de salud. Hoy en día hay dos razones principales por las que agregar fibra a productos horneados: el aumento de la ingesta de fibra dietética y la

disminución de la ingesta calórica. Una de las estrategias utilizadas para este propósito es eliminar la totalidad o parte de las grasas, el componente que proporciona el mayor número de calorías, y sustituirlos por otros productos bajos en calorías (sustitutos de grasa, como la fibra) (Gómez M. *et al* 2002).

El concepto de fibra ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. En 2001, la AACC (American Association of Cereal Chemists) adoptó la siguiente definición: “La fibra dietética es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos, resistentes a la digestión o absorción en el intestino delgado humano, con fermentación parcial o total en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas de la planta. La fibra dietética promueve efectos fisiológicos beneficiosos, incluyendo laxación y/o disminución de la glucosa en sangre”

En 2002 el FNB (Food and Nutrition Board of the National Academy of Sciences, USA) definió la fibra dietética de la siguiente forma: “La fibra dietética consiste en carbohidratos no digeribles y lignina intrínsecos e intactos en las plantas. La fibra funcional consiste en carbohidratos no digeribles aislados y lignina que tienen efectos fisiológicos beneficiosos en humanos. La fibra total es la suma de la fibra dietética y la fibra funcional” Estas definiciones nuevas incluyen oligosacáridos, almidón resistente y lignina en la fibra dietética y fibra total.

La fibra dietética llega al intestino grueso de forma inalterada y aquí las bacterias del colon, con sus numerosas enzimas de gran actividad metabólica, pueden digerirla en mayor o menor medida dependiendo de su estructura. Este proceso de digestión se produce en condiciones anaerobias, por lo que se denomina fermentación. Los principales productos de la fermentación de la fibra son: ácidos grasos de cadena corta (AGCC), CH₄, CO₂ y H₂O.

La fibra dietética se puede clasificar en: fibras solubles y fibras insolubles.

La fibra soluble incluye a las pectinas, parte de las hemicelulosas (tipo A), las gomas, los mucílago y los poli y oligosacáridos. Cuando la fibra entra en contacto con el agua, ésta se disuelve, y forma geles viscosos en el intestino delgado, dichos geles atrapan el colesterol que se encuentra en el intestino, evitando así que éste pase a la corriente sanguínea. Como consecuencia de su viscosidad, enlentecen el vaciamiento gástrico y aumentan su distensión prolongando la sensación de saciedad. La fibra aumenta los movimientos peristálticos del intestino, provocando un aumento de la frecuencia de las deposiciones y del volumen de las heces, debido a que al hidratarse aumentan su volumen. Debido a todo ello, la fibra soluble tiene propiedades beneficiosas, como la capacidad para reducir el estreñimiento y mejorar la flora y tránsito intestinal, equilibrar el nivel de colesterol, prevenir el cáncer de colon y combatir las subidas de glucosa en sangre.

La fibra insoluble se compone, fundamentalmente, de fragmentos de las paredes celulares que contienen celulosa, parte de las hemicelulosas (tipo B) y lignina. Dichas fibras son capaces de retener el agua en su matriz estructural, formando mezclas de baja viscosidad, lo que produce un aumento de la masa fecal y acelera el tránsito intestinal. La fibra insoluble es poco fermentable, por lo cual mantiene su capacidad de retención hídrica, contribuyendo a la regulación de la consistencia y del volumen de las deposiciones emitidas. Entre sus propiedades beneficiosas se encuentra la capacidad de limpieza de las paredes del intestino eliminando los desechos adheridos, el aumento del volumen de las heces, y además

contribuye a disminuir la concentración y el tiempo de contacto de potenciales carcinogénicos con la mucosa del colon.

En el presente trabajo, se van a emplear dos tipos distintos de fibras; una fibra soluble y una fibra insoluble; además se empleará una mezcla de ambas fibras.

La adición de fibras confiere a los productos unas propiedades nutricionales y sensoriales especiales. Las fibras pueden proceder de muchas fuentes diversas. Tiene una gran capacidad de absorción de agua, por lo que es necesario añadir agua en las formulaciones a las que se añade fibra. Un problema que surge con la adición de fibra a la masa de los productos horneados es que la captación de agua o hidratación de la fibra es más lenta que la de las partículas de endospermo de la harina, produciendo así cambios significativos en la viscosidad de la masa y aumentando el tiempo de elaboración. Una influencia importante de la adición de fibra es la reducción de la retención de gas en la masa, y por ello, del volumen del producto.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las recomendaciones sobre el consumo de fibra para mantener una buena salud cardiovascular en adultos (por encima de 18 años) es de 25-35 g/día, con una proporción entre la fibra insoluble y soluble de 3:1.

Respecto a la grasa, los bizcochos contienen aproximadamente un 15-25% de grasa (Matsakidou *et al.*, 2010). Las grasas juegan un papel muy importante y versátil en la elaboración de bizcochos. Las grasas son responsables de la formación de la estructura de los bizcochos, ayudando a promover la incorporación de aire en la masa en forma de pequeñas burbujas durante el amasado y aportando así un volumen mayor y una esponjosidad en el producto final. Evita el desmenuzamiento de la miga, creando un bizcocho más compacto y esponjoso y de textura más suave. Durante el amasado, la grasa actúa como lubricante y rodea la superficie de las proteínas de la harina inhibiendo la creación de una red cohesiva y extensible de gluten y limitando la captación de agua (Wade, 1988). Además mejora la retención de humedad en el producto final, reduce el fenómeno de retrogradación del almidón (Gómez M. *et al.*, 2009) y aumenta la vida útil del producto (Lai y Lin 2007). Aporta un sabor y aroma agradable y una mayor palatabilidad, evitando así la sensación de sequedad en la boca del producto final y es vehículo de muchos aromas debido al comportamiento lipofílico de estos; además aumenta el valor alimenticio.

Sin embargo, una ingesta excesiva de grasa se ha relacionado con la obesidad (Bray *et al.* 2004) y problemas cardiovasculares, así como con varios tipos de cáncer (Rothstein 2006). Por este motivo, las empresas y los investigadores han intentado minimizar el contenido de grasa y aceite en productos como pasteles.

Existen diferentes trabajos sobre la reducción de grasa en bizcochos y magdalenas mediante la adición de diferentes carbohidratos y fibras como inulina (Zahn *et al.*, 2010; Rodríguez-García *et al.*, 2012, 2014b; Psimouli y Oreopoulou, 2013), β -glucano (Kalinga y Mishra 2009; Lee *et al.*, 2005) salvado de avena y harina de semillas de lino (Lee *et al.*, 2004), oligofructosa (Devereux *et al.* 2003., Zahn *et al.* 2010), fibra de cacao (Martínez-Cervera *et al.*, 2011), fibras derivadas de cereales (Lee *et al.* 2005; Kalinga and Mishra 2009), povidex (Kocer *et al.*, 2007), maltodextrina (Lakshminarayan *et al.*, 2006; Psimouli y Oreopoulou, 2013), pectina de cítrico (Psimouli y Oreopoulou, 2013) y almidón resistente (Bauxauli R. 2007). Dichos trabajos se han centrado en estudiar las propiedades fisicoquímicas y estructurales

como consecuencia de la adición de diferentes ingredientes en bizcochos y/o magdalenas. Sin embargo hay poca información de las diferencias que se producen en las propiedades de los bizcochos al utilizar fibra soluble o insoluble para sustituir la grasa.

Teniendo en cuenta la necesidad de aumentar la ingesta de fibra dietética y que los consumidores demandan alimentos más sanos, este trabajo se centra en la posibilidad de ofrecer bizcochos con un mayor valor nutricional, que presenten un contenido reducido en grasa y fibra añadida.

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo general evaluar el efecto del reemplazo del 50% de grasa, por diferentes tipos de fibra (soluble e insoluble), en productos horneados de alta humedad, como son los bizcochos, sobre su estructura, a nivel micro y macro y sus propiedades físicas. Además se pretende estudiar los cambios en la digestibilidad *in vitro* del almidón, como consecuencia de la adición de este ingrediente en la formulación de los bizcochos.

Para ello se emplea una fibra soluble, una fibra insoluble y una mezcla a partes iguales de ambas fibras.

Para alcanzar dicho objetivo general, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Estudiar la distribución (microestructura) y funcionalidad (interrelación estructura-propiedades físicas) de los ingredientes en la masa y en el bizcocho final.
- Evaluar los cambios a nivel de la micro y macroestructura (distribución de ingredientes, evolución de la fase gas, estructura alveolar) y de las propiedades físicas (viscosidad y textura) en masas y bizcochos con reemplazo de grasa por fibras.
- Evaluar los posibles cambios en la digestibilidad *in vitro* del almidón como consecuencia de la adición de fibra.

Para alcanzar los objetivos expuestos en el apartado anterior, se programa el siguiente plan de trabajo:

- Búsqueda y estudio bibliográfico, de manera sistemática, durante la realización del Trabajo Final de Grado. Estudio de la normativa y protocolos a seguir en la parte experimental.
- Diseño de experimentos.
- Obtención y selección de las formulaciones adecuadas.
- Elaboración de los bizcochos con los tipos diferentes de fibra.
- Determinación de la microestructura, mediante microscopía óptica, y de la viscosidad aparente de la masa del bizcocho.
- Determinación de la textura de los bizcochos obtenidos y de la estructura macroscópica de la miga.
- Determinación de la microestructura de los bizcochos por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo.
- Determinación de los cambios en la digestibilidad del almidón.
- Análisis de resultados
- Redacción del documento de Trabajo Fin de Grado

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 INGREDIENTES

Para la preparación de los bizcochos se emplearon los siguientes ingredientes:

- ✓ Harina de trigo (Harinas Segura S.L, Torrente, Valencia, España, composición proporcionada por el proveedor: 13,50-15,50% humedad, 9-11% proteínas).
- ✓ Azúcar blanco (AB Azucarera Ibérica S.L.U., Madrid, España).
- ✓ Yema y clara de huevo, ambas líquidas y pasteurizadas (Ovocity, Llombay, Valencia, España).
- ✓ Leche en polvo desnatada (Corporación Alimentaria Peñasanta, S.A., Siero, Asturias, España).
- ✓ Aceite refinado de girasol (Aceites del Sur-Coosur, S.A., Vilches, Jaén, España).
- ✓ Bicarbonato sódico E-500ii y ácido cítrico E-300 (Sodas y Gaseosas A. Martínez, S.L., Cheste, Valencia, España).
- ✓ Sal.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Fibersol-2 ingrediente alimentario, formado por maltodextrina resistente, rico en fibra soluble (Matsutani Chemical Industry co., Ltd, Hyogo, Japón; especificaciones proporcionadas por el proveedor: 90% fibra dietética total, 5% humedad).
- ✓ Vitacel KF 200 ingrediente natural procedente de la fibra de patata, rico en fibra insoluble (J.Rettenmaier & Söhne gmbh + co Kg, Holzmühle, Rosenberg; especificaciones proporcionadas por el proveedor: 65% fibra dietética total).

3.2 ELABORACIÓN DE LA MASA DEL BIZCOCHO

En la tabla 1 se muestra las cuatro formulaciones empleadas en este trabajo; la formulación control (C), y tres formulaciones más, en las que se reemplaza un 50% de aceite de girasol, y en su lugar se añade diferentes tipos de fibra; fibra soluble, procedente del Fibersol-2 (FS), fibra insoluble, procedente de la fibra Vitacel KF 200 (FI), y la mezcla de Vitacel KF 200 y Fibersol-2 en partes iguales (M). Según las especificaciones proporcionadas por los fabricantes, para la dispersión y homogenización total del ingrediente funcional, se ha de añadir agua, en la elaboración de las masas, con una determinada relación de fibra:agua. Para FS, la relación es 1:1; para M, la relación es 1:2,5; y para la FI, la relación es 1:4.

TABLA 1. Composición de las formulaciones estudiadas (g); C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Ingredientes	C	FS	M	FI
Harina	100	100	100	100
Azúcar	100	100	100	100
Yema	27	27	27	27
Clara	54	54	54	54
Leche	50	50	50	50
Aceite	46	23	23	23
Fibra Soluble	0	6,5	3,25	0
Fibra Insoluble	0	0	3,25	6,5
Agua	0	6,5	16,25	26
Bicarbonato	4	4	4	4
Ácido Cítrico	3	3	3	3
Sal	1,5	1,5	1,5	1,5

Fórmulas en % respecto a la harina

Las masas fueron preparadas siguiendo el procedimiento “mezclado todo en uno” de Rodríguez-García *et al.* (2014a), con algunas modificaciones. En primer lugar se introdujeron los ingredientes líquidos de la receta, clara, yema, leche y agua, en la amasadora Kenwood Major Classic (Havant, Inglaterra, UK). A continuación, se adicionaron los ingredientes sólidos, harina, azúcar, las fibras correspondientes, bicarbonato, ácido cítrico y sal, en el mismo recipiente. Por último se añadió el aceite de girasol.

Para obtener las masas homogéneas, se realizó el mezclado de todos los ingredientes durante 30 s a 202 rpm, seguido de 1 min a 260 rpm y por último 3 min a 320 rpm.

Para la obtención de los bizcochos, se vertió 700 g de masa en moldes de Pyrex® de 20 cm de diámetro y se introdujo en un horno convencional (Electrolux, modelo EOC3430DOX, Estocolmo, Suecia), precalentado a 180°C durante 30 min.

Las condiciones de horneado para cada formulación, fueron las siguientes: bizcocho control (C), 180°C durante 43 min; bizcocho con fibra soluble (FS), 180°C durante 47 min; bizcocho con mezcla de fibra soluble e insoluble (M), 180° durante 49 min y bizcocho con fibra insoluble (FI), 180° durante 50 min. Una vez sacados los bizcochos del horno, se dejaron atemperar a temperatura ambiente durante 1 h y 30 minutos antes de proceder a los análisis. Todas las masas y bizcochos se prepararon por triplicado y los análisis se realizaron dentro de las 24 h siguientes a su elaboración.

3.3 ANÁLISIS DE LA MASA

3.3.1 Viscosidad aparente

La viscosidad de las muestras se determinó mediante un viscosímetro Brookfield digital Viscotester Haake 6 R Plus de (Thermo Scientific (Waltham, USA). El usillo empleado fue el R3, a una velocidad de 6 rpm y a una temperatura de 25°C. Las medidas se tomaron cada 6 s durante 30 min. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado.

3.3.2 Microscopía óptica. Simulación de microhorneado

Para la observación microscópica durante la simulación del microhorneado se utilizó una placa de control de temperatura (Analysa-LTS350, Linkam, Surrey, UK) montada bajo la lente del microscopio óptico (Nikon ECLIPSE 80i, Nikon Co., Ltd., Tokyo, Japan). Se colocó una gota de la muestra en la concavidad del portamuestras y éste en la placa de control de temperatura. Durante el calentamiento, la rampa de temperatura fue controlada por un sistema de refrigeración, con una bomba de nitrógeno líquido (Linkam). El perfil de temperatura utilizado fue de 1,5°C/min desde la temperatura ambiente (25°C) hasta 105°C. Las muestras de las masas fueron observadas con unos aumentos de 4X (objetivo x4/0.13∞/- WD 17.1, Nikon). Las imágenes se capturaron con una cámara (ExWaveHAD, model no.DXC-190) acoplada al microscopio y conectada a un ordenador. Durante la simulación del microhorneado, se grabó un video con las imágenes capturadas cada 10 s en un formato de 640x540 pixels utilizando el software del microscopio (Linksys 32, Linkam). Se analizaron tres muestras de cada formulación. Las imágenes fueron analizadas utilizando el software ImageJ (National Institute of Health, Bethesda, MD).

3.4 ANÁLISIS DE LOS BIZCOCHOS

3.4.1 Textura

Las propiedades texturales del bizcocho se evaluaron mediante un analizador de textura TA-TXT plus (Stable Microsystem, Ltd., Godalming, England, UK) usando el programa Texture Exponent Lite 32 (versión 6.1.4.0, Stable Microsystems).

Para el análisis de perfil de textura (TPA) se procedió de la siguiente manera: se cortaron cubos de la zona central del bizcocho y se eliminó la corteza (3 x 3 x 3 cm). Se realizó una doble compresión de 40% de deformación y a una velocidad de 1 mm/s, con un tiempo de espera de 5 s entre las dos compresiones. La compresión se realizó con una sonda cilíndrica de aluminio de 5 cm de diámetro. Los resultados analizados fueron: dureza (el pico de fuerza máxima durante el primer ciclo de compresión), elasticidad (la altura que se recupera durante el tiempo de espera entre el final del primer ciclo y el comienzo del segundo), cohesividad (la relación entre la segunda área positiva y la primera) y masticabilidad (dureza x elasticidad x cohesividad). Cada medida se realizó por cuadruplicado.

3.4.2 Estructura macroscópica de la miga

Los bizcochos, se cortaron transversalmente por la zona central, en dos mitades que se escanearon con un escáner HP Scanjet G2710 (HewlettPackard, Palo Alto, CA, U.S.A) con una resolución de 300 dpi. Se observaron secciones de 10 x 4 cm de campo. La imagen recortada se separó en canales, se contrastó, se segmentó y por último se binarizó con ayuda del programa ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA). Se analizaron cuatro imágenes por formulación. Los parámetros analizados fueron el número total de alveolos, el área total de los mismos y el porcentaje de aire presente en los bizcochos.

3.4.3 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

De cada una de los bizcochos estudiados, se cortaron cubos de 0,5 cm de lado que se congelaron a -80°C y se liofilizaron (Telstar, Lyoquest 55, Terrassa, Barcelona, España). Para la observación de las fibras soluble e insoluble, éstas se montaron directamente en el portamuestras. Posteriormente, todas las muestras se recubrieron con platino a vacío, y se observaron en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) (Zeiss, modelo Ultra 55, Oberkochen, Alemania). Las formulaciones se analizaron por duplicado.

3.4.4 Digestión *in vitro*

Las digestiones de los bizcochos englobaron tres etapas: oral, gástrica e intestinal. Para la digestión oral se siguió el protocolo descrito por Smith et al. (2015), con algunas modificaciones. Para ello, se desmenuzó a mano 25 g de bizcocho y se añadió 35 mL de disolución de saliva previamente incubada a 37°C. Esta mezcla se trituró con una batidora durante 15 s, se añadió 70 mL de agua bidestilada y se mezcló a mano durante 1 min para simular la masticación. La disolución de saliva fue preparada según Mishellany-Dutor et al. (2011). Se disolvieron en 1 L de agua bidestilada, 5,208 g de NaHCO₃, 1,369 g de K₂HPO₄·3H₂O, 0,877 g de NaCl, 0,477 g de KCl, 0,441 g de CaCl₂·2H₂O, 2,16 g de mucina de estómago porcino tipo I (PGM Sigma M2378) y 8,70 g de α-amilasa tipo VI-B de páncreas porcino (Sigma A3176). En la etapa gástrica, para digerir 25 g de bizcocho que ya había sido digerido oralmente, se introdujeron 25 g de fluido gástrico en el digestor, formado por un reactor de vidrio con camisa y agitación magnética continua, acoplado a un circulador de agua de temperatura controlada. El fluido gástrico se preincubó a 37°C durante 5 min a pH 2. Se añadió la muestra en el reactor, se ajustó la mezcla a pH 2 con HCl 2M, se añadió 0,006 g de pepsina (Sigma P7000) y se incubó durante 1 h a 37°C con agitación. La disolución de electrolitos que constituyeron el fluido gástrico se preparó disolviendo en 1 L de agua destilada 3,1 g de NaCl, 0,11 g de CaCl₂, 1,1 g de KCl, 5,68 mL de NaCO₃ (1M) y se ajustó el pH a 2 con HCl 2M. En la etapa intestinal, se llevó el pH de la muestra digerida a 6 con NaHCO₃ 0,1M y se añadió 62,5 mL de pancreatina (Sigma P1750, 4xUSP) más sales biliares (Sigma B8631). Se añadió amiloglucosidasa (A7095≥300 U/mL, Sigma), en la proporción 0,2 mL por gramo de almidón según Oh et al., (2014) y Soog et al., (2014). Se llevó el pH a 7,5 con NaHCO₃ a 0,1M y se incubó a 37 °C durante 3 h en agitación. Se sacaron alícuotas a los 0, 20, 60, 90, 120 y 180

min de la digestión, se añadió inmediatamente 1,4 mL de etanol para parar la reacción (Bae et al., 2013, Oh et al. 2014) y se centrifugó a 3000 rpm durante 3 min. A continuación, se determinó la concentración de glucosa, mediante el Kit GOPOD a 510 nm. Para ello, se tomaron alícuotas de 0,1 mL del sobrenadante de la muestra centrifugada, a la cual se añadió 3 mL de reactivo GOPOD, se incubó a 40-50 °C durante 20 min y se leyó la absorbancia a 510 nm.

Las fracciones de almidón fueron calculadas según el método de Englyst H.N *et al.*, (1992), según el cual los valores obtenidos para G_{20} (glucosa liberada los 20 minutos de digestión), G_{120} (glucosa liberada a los 120 minutos de digestión), FG (glucosa libre) y TG (glucosa total) fueron utilizados para obtener los valores de TS (almidón total), RDS (almidón de rápida digestibilidad), SDS (almidón de lenta digestibilidad) y RS (almidón resistente);

$$TS = (TG - FG) \times 0,9$$

$$RDS = (G_{20} - FG) \times 0,9$$

$$SDS = (G_{120} - G_{20}) \times 0,9$$

$$RS = TS - (RDS + SDS)$$

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA). Se calcularon las diferencias mínimas significativas (LSD) con un nivel de significación $P < 0.05$. Para ello se empleó el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.II (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, Estados Unidos).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 VISCOSIDAD APARENTE

La tabla 2 muestra los valores de viscosidad aparente para las distintas masas de bizcochos estudiadas. Como se puede apreciar éstos valores oscilaron entre 10868,50 mPa.s (C) y 6683,95 mPa.s (FI).

TABLA 2. Valores medios de la viscosidad aparente de las masas. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Bizcocho	Viscosidad (mPa.s)
C	10868,50 ^a (531,23)
FS	9767,42 ^b (821,92)
M	8715,16 ^c (496,65)
FI	6683,95 ^d (437,55)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b, c} las medias con letras diferentes en la misma fila difieren significativamente (P < 0,05)

El bizcocho control (C) fue el que presentó una mayor viscosidad, mostrando diferencias significativas (P < 0,05) con las formulaciones FS, M y FI. Todas las formulaciones estudiadas tuvieron una viscosidad aparente significativamente diferente (P < 0,05) entre ellas. La adición de fibra insoluble (FI) al bizcocho provocó una disminución significativa de la viscosidad aparente con respecto a las demás formulaciones (P < 0.05). Entre los bizcochos que tienen fibra, se puede observar como la adición de fibra soluble, Fibersol-2, provocó un aumento significativo (P < 0,05) de la viscosidad respecto a la formulación con fibra insoluble, Vitacel KF 200, esto es debido a que para elaborar los bizcochos, la fibra insoluble requiere cuatro veces más agua en su formulación que la fibra soluble.

La viscosidad de los bizcochos aumentó a medida que el contenido de agua en la formulación disminuyó. En el bizcocho control (C), al no contener fibra, no hizo falta añadir agua a la formulación, mientras que para preparar los bizcochos con FS, M y FI el contenido de agua aumentó respectivamente, y con ello la viscosidad aparente descendió. Esto es debido a que en la fase acuosa de la masa hay más agua libre que no está ligada a los componentes, lo que influye en la viscosidad de la masa (Sahi y Álava, 2003).

Zahn *et al.*, (2010) y Rodríguez-García *et al.*, (2012) también encontraron una disminución de la viscosidad aparente de la masa usando inulina como sustituto de grasa en muffins y bizcochos respectivamente, y Lee *et al.*, (2005) usando un sustituto rico en β -glucano y amilodextrina.

4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

La figura 1 muestra las imágenes de las masas de las formulaciones estudiadas durante la micro cocción simulada en el microscopio. A partir de ellas se calculó la distribución del tamaño de las burbujas con el aumento de temperatura (figura 2).

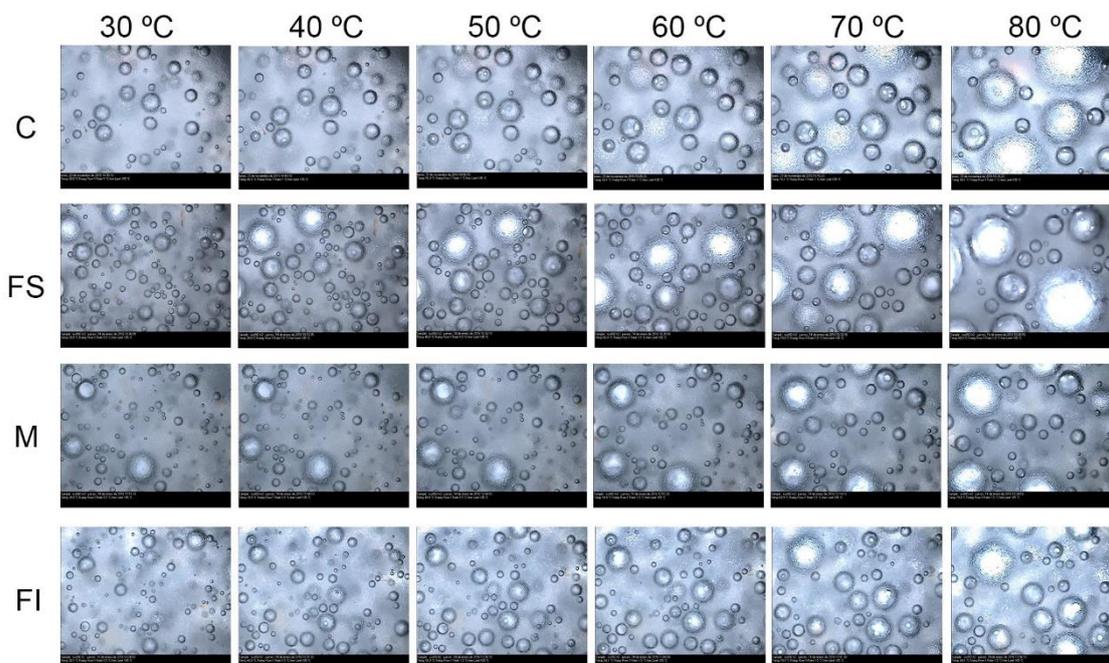


FIGURA 1. Imagen de las burbujas en expansión a diferentes temperaturas durante la micro cocción simulada en el microscopio (10x). C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

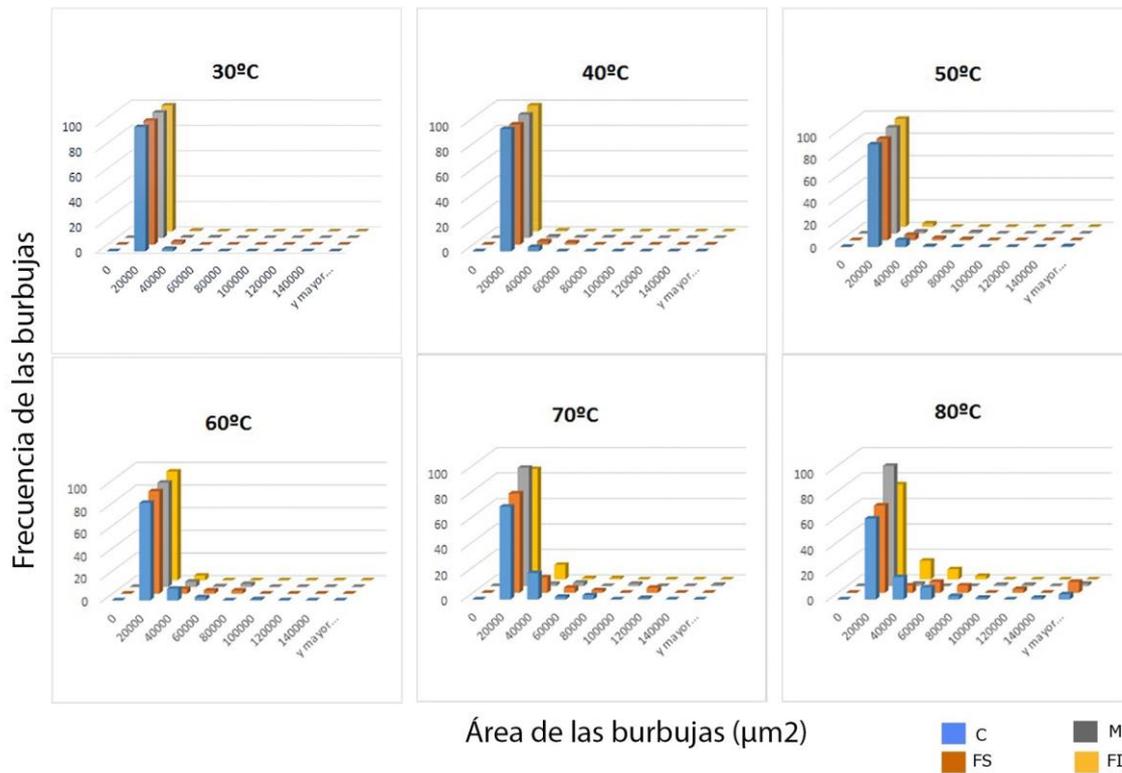


FIGURA 2. Histograma de la distribución de tamaños de las burbujas a diferentes temperaturas. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

En la formulación control (C) el tamaño de las burbujas incrementó gradualmente con el aumento de temperatura. Esto es debido a que el aceite actuó como estabilizador de las burbujas, formando una película en la interfase aire-matriz. En las demás formulaciones, en las que se ha reemplazado el 50% de la grasa y sustituido por fibra, hubo una mayor cantidad de burbujas de aire de menor área ocluidas en la masa.

A medida que la temperatura aumentó, el crecimiento de las burbujas fue más rápido, tendiendo a coalescer más rápidamente, formando así una menor cantidad de burbujas de aire en el interior pero con un área mayor, ocluyendo mayor cantidad de aire en el interior. Probablemente al disminuir el contenido de aceite, también hubo menor estabilidad en el sistema, lo que permitió el mayor crecimiento de las burbujas.

Para la fibra insoluble (FI), las burbujas fueron de distintos tamaños pero con una mayor proporción de burbujas pequeñas si se compara con la masa con FS. Y para la formulación mezcla (M), se apreció una notoria mayor cantidad de burbujas pequeñas cuando la temperatura alcanzó los 80°C.

El análisis de las burbujas de aire de la masa está directamente relacionado con la propiedad de viscosidad aparente de la masa. Así, el bizcocho control que presenta una viscosidad aparente mayor, también presentó un aumento del tamaño de las burbujas más gradual y un menor proceso de desproporción por lo tanto, la viscosidad ayudaría en la estabilidad de la masa

4.3 TEXTURA

En la Tabla 3 se presentan los parámetros de dureza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad de los bizcochos obtenidos a partir de las curvas del análisis del perfil de textura (TPA).

El reemplazo del 50% de grasa de los bizcochos por diferentes tipos de fibra tuvo efectos considerables en las propiedades texturales del bizcocho.

TABLA 3. Valores medios de las propiedades texturales de los bizcochos, en función de su formulación. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

BIZCOCHO	DUREZA (N)	ELASTICIDAD	COHESIVIDAD	MASTICABILIDAD (N)
C	4,98 ^a (0,46)	0,88 ^a (0,01)	0,71 ^a (0,01)	3,15 ^a (0,28)
FS	4,99 ^a (0,48)	0,89 ^a (0,01)	0,74 ^b (0,01)	3,30 ^a (0,29)
M	5,90 ^b (0,90)	0,89 ^a (0,01)	0,74 ^b (0,01)	3,95 ^b (0,56)
FI	7,95 ^c (0,94)	0,89 ^a (0)	0,74 ^b (0,01)	5,22 ^c (0,56)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b, c} las medias con letras diferentes en la misma fila difieren significativamente (P < 0,05)

La adición de Fibersol-2 (FS) en la formulación, no dio lugar a diferencias significativas (P>0,05) en valores de dureza al comparar con la formulación control (C), mientras que las otras dos formulaciones dieron diferencias significativas (P < 0,05) con el resto, dando para la formulación con Vitacel KF 200 (FI), valores de dureza significativamente mayores (P < 0,05) en comparación con las demás formulaciones. Valores altos de dureza confieren al producto características menos deseables, ya que cuanto más alto sea el valor, querrá decir que más fuerza será necesaria para alcanzar el valor de deformación deseado.

Un aumento en la dureza y una disminución en el volumen del producto puede ser debido a la reducción de aire en la masa del bizcocho y a la coagulación de las proteínas de la harina durante el horneado, provocando una estructura de la miga más densa (Kalinga *et al.* 2009). La reducción del contenido de grasa provoca un aumento en la dureza, debido a que la grasa ayuda a promover la incorporación de aire durante el amasado, aportando un volumen y esponjosidad mayor, además de envolver a las proteínas para inhibir la creación de una red cohesiva y extensible de gluten y limitando la captación de agua (Wade, 1988).

Chung *et al.* (2010) y Khouryieh *et al.* (2005) corroboraron este hecho ya que obtuvieron valores de dureza significativamente mayores en magdalenas con menores cantidades de grasa que en la control. Khouryieh *et al.* (2005) también obtuvieron valores de masticabilidad significativamente mayores que en el control, al estudiar magdalenas elaboradas con menos grasa e incorporación de maldodretrina y goma xantana.

La elasticidad representa la altura a la que el alimento se recupera durante el tiempo que tarda entre el final del primer mordisco y el comienzo del segundo mordisco, es decir, mide la cantidad de estructura original del alimento que se ha roto por la compresión inicial. Los valores de elasticidad indican que no hubo diferencias significativas ($P > 0,05$) entre las formulaciones estudiadas, lo cual pudo ser debido a que todos los bizcochos contenían la misma harina. La harina es principalmente la responsable de la elasticidad y la fuerza de la masa debido a las gluteninas, las proteínas del gluten que contiene la harina.

La formulación C obtuvo un valor de cohesividad significativamente menor ($P < 0,05$) que el resto de formulaciones estudiadas. La adición de fibra implicó un mayor trabajo para comprimir la muestra por segunda vez respecto a la primera compresión; adicionar fibra al bizcocho provoca que la estructura sea más compacta que el bizcocho control. Lee *et al.* (2004) y Eslava *et al.* (2015) encontraron resultados similares en bizcochos al comparar el control con el elaborado con harina de semilla de lino y con Optisol™5300 respectivamente como sustituto de grasa.

Los valores del parámetro masticabilidad siguieron una tendencia similar a los de dureza. El bizcocho C obtuvo valores de masticabilidad significativamente más bajos ($P < 0,05$) que el bizcocho elaborado con mezcla de ambas fibras (M) y que el bizcocho con FI; en cambio no se observaron diferencias significativas ($P > 0,05$) entre el bizcocho C y el elaborado con FS. El bizcocho elaborado con FI dio el resultado de masticabilidad más elevado, con diferencias significativas ($P < 0,05$) con el resto. Esto quiere decir que a la hora de masticar el bizcocho, se requiere una energía mayor para masticar el alimento y que esté listo para su ingestión (Durán *et al.*, 2001). Cuando las grasas son reemplazadas, la masticabilidad del producto se ve aumentada.

4.4 ESTRUCTURA MACROSCÓPICA DE LA MIGA

La tabla 4 muestra la media de las características estructurales de la miga (número de alveolos, área total y % de aire) de cada formulación de bizcocho estudiada, mientras que en la figura 3 se muestra las imágenes de los diferentes bizcochos (C, FS, M y FI) escaneados, contrastados y binarizados.

TABLA 4- Valores medios de las características estructurales de la miga de los bizcochos para las diferentes formulaciones. C: bizcocho control, FS: bizcocho elaborado con fibra soluble, M: bizcocho elaborado con mezcla de fibras, FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Formulación	Número de Alveolos	Área Total (cm ²)	% Aire
C	1204,75 ^a (96,35)	11,25 ^a (0,95)	28,13 ^a (2,37)
FS	1073 ^a (89,71)	13,54 ^b (0,64)	33,84 ^b (1,61)
M	1085,75 ^a (77,13)	14,45 ^b (81,51)	36,14 ^b (3,77)
FI	1156,25 ^a (84,96)	15 ^b (0,35)	37,48 ^b (0,89)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b, c} las medias con letras diferentes en la misma fila difieren significativamente ($P < 0,05$)

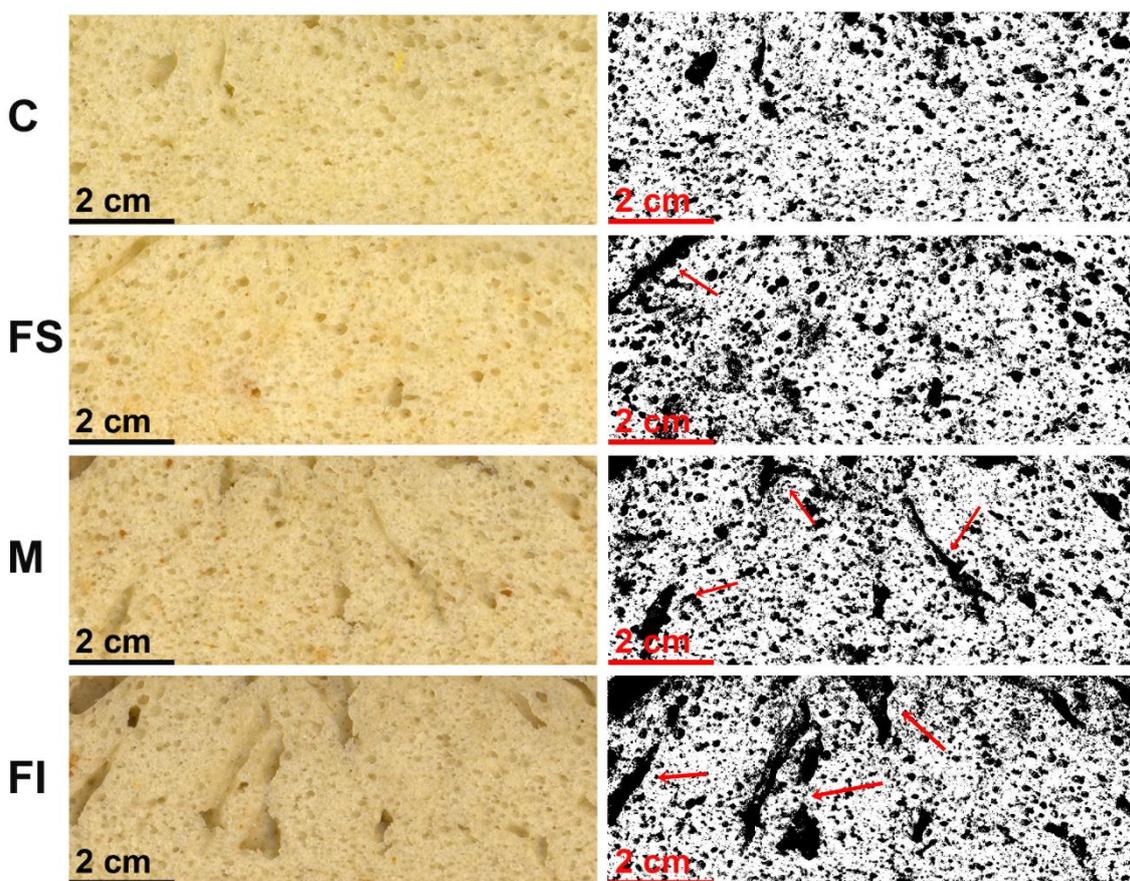


FIGURA 3- Imágenes escaneadas de los bizcochos C (bizcocho control), FS (bizcocho elaborado con fibra soluble) M (bizcocho elaborado con mezcla de fibras) y FI (bizcocho elaborado con fibra insoluble), campo de 10 x 4 cm y sus imágenes binarizadas correspondientes (118 pixeles/cm). Flechas: canales de difusión.

El bizcocho C presentó una macroestructura de la miga prácticamente homogénea con una mejor dispersión de las burbujas de aire en la miga (Figura 3). La grasa ayuda a incorporar aire durante el mezclado de la masa, y las burbujas de aire que quedan atrapadas acumulan vapor de agua, y durante el horneado las burbujas de aire se expanden uniformemente. Por dicho motivo, en las formulaciones FS, M y FI, al contener una menor cantidad de grasa, la expansión de las burbujas fue más descontrolada y se dispusieron repartidas de forma más heterogénea por la matriz estructural, creando una serie de canales de difusión en la miga, existiendo así diferencias significativas ($P < 0,05$) en cuanto al área total y al % de aire (tabla 4) con el bizcocho C. Eslava *et al.*, 2015 también obtuvieron canales de difusión en la miga al incorporar Optisol™5300, un ingrediente funcional en sus bizcochos.

Respecto a la cantidad de alveolos por área de miga analizada (10 x 4 cm), no existieron diferencias significativas ($P > 0,05$) entre las formulaciones estudiadas, pero se puede observar que en las formulaciones FS, M y FI, al contener más canales de difusión, el tamaño de los alveolos por área aumentó, como ya se ha comentado, y la estructura de la miga se volvió más

compacta y menos esponjosa debido a que el aire comprimió la miga. Estos resultados están en consonancia con los obtenidos en el apartado de textura, ya que al incorporar fibra y sustituir parte de la grasa, la masticabilidad del bizcocho aumenta, requiriéndose una mayor energía para masticar el alimento y que esté listo para su deglución, debido a que la miga está más compacta y con menos esponjosidad causada por la falta de dispersión de las burbujas de aire por todo el bizcocho. Esta mayor compactación ó falta de esponjosidad que produce la menor expansión de la burbujas de aire, en los bizcochos en los que se ha sustituido grasa por fibras, podría explicar los mayores valores de masticabilidad que presentan los bizcochos con fibra como se ha observado en el apartado de textura.

4.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE EMISIÓN DE CAMPO (FESEM)

En la figura 4 se presentan las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) de las dos fibras empleadas en el estudio, la fibra soluble Fibersol-2 y la fibra insoluble Vitacel KF 200. En la figura 5 se observa la microestructura del bizcocho C, el bizcocho elaborado con FS y el bizcocho elaborado con FI.

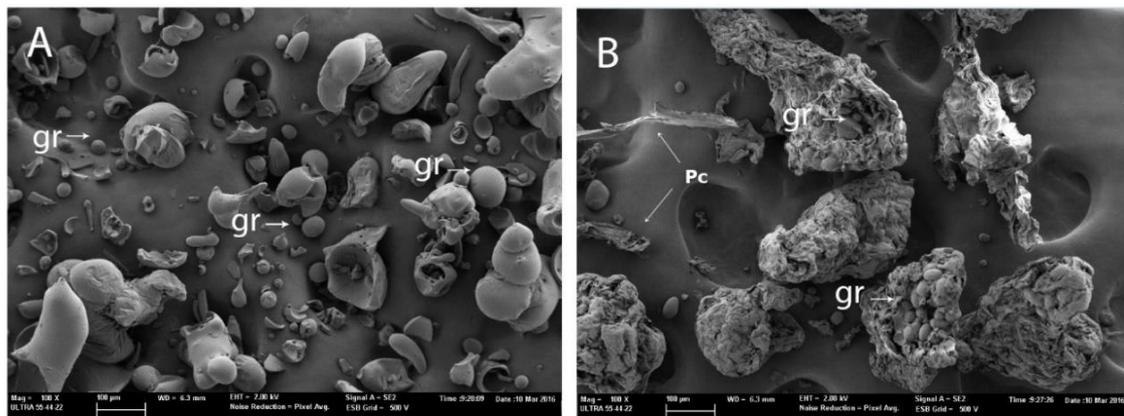


FIGURA 4- Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). A: Fibra soluble Fibersol-2 (100x). B: Fibra insoluble Vitacel KF-200 (100x). gr: gránulos de almidón, pc: pared celular. Magnificación (100x). Barra = 20 μ m.

La fibra soluble se observó constituida por muchas partículas de variados tamaños y formas, siendo muchas de ellas granulares y con apariencia lisa. La fibra insoluble en cambio presentó un aspecto más rugoso.

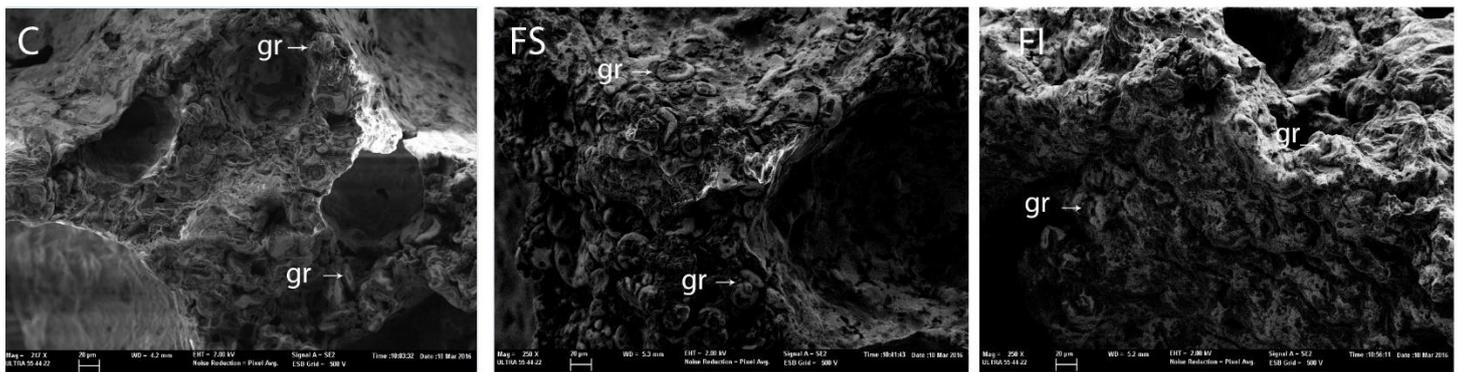


FIGURA 5- - Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). C: Bizcocho control. FS: Bizcocho elaborado con fibra soluble. FI: Bizcocho elaborado con fibra insoluble. gr: gránulos de almidón. Magnificación de los bizcochos (250x). Barra = 20 μ m

La estructura del bizcocho C se observó constituida por una red proteica formada principalmente por el gluten de la harina en la que se incorpora el resto de ingredientes. Los gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, quedaron albergados en una matriz continua formada principalmente por proteínas del gluten desnaturalizadas. Durante el horneado, los glóbulos de grasa coalescieron, liberando grasa que actuó como lubricante que recubrió la superficie y generó una estructura continua. Al reemplazar la grasa en las formulaciones FS y FI, los gránulos de almidón gelatinizados no se encontraron plenamente integrados y se observaron cómo estructuras separadas de la superficie de la matriz debido a la falta de lubricación por el aceite. En la formulación FS los gránulos de almidón se encontraron más definidos y distribuidos por toda la red proteica, como muestra la figura 5.

Tanto en la formulación FS como FI, se observó que el bizcocho presentaba un aspecto estructural más compacto y un tamaño de los alveolos mayor que en la formulación C. Al incorporar fibra en las formulaciones, ésta actúa como agente de relleno en los huecos de la red proteica, compactando así el bizcocho. Esta información se correlaciona con los valores de textura obtenidos, ya que los resultados de cohesividad aumentaron significativamente al incorporar fibra y reducir el contenido de grasa en los bizcochos al compararlo con la formulación C.

4.6 DIGESTIÓN *IN VITRO*

En la Figura 6 se muestra la proporción de almidón digerido, en cada uno de los bizcochos estudiados, durante el transcurso de la digestión *in vitro*, expresado como el contenido de glucosa liberado durante la digestión del almidón. La figura 7 muestra las fracciones de almidón según su digestibilidad; almidón de rápida digestibilidad (RDS), almidón de lenta digestibilidad (SDS) y almidón resistente (RS).

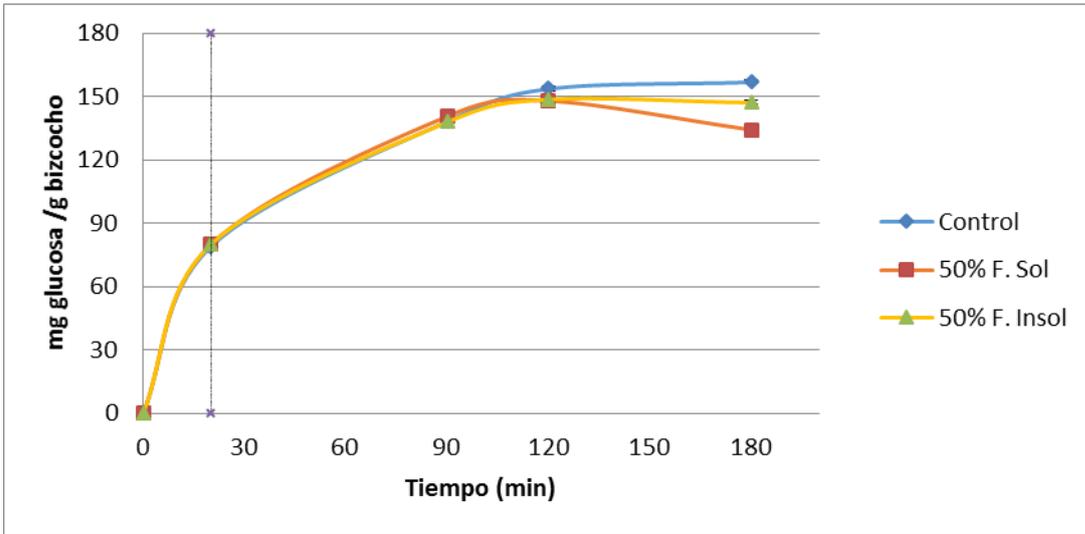
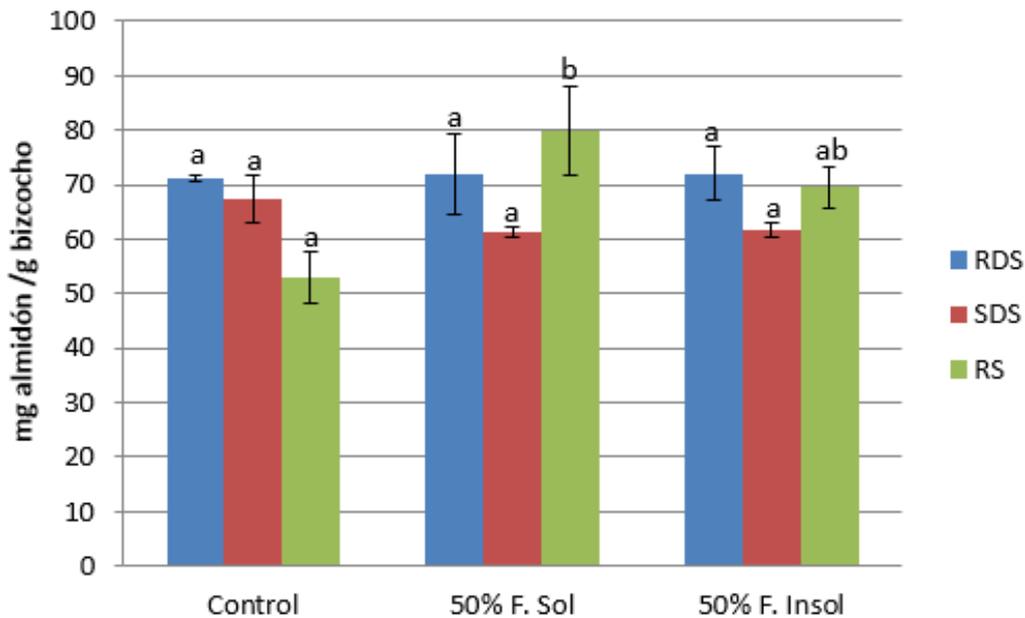


FIGURA 6- Proporción almidón hidrolizado (mg glucosa/g de bizcocho) durante la digestión *in vitro* de los bizcochos, en función de la formulación.



Los valores a y b, son la desviación estándar, las columnas con letras diferentes para el mismo parámetro, difieren significativamente ($P < 0,05$).

FIGURA 7- Histograma de distribución del almidón de rápida digestibilidad (RDS), almidón de lenta digestibilidad (SDS) y el almidón resistente (RS), respecto a los mg almidón/ g bizcocho, en función de las distintas formulaciones (C, FS y FI).

En general, la hidrólisis del almidón aumentó rápidamente durante los primeros 20 min de la digestión *in vitro*, luego la hidrólisis aumentó gradualmente hasta los 120 min, dónde se mantuvo constante hasta los 180 min, excepto en la formulación FS, donde se produjo un descenso en el contenido de glucosa liberada.

La fracción de almidón gelatinizado que es digerida y convertida en glucosa durante los primeros 20 min del proceso de digestión *in vitro*, se considera el almidón de rápida digestibilidad (RDS) (Hardacre et al., 2015). Después de someter los diferentes bizcochos estudiados (C, FS y FI) a 20 min de digestión *in vitro*, no se observaron ($P > 0,05$) diferencias significativas en la proporción de almidón digerido, entre el bizcocho control y los elaborados con las diferentes sustituciones. La sustitución de la grasa en la formulación del bizcocho por los ingredientes funcionales Vitacel KF 200 o Fibersol-2 no influyó en los valores de RDS.

El almidón de lenta digestibilidad (SDS), es el digerido completamente en el intestino delgado, dando lugar a moléculas de glucosa; la digestión se produce más lentamente que en el RDS. Se mide químicamente como el almidón convertido a glucosa después de más de 120 min de digestión enzimática. Actualmente, tiene gran importancia, debido a que se ha reportado que favorece la prevención de algunas enfermedades (Quiroga C.C. 2008). Tampoco se observaron diferencias significativas ($P > 0,05$) en el porcentaje de almidón digerido por el sistema gastrointestinal entre las diferentes formulaciones después de un tiempo de digestión *in vitro* de 120 min.

El almidón resistente (RS), se define como la fracción de almidón que permanece sin hidrolizar después de 120 min de digestión *in vitro*. Al no ser hidrolizado en el intestino delgado, este puede llegar al intestino grueso y ser fermentado por la microflora intestinal. El RS puede ser o no hidrolizado en el colon, cuando se hidroliza, la glucosa liberada puede ser rápidamente fermentada, dando ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato y butirato) (Quiroga C.C. 2008). En cuanto al almidón RS, sí que existieron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre la formulación C, la formulación con FI y la formulación con FS.

Por lo general, en los bizcochos al no contener una elevada cantidad de fibra, las fracciones de almidón no se vieron muy afectadas, excepto en los bizcochos con FS, en los que la fracción RS sí aumentó considerablemente.

5. CONCLUSIONES

La sustitución de un 50% de grasa en la formulación de productos horneados de alta humedad, como son los bizcochos, y su reemplazo por diferentes tipos de fibra, provoca un descenso en la viscosidad aparente de la masa, siendo la masa formulada con fibra insoluble menos viscosa que las demás formulaciones. En general, la bajada de viscosidad que produce la sustitución de grasa por fibra, genera un aumento en la movilidad de las burbujas de aire, causando así una incorporación mayor de burbujas y de mayor tamaño en la masa de los bizcochos. En el análisis textural de los bizcochos, la incorporación de fibra soluble Fibersol-2 no afecta los valores de dureza, elasticidad y masticabilidad. En cambio, al incorporar fibra insoluble y mezcla de ambas fibras, los valores de dureza, cohesividad y masticabilidad aumentan, siendo más elevados cuando se añade la fibra insoluble Vitacel KF 200. Junto con el aumento de los valores de los parámetros texturales, también aumenta la cantidad de canales de difusión en la miga, y el tamaño de los alveolos por área, resultando una miga más compacta por la falta de dispersión de las burbujas de aire por todo el bizcocho. La microscopia electrónica de barrido de emisión de campo corrobora este hecho, ya que en los bizcochos elaborados con fibra se observa un aspecto estructural mucho más denso, con presencia de gránulos de almidón no encastrados en la matriz, debido a la falta de lubricación por estar constituido por un 50% menos de grasa que el bizcocho control. En la digestión *in vitro* llevada a cabo, para los bizcochos elaborados con fibra soluble, la liberación de glucosa después de los 120 minutos de digestión es menor, por lo tanto presenta mayor cantidad de almidón resistente. Analizando los resultados obtenidos, la fibra soluble Fibersol-2 podría ser la opción más adecuada para sustituir el 50% de grasa en bizcochos, debido a que presenta unas características más similares a las del bizcocho control, por lo que supondría una buena alternativa para obtener bizcochos que satisfagan las necesidades de los consumidores.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACC (2001). The Definition of Dietary Fibre. Report of the Dietary fibre Definition Committee to the Board of directors of the American Association of Cereal Chemists, January 10, 2001.

Alava J.M., Whitworth M.B., Sahi S.S. and Catterall P.F. (1999). Fat emulsifiers and their functionality in cake batters: image analysis of the batter bubble distribution. In: Bubbles in Food, Campbell G.M., Panediella S.S. and Niranjana K. (Ed.). American Association of Cereal Chemists. p 273–282.

Baixauli, R., Salvador, A. and Fiszman, S.M. (2007). Textural and colour changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch. *European Food Research and Technology*. 226: 523-530.

Baixauli, R., Sanz, T., Salvador, A. and Fiszman, S.M. (2007). Muffins with resistant starch: baking performance in relation to the rheological properties of the batter. *Journal of Cereal Science*. *Journal of Cereal Science* 47 (3): 502-509.

Bray, G. (2004). Medical Consequences of Obesity. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 88 (6): 2583–2589.

Chung H-J., *et al.* (2010). Physical properties of dry-heated octenyl succinylated waxy corn starches and its application in fat-reduced muffin. *Journal of Cereal Science* 52: 496-501

Devereux H.M., Jones G.P., McCormack L. and Hunter W.C. 2003. Consumer acceptability of low fat foods containing inulin and oligofructose. *International Journal of Food Science and Technology*, 68(5), 1850-1854

Englyst, H.N.; Kingman, S.M.; Cummings, J.H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition* 42 (2): S33-S55.

Eslava, C. (2015). *Reformulación de bizcochos para la disminución de su contenido en grasa mediante un ingrediente funcional*. Proyecto Final de Master. Valencia: Universidad Politécnica de València.

FNB (Food and Nutrition Board of the National Academy of Sciences, USA). (2002). *Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrates, Fiber, Fat, Protein and Amino Acids*. Dietary, Functional, and Total Fiber. National Academy of Sciences, EEUU.

Gómez, M., *et al.* (2002). Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food Research and Technology*. 216:51–56.

Gómez, M., *et al.* (2009). Effect of size on the quality of fibre-enriched layer cakes. *LWT-Food Science and Technology* 43: 33-38.

Hardacre, A.K. *et al.* (2015). The effect of fibre and gelatinised starch type on amylolysis and apparent viscosity during *in vitro* digestion at a physiological shear rate. *Carbohydrate Polymers*, 123: 80-88.

Kalinga, D., Mishra, V.K. (2009). Rheological and physical properties of low fat cakes produced by addition of cereal β -glucan concentrates. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33(3) 384-400.

Khouryieh, H.A.; Aramouni, F.M.; Herald, T.J. 2005. Physical and sensory characteristics of no-sugar-added/low-fat muffin. *Journal of Food Quality*, 28(5-6): 439-451.

Kocer, D.; Hicsasmaz, Z.; Bayindirli, A.; Katnas, S. (2007). Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar-and fat-replacer. *Journal of Food Engineering*, 78(3): 953-964.

Lai H.M. and Lin, T.C. (2007). *Bakery products: science and technology*. In: *Bakery Products: Science and Technology*, Hui Y.H. (Ed). Blackwell.

Lakshminarayan, S.M.; Rathinam, V.; Krishnarau, L. (2006). Effect of maltodextrin and emulsifiers on the viscosity of cake batter and on the quality of cakes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(5): 706-712.

Lee, S.; Kim, S.; Inglett, G.E. (2005). Effect of Shortening Replacement with Oatrim on the Physical and Reological Properties of Cakes. *Cereal Chemistry*, 82(2): 120-124.

León-Espinosa, E.B., Jiménez-Martínez, C., y Dávila-Ortiz, G. (2015). Péptidos bioactivos de fuentes vegetales. Un nuevo ingrediente para alimentos funcionales. In: Ramírez-Ortiz, M.E. (Ed.). *Tendencias de la ingeniería de alimentos*. Barcelona, OmniaScience. 37-71

MAGRAMA (2014): *La Alimentación en España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid*. Accesible en la web:
<<http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-y-comercializacion-ydistribucion-alimentaria/panel-de-consumo-alimentario/base-de-datos-de-consumo-enhogares/consulta10.asp>> (Último acceso: junio 2015).

Matsakidou, A.; Blekas, G.; Paraskevopoulou, A. (2010). Aroma and physical characteristics of cakes prepared by replacing margarine with extra virgin olive oil. *LWT-Food Science and Technology*, 43(6): 949-957.

OMS. Organización Mundial de la Salud. (2015). *Alimentación Sana*. Accesible en la web: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs394/es/>>

Psimouli, V; Oreopoulou, V. (2013). The Effect of Fat Replacers on Batter and Cake Properties. *Journal of Food Science* 78(10): C1495-C1502

Quiroga, C.C. (2008). Los almidones resistentes y la salud. *Bolivia: Investigación y desarrollo* 8: 131-142.

Real Decreto 1124/1982, de 30 de abril, por el que se aprueba la Reglamentación TécnicoSanitaria para la Elaboración Fabricación, Circulación y Comercio de Galletas. Publicado en el BOE num.133, de 4 de junio de 1982, páginas 15069 a 15072

Real Decreto 2419/1978, de 19 de mayo, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de productos de confitería-pastelería, bollería y repostería. Publicado en el BOE nº 244, de 12 de octubre de 1978, páginas 23699 a 23702.

Rodríguez-García, J.; Puig, A.; Salvador, A.; Hernando, I. (2012). Optimization of a Sponge Cake Formulation with Inulin as Fat Replacer: Structure, Physicochemical and Sensory Properties. *Journal of Food Science*, 77(2): C189-C197.

Rodríguez-García, J.; Sahi, S.S.; Hernando, I. (2014a). Optimizing Mixing during the Sponge Cake Manufacturing Process. *Cereal Foods World*, 59(6): 287-292.

Rodríguez-García, J.; Salvador, A.; Hernando, I. (2014b). Replacing Fat and Sugar with Inulin in Cakes: Bubble Size Distribution, Physical and Sensory Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4): 964-974.

Sahi SS, Alava JM. 2003. Functionality of emulsifiers in sponge cake production. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83: 1419–1429.

Wade, P. (1988). Preparation of biscuit doughs. In: *Biscuits, Cookies and Crackers. The principle of the craft*. London: Elsevir Applied Science

Zahn, S.; Pepke, F.; Rohm, H. (2010). Effect of inulin as a fat replacer on texture and sensory properties of muffins. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(12): 2531-2537.