

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



## USO DE TÉCNICAS DE IMAGEN EN EL CONTROL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE BOLLERÍA

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO: D. Diego Igarza Martínez

TUTOR: Prof. D. Raúl Grau Meló

DIRECTOR EXPERIMENTAL: D. Samuel Verdú Amat

**Curso Académico: 2013/2014**

**VALENCIA, JUNIO DE 2014**

Licencia Creative Commons

# USO DE TÉCNICAS DE IMAGEN EN EL CONTROL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE BOLLERIA

**RESUMEN:** En el presente trabajo se ha estudiado la aplicación de técnicas de análisis de imagen en el control de procesado de masas batidas, más concretamente en la elaboración de bizcocho. Para ello se ha aplicado el análisis de imagen multiespectral (visible e infrarrojo cercano) para el control del pretratamiento térmico de harinas y el de segmentación de imagen 2D en el control del producto terminado, teniendo en cuenta el factor tiempo de batido de la masa. A tal fin se realizaron pretratamientos térmicos a las harinas a 80, 100 y 130 °C durante 10 y 30 minutos, las cuales fueron posteriormente introducidas en una cámara de humedad controlada con el fin de equilibrar la humedad en todas ellas. Una vez obtenidas las harinas, estas fueron usadas para la elaboración de los bizcochos, los cuales se realizaron aplicando dos tiempos diferentes de batido: 2 y 10 minutos. Tras un horneado de 175°C durante 30 minutos se obtuvieron los bizcochos y se les realizaron análisis de altura, pérdida de peso y textura. Todos los datos fueron analizados estadísticamente, los cuales mostraron como el análisis multiespectral es capaz de discriminar las harinas en función de la temperatura de pretratamiento, principalmente en las harinas tratadas durante 30 minutos, estando esta discriminación fundamentalmente basada en la información procedente del espectro del infrarrojo cercano. El análisis de segmentación de imagen mostró como el tamaño y dispersión de las burbujas de gas generado en los bizcochos dependió de la temperatura del pretratamiento y del tiempo de este, así como del tiempo de batido de la masa, siendo las harinas tratadas a 100 °C durante 10 minutos y con un batido de 10 minutos las que generaron un bizcocho con un menor tamaño de burbujas y con una distribución más uniforme de estas.

**Palabras clave:** masas batidas, bizcocho, análisis multiespectral, segmentación de imagen, tratamiento con calor y tiempo de batido.

**RESUM:** En el present treball s'ha estudiat l'aplicació de tècniques d'anàlisi d'imatge en el control de processat de masses batudes, més concretament en l'elaboració de bescuit. Per a això s'ha aplicat l'anàlisi d'imatge multiespectral (visible i infraroig pròxim) per al control del pretractament tèrmic de farines i el de segmentació d'imatge 2D en el control del producte acabat, tenint en compte el factor temps de batut de la massa. Amb este fi es van realitzar pretractaments tèrmics a les farines a 80, 100 i 130 °C durant 10 i 30 minuts, les quals van ser posteriorment introduïdes en una cambra d'humitat controlada a fi d'equilibrar la humitat en totes elles. Una vegada obtingudes les farines, estes van ser usades per a l'elaboració dels bescuits, els quals es van realitzar aplicant dos temps diferents de batut: 2 i 10 minuts. Després d'un enforat de 175°C durant 30 minuts es van obtindre els bescuits i se'ls van realitzar anàlisi d'altura, pèrdua de pes i textura. Totes les dades van ser analitzades estadísticament, mostrant com l'anàlisi multiespectral és capaç de discriminar les farines en funció de la temperatura de pretractament, principalment en les farines tractades durant 30 minuts, estant esta discriminació fonamentalment basada en la informació procedent de l'espectre de l'infraroig pròxim. L'anàlisi de segmentació d'imatge va mostrar com la grandària i dispersió de les bombolles de gas generat en els bescuits va dependre de la temperatura del pretractament i

del temps d'este, així com del temps de batut de la massa, sent les farines tractades a 100 °C durant 10 minuts i amb un batut de 10 minuts les que van generar un bescuit amb una menor grandària de bombolles i amb una distribució més uniforme d'estes.

**Paraules clau:** masses batudes, bescuits, anàlisi multiespectral, segmentació d'imatge, tractament amb calor y temps de batut.

**ABSTRACT:** In the present study has been studied the application of image analysis techniques at the control of whipped doughs process (Sponge cake). Multispectral image analysis (visible and infrared) was applied to study wheat flour heat pretreatment and image segmentation 2D in order to check the final product. During this analysis was necessary to take into account the mixing time factor. A heat pretreatment was done for whole flour at 80, 100 and 130 °C during 10 and 30 minutes. After that, they were in a humidity controlled chamber in order to balance their moisture content. Heat-treated wheat flours were used to produce sponge cakes with two different mixing time: 2 and 10 minutes. They were elaborated in the oven at 175 °C during 30 minutes. Height, weight and texture of sponge cakes were measured. Data were statistically analyzed and they showed multispectral analysis could differentiate according to pretreatment temperature, especially at 30 minutes using near-infrared spectrum information. Image segmentation analysis showed air bubbles size and bubbles distribution of sponge cakes relied on time mixing, pretreatment temperature and pretreatment time. Heat-treated wheat flour at 100 °C, during 10 minutes and 10 minutes time mixing produced a lower air bubbles size with a higher uniform distribution.

**Key words:** whipped doughs, sponge cake, multispectral analysis, image segmentation, heat treatment and time mixing.

**Titulació:** Ciencia y Tecnología de los Alimentos

**Curso académico:** 2013/2014

**Alumno:** D. Diego Igarza Martínez

**Tutor:** Prof. D. Raúl Grau Meló

**Director experimental:** D. Samuel Verdú Amat

Valencia, junio de 2014



# ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>III. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>5</b>
<b>III.I. Materias primas .....</b>	<b>6</b>
<b>III.II. Pretratamiento de harinas .....</b>	<b>6</b>
<b>III.III. Formulación y procesado del bizcocho .....</b>	<b>6</b>
<b>III.IV. Análisis realizados .....</b>	<b>7</b>
III.IV.I. Caracterización del pretratamiento mediante análisis de imagen multiespectral (Visible e infrarrojo cercano) .....	7
III.IV.II. Crecimiento de la masa batida .....	8
III.IV.III. Pérdida de peso .....	8
III.IV.IV. Análisis de los bizcochos por segmentación imagen 2D .....	8
III.IV.V. Textura .....	10
III.IV.VI. Procesado de datos .....	10
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>10</b>
<b>IV.I. Caracterización del pretratamiento de las harinas mediante análisis de imagen multiespectral (Visible e infrarrojo cercano) .....</b>	<b>10</b>
<b>IV.II. Caracterización de los bizcochos .....</b>	<b>13</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>20</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>20</b>
<b>VII. ANEXOS .....</b>	<b>25</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

❖ <b>Tabla 3.1.</b> Formulación masa batida del presente trabajo (% peso total).....	6
--	---

# ÍNDICE DE FIGURAS

- ❖ **Figura 3.1.** Esquema del procesado del bizcocho en el presente trabajo. Las letras corresponden a los análisis realizados para toma de datos. A: Análisis multiespectral; B: Medidas de altura; C: Pérdida de peso, Análisis 2D y Textura.....5
- ❖ **Figura 3.2.** Equipo de captura de imagen multiespectral (Visible e infrarrojo cercano).....8
- ❖ **Figura 3.3.** Representación de la segmentación de imagen por el método del umbral de banda. Imagen de la izquierda (áreas oscuras representan burbujas y áreas luminosas la estructura). Imagen de la derecha: imagen segmentada donde pixeles negros representan burbujas y blancos la estructura.....9
- ❖ **Figura 3.4.** Histograma de los valores de tono de gris correspondiente a cada píxel, obtenido en el análisis de imagen mediante segmentación, diferenciando el rango de valores correspondiente a burbuja y el de estructura. Th1: primer umbral. Th2: segundo umbral.....9
- ❖ **Figura 4.1.** Representación gráfica del espectro de reflectancia (visible e infrarrojo cercano) de las imágenes adquiridas para las harinas pretratadas térmicamente durante 30 minutos a diferentes temperaturas. Control — ; 80°C — ; 100°C — ; 130°C — .....11
- ❖ **Figura 4.2.** Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro completo (visible e infrarrojo cercano) en harinas pretratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .....12
- ❖ **Figura 4.3.** Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro del visible en harinas tratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .....13
- ❖ **Figura 4.4.** Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro del infrarrojo cercano en harinas tratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .....13
- ❖ **Figura 4.5.** Representación gráfica de incremento de altura en porcentaje de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■ , 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).....15
- ❖ **Figura 4.6.** Representación gráfica de la pérdida de peso de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■ , 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).....16
- ❖ **Figura 4.7.** Representación gráfica del número de burbujas frente al área media de burbuja presentes en los bizcochos, diferenciando tratamiento térmico recibido por las harinas (temperatura y tiempo de tratamiento) y el tiempo de batido 2 minutos ○ y 10 minutos ● .....17

- ❖ **Figura 4.8.** Representación gráfica de los parámetros de textura (dureza, elasticidad, cohesividad, gomosidad y masticabilidad) de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■, 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).....19





# 1. INTRODUCCIÓN

Cada vez es más evidente el incremento de la demanda de productos innovadores por parte del consumidor y que se adapten a los nuevos estilos de vida y tendencias de consumo, debiendo estos satisfacer sus costumbres, prácticas, valores o búsqueda de funcionalidad. El sector industrial de panadería, bollería y pastelería no es ajeno a este cambio, encontrándose en continuo crecimiento (ASEMAC, 2012). Los pasteles son un importante producto de panadería cuyo mercado global crece progresivamente un 1.5% cada año. Esto supone el reto de la búsqueda de nuevas formulaciones, así como la optimización de los diferentes procesos que se llevan a cabo en la elaboración de sus productos con la finalidad de reducir costes, aumentar el tiempo de vida útil y el control de la calidad (Wilderjans y col., 2013). Productos procesados de este sector presentan una gran variedad de colores, sabores y texturas con la intención de deleitar a los consumidores. Los productos obtenidos a partir de la formación de espumas proveen un rango único de texturas asociadas a muchos alimentos que incluyen pasteles, pan, helados y productos de confitería (Campbell y Mougeot, 1999).

Los productos de pastelería y repostería son aquellos productos alimenticios elaborados con harinas, féculas, azúcares, grasas comestibles, con o sin levadura y otros productos alimenticios y sustancias complementarias, sometidos o no a un tratamiento térmico (Madrid, 1994). Según indica ASEMAC (2012) pueden ser productos tanto dulces como salados, distinguiéndose al menos cinco masas básicas: de hojaldre, azucaradas, escaldadas, de repostería y batidas. Las masas batidas son aquellas masas sometidas a un batido, resultando masas de gran volumen, tiernas y suaves. Elaboradas fundamentalmente con huevos, azúcares, harinas o almidones. Entre los muchos productos que se procesan a partir de ellas, se encuentra el bizcocho.

El bizcocho es un ejemplo de masa batida, un tipo de pastel o producto con microestructura en los que la aceptación del consumidor no solo es por el sabor dulce sino también por una ligera estructura esponjosa. Esta característica es debida a la distribución de aire a través de la masa. Un tamaño uniforme de burbuja favorece las características de horneado (Sahu y Niranján, 2009). Producir una espuma supone la generación de una película proteínica envolviendo una burbuja de gas y el empaquetamiento de burbujas de gas dentro de una estructura general. Un factor clave del proceso, es la incorporación de aire dentro de la masa líquida por un fuerte mezclado porque la fuerza y tiempo de batido influirán en el control de la distribución y del tamaño de burbuja en la masa. La estructura del pastel es generada por el horneado de la masa, en el que el efecto del calor fija la húmeda espuma para obtener un producto esponjoso con gran número de alveolos en su estructura (Allen y col., 2006). La estructura se debe en gran manera al movimiento de la herramienta de mezclado dentro de los ingredientes, teniendo gran importancia las grasas y los emulgentes que intervienen en la estabilización de las burbujas de aire y, en menor medida, a su tamaño. Estos mecanismos de estabilización son importantes para mantener las burbujas atrapadas en la masa batida. La continua agitación puede llevar a la ruptura de grandes bolsas de aire para la creación de burbujas pequeñas. Por otra parte, la viscosidad relativamente baja del sistema, y la capacidad de flotar de forma natural de las burbujas, podría permitir a estas subir hasta la superficie de la masa batida y perderse en la atmósfera que la rodea. La capacidad de flotar de

las burbujas de aire se aumenta si la temperatura de la masa batida aumenta, y eso aunque recibe el dióxido de carbono de la reacción de los ingredientes del impulsor gasificante o de los polvos impulsores. En una masa batida perfectamente estabilizada, las burbujas de gas que flotan no son un problema, con tal de que no la agitemos. El mezclado y bombeado continuo de los batidos de masa crea una acción de rozamiento que reduce la estabilidad de la emulsión, y puede provocar el escape de las burbujas de gas. Los dos mecanismos, tanto el de coalescencia como el de desproporción (crecimiento del tamaño de las burbujas de aire) aumentan las propiedades de flotación y el riesgo de desaireación de la masa batida. El resultado global es que cuando se produce la expansión de las burbujas de gas durante el horneado, la estructura del producto final está normalmente compuesta de alvéolos de tamaño similar, incluso en las regiones cercanas a la corteza. En resumen, los batidos de masas de pasteles podemos considerarlos como una dispersión de aire-grasa en una fase acuosa, la cual contiene azúcar disuelto y partículas de harina dispersas (Cauvain y Young, 2006). El conocimiento del impacto del procesado en la estructura de un producto es esencial para la mejora de éste. La inclusión de aire en la masa batida es un factor clave en la preparación del producto, determinando su estructura final tras el horneado debido al efecto sobre la reología de la masa que marca la expansión del material antes de la fijación de la estructura (Chesteron y col., 2011).

Una tendencia que se está implantando y que es motivo de estudio en la industria pastelera por las ventajas en desarrollo de la masa, esponjosidad y aspecto obtenidas en el producto, es la harina pretratada con calor (Cauvain y Young, 2006; Meza y col., 2011; Nakamura y col., 2008; Neill y col, 2012; Ozawa y col., 2009). Este proceso ha reemplazado el tratamiento de la harina con cloro que ya no está permitido en muchos países del mundo. El pretratamiento continuado de la harina con calor proporciona los mismos beneficios tecnológicos que el tratamiento con cloro, pero sin el efecto blanqueado (aunque este blanqueado nunca fuera la principal razón para el tratamiento con cloro) (Cauvain y Young, 2006). La harina pretratada térmicamente fue citada por primera vez por Russo y Doe (1970) quienes patentaron el proceso usando un rango de temperaturas de 100-115°C durante un tiempo de 60 minutos. Cauvain y col. (1976) sugirieron un pretratamiento para el trigo integral y la semolina, que se secaba hasta una humedad del 6% y entonces se calentaba a un específico tiempo/temperatura, después de que el grano fuera molido. Hanamoto y Bean (1979) patentaron un método para producir harina pretratada con calor, en el cual la temperatura se mantenía a 71°C durante 4-5 días. Nakamura y col. (2008) observaron un incremento en el volumen del pastel Kasutera debido al secado por calor de harina integral a 120°C durante 30 minutos.

Al aplicar a una harina base un pretratamiento térmico es posible modificar su propiedad física, reológica y bacteriológica. Al mismo tiempo, se produce una pérdida de peso en forma de su contenido en agua, expresado como humedad. Por esto, rehumectar o recuperar la humedad inicial de la harina antes del pretratamiento con calor, es una parte importantísima del proceso porque permite comparar datos entre diferentes muestras y además, obtener óptimos resultados en el horneado como una disminución de la densidad y un incremento en el tamaño del bizcocho, que contribuyen a la calidad como a la apariencia y sensación en boca (Neill y col., 2012). Los bizcochos obtenidos por harinas pretratadas presentan una mayor viscosidad si se comparan con los que no (Sahin, 2008). El efecto del pretratamiento térmico

en las características físico-químicas de la harina de trigo ha sido motivo de estudio en otros trabajos como el de Ozawa y col. (2009). Purhagen y col. (2011) estudiaron el uso de harina de cebada normal y la pretratada térmicamente junto con almidón de cebada como agente antienviejimiento en el proceso de horneado en un laboratorio y una industria. En este trabajo, concluyeron que las muestras horneadas con harina de cebada pretratada con calor diferían de las muestras control con respecto al contenido en agua, firmeza y la retrogradación de la amilopectina. Meza y col. (2011) estudiaron el comportamiento reológico de bizcochos de alta proporción<sup>1</sup> preparados con harina de trigo sin pretratar y pretratada. En su estudio encontraron que los productos procesados con harina pretratada con calor mostraban mayor estabilidad, tal y como se indicaba por su tixotropía y su energía cohesiva, y el cambio en la viscosidad aparente y el contenido en aire de las espumas y las emulsiones aireadas en un largo mezclado. La red de gel generada en las emulsiones aireadas que en su formulación contenían harina pretratada con calor, era significativamente más fuerte que aquella con harina sin tratar.

Mientras que la última valoración de calidad de un alimento la hace el consumidor, en el procesado y optimización de estos, en los que se incluyen los productos de panadería, repostería y pastelería, ya sean nuevos o antiguos, es importante tener una valoración objetiva de las características particulares de cada alimento. Por ello, resulta interesante el conocimiento y uso de técnicas analíticas que permitan relacionar esa información con las características del producto final. De este modo, se puede tener conocimiento del procesado requerido para obtener un producto con unas características concretas y que el consumidor aprecie en su valoración sensorial. Al mismo tiempo, permite tener una idea de cómo ajustar el procesado a unas condiciones que pueden resultar favorables en el sentido económico de coste de producción y precio del producto final, por tanto afectando a la comercialización y número de ventas.

Existe un gran número de artículos y estudios que tratan el análisis de las masas batidas. En ellos todos enfocan diferentes factores y motivos de investigación, pero basándose la mayoría en análisis de reología y viscosidad, tratando posteriormente de enfocar esa información en el producto obtenido a través del incremento de volumen o altura, pérdida de peso y el análisis de textura (Mez y col., 2012; Neill y col, 2012; Chesterton y col., 2013; Gómez y col., 2012; Kim y col., 2012).

En este ámbito de investigación con la finalidad de la innovación y búsqueda de análisis objetivos, es donde aparecen las técnicas de imagen. De entre las diferentes técnicas de imagen existentes, la aplicación de técnicas multiespectrales basadas en la información recibida por el espectro tanto del visible como del infrarrojo cercano (Vis SW-NIR) puede ser una herramienta de interés para la caracterización de harinas y masas batidas. Esta técnica se basa en el estudio de la interacción de radiación electromagnética y la muestra, comprendida en el rango de longitudes de onda que va desde los 780 a los 2500nm, en alimentos. El espectro del NIR se genera mayoritariamente por vibraciones producidas en forma de sobretonos que resultan de los enlaces químicos entre C-H, O-H y N-H como consecuencia de

---

<sup>1</sup> Las recetas de pasteles o productos esponjados suelen clasificarse como de alta o baja proporción. En este caso, un pastel de alta proporción es aquel cuyo nivel de azúcar y líquidos (que superan la suma de agua, huevos y leche) individualmente, excede la cantidad de harina usada en la formulación. Si la cantidad de azúcar y líquidos fuera menor que la cantidad de harina, entonces el producto se consideraría como de baja proporción (Cauvain y Young, 2006).

la incidencia del haz de luz. Existen tres clases distintas de dispositivos que captan señal infrarroja. Los espectrómetros monocromados, los de matriz de diodos y los de filtro. Los utilizados en el presente trabajo son los espectrómetros monocromados, que poseen un detector de silicio que percibe longitudes de onda entre los 400 a 1100 nm y pueden ser utilizados en modo de reflectancia o transmitancia (Osborne, 2000). A esta parte del espectro se le conoce como “short-wavelength near-infrared” (SW-NIR). La ventaja de la utilización de la región del SW-NIR respecto a las otras, se basa en que permite que la energía NIR penetre más profundamente en una muestra con una menor generación de calor que el que se generaría utilizando la región de onda larga del infrarrojo cercano (LW-NIR), que comprende de 400 a 2500 nm y lo cual reduce la interacción muestra método de análisis (Wu y col., 2008). En la actualidad se dispone de numerosas investigaciones sobre esta técnica en diferentes alimentos. Algunas de ellas van encaminadas a la determinación de grasa, proteína y lactosa en leche (Sasic y Ozaki, 2001), contenido de azúcar en yogurt (He y col., 2007), determinación del momento de cosechado del mango (Subedi y col., 2007), así como estudios en cereales, patata y en parámetros relacionados con la humedad en productos cárnicos y pescado ahumado (Dah-Jye y col., 2008), aunque la mayoría de estos estudios son preliminares.

Otra de las técnicas de imagen utilizadas en este tipo de productos es la de la inspección de la estructura interna del producto mediante técnicas de segmentación de imagen 2D. Esta técnica se basa en el escaneado de rebanadas con un grosor aproximado de 3 mm, en el que a cada píxel de la imagen le corresponde un tono de gris y es clasificado en un umbral de bandas, diferenciándose entre burbuja y matriz. A partir de la información obtenida mediante la técnica se han propuestos diferentes modelos para cuantificar las características de la miga: tamaño de burbuja, distribución del tamaño de burbuja, número de burbujas por unidad de área, espesor de la pared, fracción libre de gas y factor de forma (Calderón-Domínguez y col., 2008; Crowley y col., 2000; Gonzales-Barrón y Butler, 2006; Lagrain y col., 2006; Riva y Liviero, 2000; Sapirstein, 1999; Sapirstein y col., 1994; Zayas, 1993; Zghal y col., 1999). Además se han creado y utilizado como herramienta de análisis la cual se ha correlacionado con la evaluación objetiva de la textura visual de las rebanadas de pan (Cauvain y Young, 2006; Labbafi y col., 2007; Pérez-Nieto y col., 2010; Pour-Damanab y col., 2011).

El uso de técnicas de análisis de imagen han resultado ser unas herramientas de gran utilidad por su característica de no tratarse de análisis destructivos, pudiéndose valorar y estimar un producto al momento en una línea de fabricación. Su importancia para captar información en el procesado del pan y su aplicación en la industria ha sido un tema tratado en Calderón-Domínguez y col. (2008), buscando la monitorización y el trabajo online durante el procesado, llegando a aplicarse técnicas de imagen 3D (Ivorra y col., 2014).

## **2. OBJETIVOS**

En base a lo expuesto en la introducción del presente Trabajo Final de Grado se plantea como objetivo aplicar las técnicas de imagen basadas en análisis multiespectrales (Visible e infrarrojo cercano) y de segmentación de imagen 2D para el control del procesado de masas batidas, en concreto bizcocho. Para ello se plantearon dos objetivos específicos:

- Caracterizar mediante la técnica de imagen multiespectrales (Visible e infrarrojo cercano) la influencia de la temperatura y tiempo de pretratamiento de las harinas.
- Caracterizas mediante la técnica de segmentación de imagen 2D la influencia que el pretratamiento de las harinas, así como del tiempo de batido tiene sobre las características finales del producto.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

Las pautas y fases que se siguieron en el presente trabajo son las indicadas de forma general en la Figura 3.1.

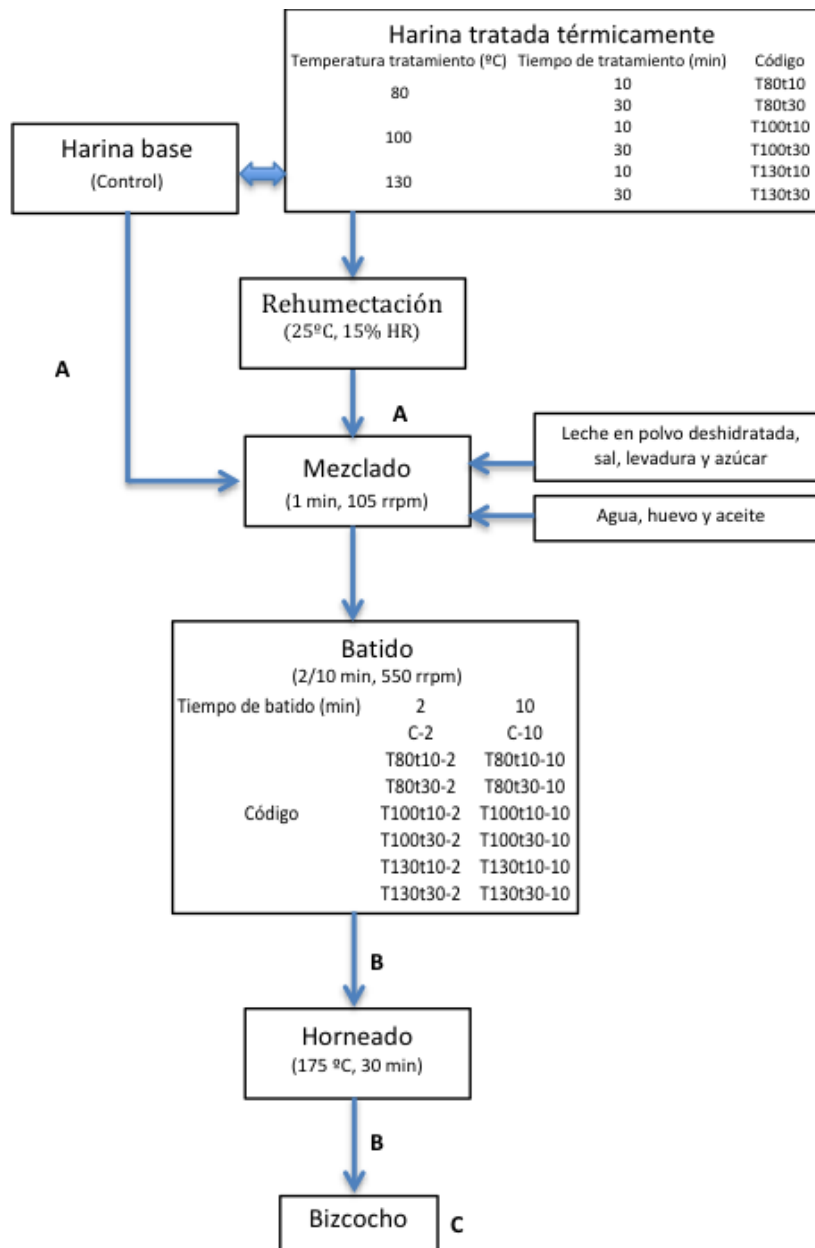


Fig. 3.1. Esquema del procesado del bizcocho en el presente trabajo. Las letras corresponden a los análisis realizados para toma de datos. A: Análisis multiespectral; B: Medidas de altura; C: Pérdida de peso, Análisis 2D y Textura.

### 3.1. Materias primas

Los ingredientes utilizados en la elaboración de las muestras fueron principalmente harina de trigo destinada para su uso en productos como pan candeal, pan francés, magdalenas, bizcochos, rollitos de primavera y otros productos de fermentación larga (Molí de Picó), de la empresa Harinas Seguras S.L., Torrent (Valencia). Las características de la harina según la ficha técnica facilitada por la empresa fue: 15% de contenido en humedad, fuerza (W)= $\pm$ 140 y relación tenacidad/extensibilidad (P/L)= $\pm$ 0,30. Además se utilizó leche en polvo desnatada (Central Lechera Asturiana, SAT con un contenido medio en 100 gramos de 34% proteínas, 52% de hidratos de carbono y un máximo de 1% en grasa), levadura química [Royal, Kraft Foods, constituida por gasificantes (bicarbonato sódico, difosfato disódico), harina de arroz y estabilizador (fosfato monocálcico)], aceite refinado de girasol (Coosol, de Aceites del sur-Coosur S.L.), azúcar blanco (AB Azucarera Iberia S.L.U.), huevos frescos (Huevos Monterde S.L.U.), sal fina seca (Consum) y agua mineral.

### 3.2. Pretratamiento de harinas

En el tratamiento térmico se realizó en un horno (Fagor modelo 2CF-3V) durante 10 ó 30 minutos a temperaturas de 80, 100 ó 130°C (Fig. 3.1.). Para ello unos 700 gramos aproximadamente de harina fueron colocados entre dos láminas de papel de aluminio, tratando de que quedaran esparcidas de forma uniforme y homogéneamente con el objetivo de que el tratamiento térmico afectara por igual a la superficie de todas las muestras.

Una vez finalizó el tratamiento térmico, y siguiendo las pautas de varios autores, las muestras fueron rehumectadas hasta su humedad original, en una cámara de condiciones controladas (25°C y 15% HR) de la marca comercial Binder, durante 24 horas (Neill y col., 2012), para que la diferencia de humedad no fuera un factor influyente en el análisis de imagen posteriormente realizado.

### 3.3. Formulación y procesado del bizcocho

La formulación y preparación utilizada para la elaboración del bizcocho está basada en el trabajo de Meza y col. (2012). La formulación utilizada en este trabajo fue la siguiente:

**Tabla 3.1. Formulación masa batida del presente trabajo (% peso total).**

Ingrediente	Masa base
Harina	27,12
Leche en polvo deshidratada	3,93
Sal	0,60
Levadura	1,01
Azúcar	36,09
Agua	14,52
Huevos	13,91
Aceite	2,82

El procesado del bizcocho consistió en pesar todos los ingredientes en proporción según la cantidad de masa que se quería obtener. Se añadieron en un bol todos los ingredientes sólidos (harina, leche en polvo deshidratada, sal, levadura y azúcar), los cuales fueron manualmente mezclados usando una cuchara, antes de añadirlos al equipo. Dicho equipo fue una Thermomix TM31 de la empresa Vorwerk. En segundo lugar se añadieron los ingredientes líquidos (huevo, agua y aceite) y se mezclaron a velocidad 1 (105 rrpm) durante 1 minuto de tiempo. Una vez finalizado el minuto, se aumentó hasta velocidad 3 (550 rrpm) durante 2 o 10 minutos, dependiendo de estudio (Fig. 3.1.). Una vez finalizada la masa, se añadió 80g de masa batida en cada molde. Los moldes utilizados en este trabajo fueron de silicona de la empresa La Riqueza S.L. con unas dimensiones de 10 cm de largo, 5 cm de ancho y 3.3 cm de alto, así como una resistencia térmica entre -40 y 230 °C. Las masas batidas preparadas en sus moldes fueron horneadas a una temperatura de 175 °C durante 30 minutos en un horno eléctrico modelo Sfornattuto Maxi EO32352 de la marca comercial De Longhi.

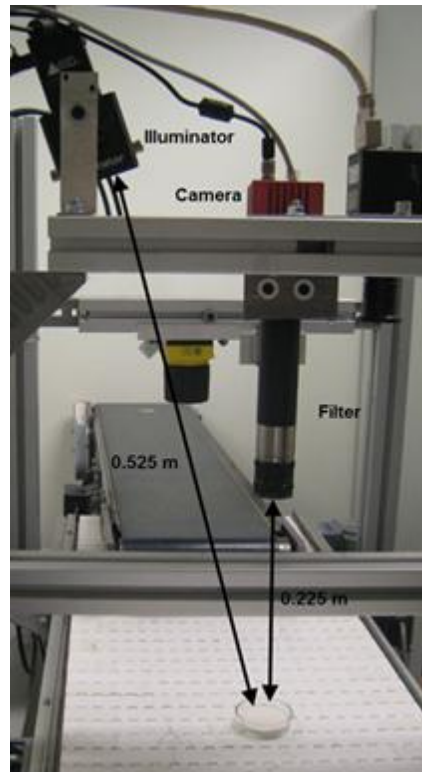
### **3.4. Análisis realizados**

#### **3.4.1. Caracterización del pretratamiento mediante análisis de imagen multiespectral (Visible e infrarrojo cercano)**

Con la finalidad de caracterizar el pretratamiento térmico de las harinas se analizaron las harinas antes y después de dicho tratamiento, una vez equilibrada la humedad de estas. Para ello 15 gramos de harina fueron introducidos en una placas Petri y tras homogeneizar la superficie se tomaron las imágenes, las cuales fueron adquiridas usando una cámara CCD 102f (Basler Vision Technologies, Ahrensburg, Germany) y un filtro SpecImSpector V10 1/200 (Specim Spectral Imaging, LTD., Oulu, Finland), que funciona como una cámara lineal hiperespectral. La fuente de iluminación fue una lámpara ASD (ASD Ing, Boulder USA. La posición de la fuente de iluminación y la cámara respecto a la muestra fue siempre constante para controlar las condiciones de iluminación y obtener un tamaño de imagen homogéneo. La distancia entre la iluminación y la muestra fue de 0,525 m, con una distancia de 0,225 m entre la cámara y la muestra. La imagen (línea de escaneado) obtenida está compuesta de 256 niveles de gris (8 bits). El espectro de reflectancia fue recogido usando 53 longitudes de onda diferentes (cada longitud de onda fue digitalizada por 8 bits). Estas longitudes de onda fueron distribuidas en intervalos de 11.2 nm en el rango desde 400 hasta 1000 nm. La línea de escaneado estuvo compuesta por 1392 puntos, por lo que una imagen fue grabada con una resolución de 1392 x 1040 píxeles. El campo óptico de visión fue de 0.12m (Fig. 3.2.).

El funcionamiento de la cámara se llevó a cabo mediante el software pylon Viewer 2.1.0.1664 (Basler Vision Technologies, Ahrensburg, Germany).





**Fig. 3.2. Equipo de captura de imagen multispectral (Visible e infrarrojo cercano).**

#### **3.4.2. Crecimiento de la masa batida**

Si bien la determinación del crecimiento de la masa batida se hubiera podido realizar utilizando la información procedente del análisis de segmentación de imagen 2D, dado el tiempo limitado para la realización del presente trabajo de grado, se decidió realizarlo mediante la medición, con un pie de rey electrónico, de la altura de la masa antes y después del horneado (Cauvain y Young, 2006). La medida realizada tras el horneado se efectuó sobre la altura máxima de la zona central.

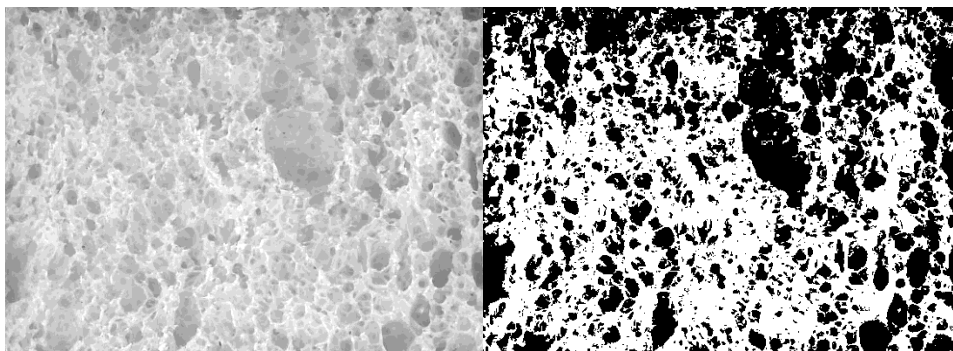
#### **3.4.3. Pérdida de peso**

Se pesó la masa añadida a cada molde, así como cada muestra al final del horneado después de su atemperamiento. Con ambos datos se calculó el incremento de masa debido a pérdidas de agua principalmente.

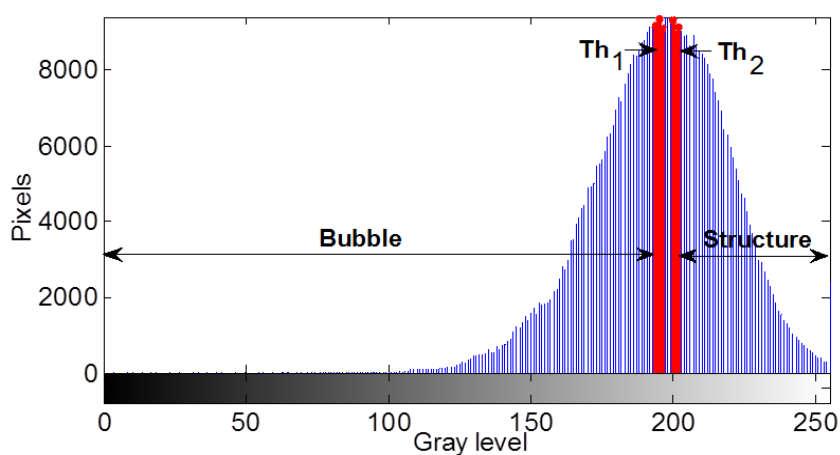
#### **3.4.4. Análisis de los bizcochos por segmentación imagen 2D**

Una vez que el bizcocho se encontraba a 25°C, se realizó un corte transversal para partir cada bizcocho por la mitad y posteriormente, realizarles 3 cortes transversales de 1 cm a cada parte, obteniéndose 6 lonchas por bizcocho. Cada cara de las rebanadas fueron escaneadas en un escáner CanoScan LiDE 50 con la ayuda de un fondo negro, obteniéndose un total de 12 lecturas (imágenes) por bizcocho.

Para segmentar las burbujas y los píxeles se seleccionó un método de umbral de bandas (Figura 3.3.) seguido por un proceso de crecimiento (Figura 3.4.). El umbral de bandas fue usado para introducir flexibilidad al umbral global. Los píxeles con valor inferior al umbral que recoge los tonos más oscuros hasta el negro (Th1), fueron clasificados como burbujas, mientras que los píxeles del segundo umbral (Th2), el cual se extiende hasta el blanco, fueron clasificados como estructura/matriz. Estos dos umbrales fueron seleccionados con el objetivo de obtener un elevado grado de confianza para la primera clasificación del proceso. Se obtuvo el número y tamaño de burbujas en la sección de bizcocho a partir de la medida de los espacios visibles por medio de los diferentes tonos de píxeles, que al sumar sus áreas, permitieron conocer el tamaño real de la burbujas, las cuales fueron relacionadas con el área final obtenida para cada bizcocho en función de las variables de su procesado. Las burbujas fueron contabilizadas y calculado el área total de burbuja y el tamaño medio de estas. Esta técnica fue realizada basándose en anteriores trabajos (Benlloch y col., 1995; Benlloch y col., 1996<sup>a</sup>; Benlloch y col., 1996<sup>b</sup>).



**Fig. 3.3.** Representación de la segmentación de imagen por el método del umbral de banda. Imagen de la izquierda (áreas oscuras representan burbujas y áreas luminosas la estructura). Imagen de la derecha: imagen segmentada donde píxeles negros representan burbujas y blancos la estructura.



**Fig. 3.4.** Histograma de los valores de tono de gris correspondiente a cada píxel, obtenido en el análisis de imagen mediante segmentación, diferenciando el rango de valores correspondiente a burbuja y el de estructura. Th1: primer umbral. Th2: segundo umbral.

### **3.4.5. Textura**

En este trabajo se realizó un análisis mecánico, concretamente Análisis del Perfil de Textura (TPA). La textura de las muestras fue analizada en un texturómetro Stable Micro Systems, Mod. Texture Analyzer–XR2, Godalming, Surrey UK. Para ello se usaron de cada muestra una porción regular en forma de cubo de 4 x 4 cm, los cuales se comprimieron mediante un pistón de compresión (P/75) de 75 mm de diámetro con una velocidad de ensayo de 10.00 mm/s y deformación del 50 %. Se realizaron 6 réplicas por cada fórmula.

### **3.4.6. Procesado de datos**

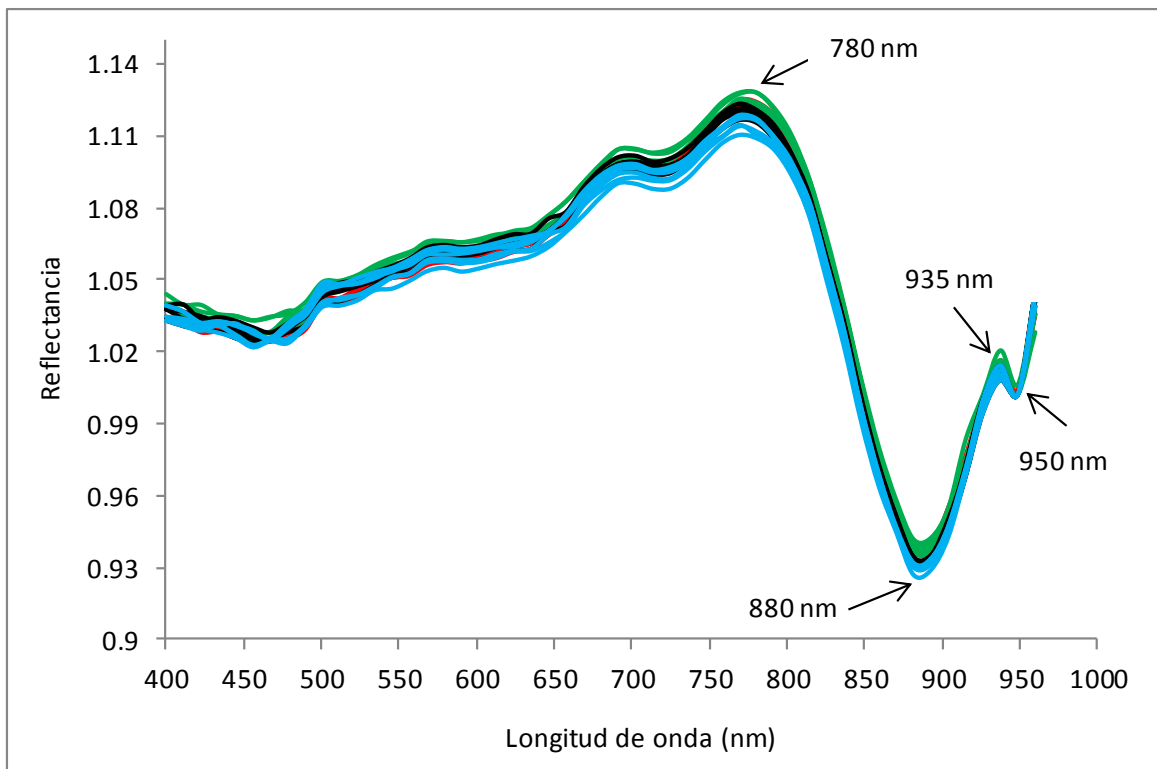
Los datos fueron analizados mediante dos métodos estadísticos diferentes. Uno de ellos fue el ANOVA, el cual se aplicó para la determinación de diferencias significativas entre los grupos de datos de las muestras con diferentes condiciones de procesado. Para ello se utilizó Statgraphics versión Centurión XVI.II con un nivel de significación del 95 % ( $p < 0.05$ ). En el caso en el que las diferencias fueron significativas estas se evaluaron mediante el análisis de comparación de medias con la distribución Fisher LSD).

Por otra parte se aplicó análisis multivariable para el procesado de la información obtenida en las capturas de imagen hiperespectral dada la gran cantidad de información que se genera mediante esta técnica. El análisis multivariable utilizado fue el Análisis de Componentes Principales (PCA) con el objetivo de estudiar la respuesta del conjunto de variables obtenidas en base al espectro SW-NIR y así determinar las que mayor cantidad de varianza recogen para poder reducir la dimensionalidad. Para ello se utilizó el paquete de estadística multivariable PLS Toolbox 6.3 (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, Washington, USA) de Matlab 7.6 (The Mathworks, Natick, Massachusetts, USA).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

### **4.1. Caracterización del pretratamiento de las harinas mediante análisis de imagen multiespectral (Visible e infrarrojo cercano)**

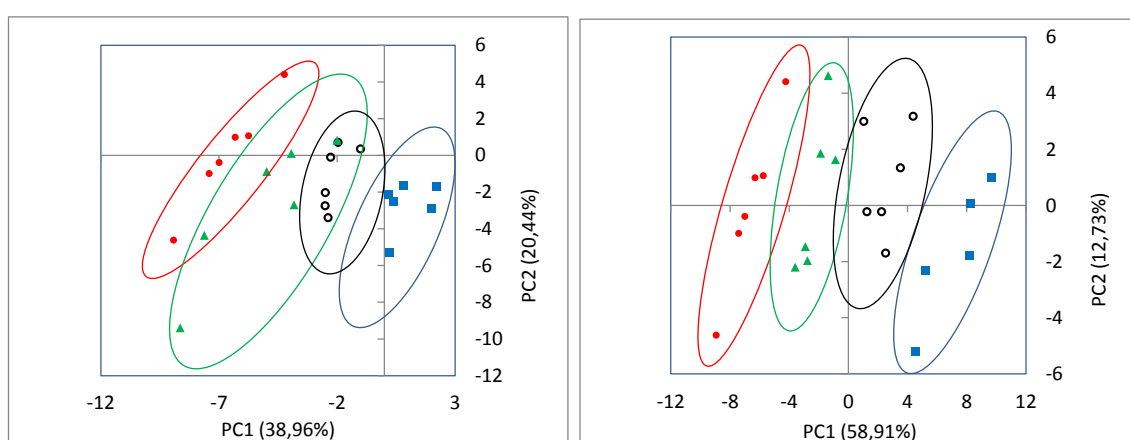
La Figura 4.1. muestra a modo de ejemplo el espectro de reflectancia (visible e infrarrojo) de las harinas tratadas con calor durante 30 minutos a 80, 100 y 130 °C, así como para las no tratadas (control). Como se puede apreciar, si bien existió un incremento en los valores de reflectancia en el área del visible (400 a 760 nm), esta se produjo de forma independiente al tratamiento térmico. En cambio en la zona del infrarrojo cercano se produjeron cuatro picos en los que se produjo una inversión en los valores de la reflectancia (780, 880, 935 y 950 nm). Murray (2004) y Grau y col. (2011) asociaron estos picos a grupos carbonilo (CH, CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>), hidroxilo (R-OH), aminas primarias (R-NH<sub>2</sub>) y secundarias (R-NH-R), compuestos aromáticos (ArOH y ArCH) y agua (H<sub>2</sub>O).



**Fig. 4.1. Representación gráfica del espectro de reflectancia (visible e infrarrojo cercano) de las imágenes adquiridas para las harinas pretratadas térmicamente durante 30 minutos a diferentes temperaturas. Control — ; 80°C — ; 100°C — ; 130°C — .**

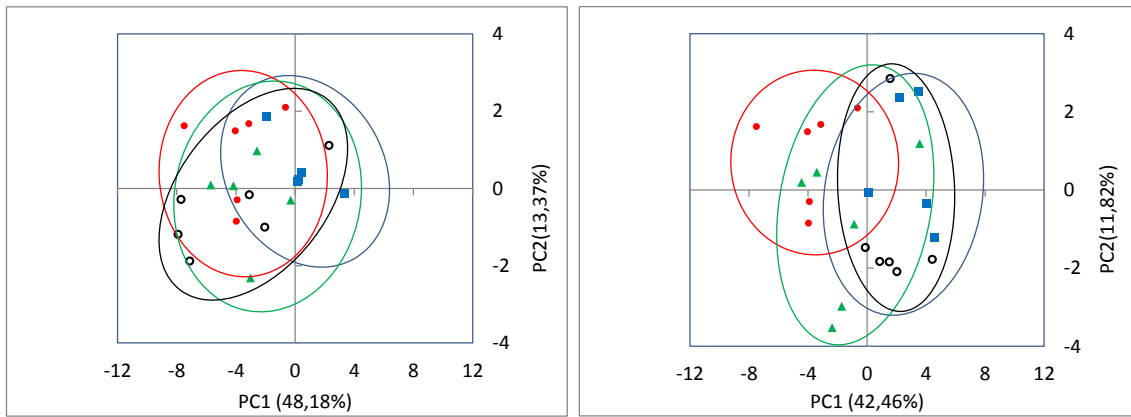
El análisis estadístico del espectro completo mediante el análisis multivariante PCA (Fig. 4.2) mostró como existieron diferencias estadísticas (expresadas en la figura por las agrupaciones) entre los valores de reflectancia de las harinas en función del pretratamiento térmico a 80 y 130 °C, siendo esta discriminación mayor en el caso de las muestras tratadas durante 30 minutos (Fig. 4.2. derecha), en la que la componente 1 (PC1= 58.91%) fue la que aportó la mayor parte de la información. Así, el efecto tiempo de pretratamiento parece ser influyente en los espectros obtenidos, como también lo es la temperatura de pretratamiento que como se puede observar en ambos casos, independientemente de la significancia, existió una evolución en la agrupación de las muestras, marcada fundamentalmente por la componente 1. Un posible factor influyente que podría explicar las diferencias observadas entre el control y los pretratamientos podría ser el grado de pregelatinizado del almidón. Lo que ocurre en el pretratamiento con calor es una pregelatinización, que supone la rotura del granulo por disociación de sus enlaces débiles (mayoritariamente puentes de hidrógeno entre grupos hidroxilo de la amilosa y amilopectina) y la entrada o interacción del agua contenida en la harina (Bernabé, 2009). Posteriormente, la muestra con los gránulos de almidón al estar en la cámara controlada (donde se produce la rehumectación), se abren y aumentan su tamaño por la incorporación de agua. El agua incorporada forma puentes de hidrógeno con los grupos hidroxilo (R-OH) de las cadenas de amilosa y amilopectina, sustituyendo los formados entre estas últimas cuando aún se encuentran en estado cristalino. La mayoría de estos puentes son formados por la amilosa que migra del granulo de almidón al exterior. Lo cual quiere decir que los grupos hidroxilo de la amilosa quedan disponibles para interactuar con el agua y/u otros

componentes del sistema. Según Murray (2004), los grupos hidroxilo tienen un pico de absorbancia entre 800-1000 nm aproximadamente. Dicha zona es la que en el espectro obtenido marca la mayoría de la variabilidad de las muestras con tratamiento diferente. La reflectancia observada va desde un mínimo, presentada por el control, hasta un máximo presentado por la T130. En principio, el grado de alteración del grano de almidón, y por lo tanto de amilosa fuera del grano, o al menos interactuando con el agua de alrededor aumenta con la intensidad del tratamiento térmico. Siendo así, a mayor cantidad de amilosa, mayor cantidad de grupos hidroxilo disponibles para interactuar con la radiación, y por lo tanto menor reflectancia en esa franja de longitudes de onda. De manera que el proceso de pretatamiento de las harinas ha podido verse reflejado en el método de análisis de imagen utilizado, como marcaba uno de los objetivos de este trabajo.

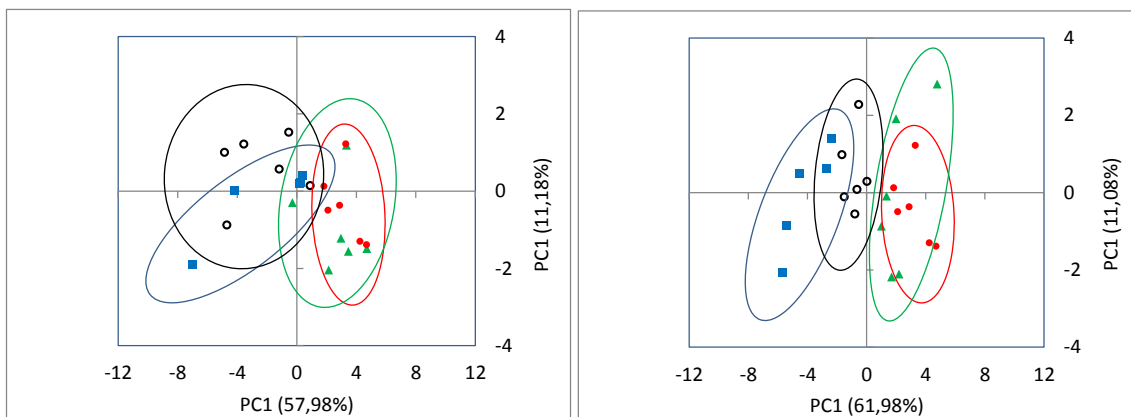


**Fig. 4.2. Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro completo (visible e infrarrojo cercano) en harinas pretratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .**

Con la finalidad de determinar qué zona del espectro es la que ofrece más información acerca de la agrupación de la población, se analizaron por separado las dos zonas del espectro, visible e infrarrojo. Como se observa en la Figura 4.3., no se generaron agrupaciones estadísticamente significativas cuando solo se utilizó la información procedente del espectro visible, independientemente del tiempo de tratamiento. En cambio cuando se utilizó la procedente del espectro del infrarrojo sí se generaron agrupaciones estadísticas entre las muestras control, T80 y T130 (Fig. 4.4), si bien la mayor discriminación se obtiene, como anteriormente se ha comentado, utilizando la información de todo el espectro.



**Fig. 4.3.** Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro del visible en harinas tratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .



**Fig. 4.4.** Representación del espacio PCA para los dos primeros componentes principales del espectro del infrarrojo cercano en harinas tratadas con calor durante 10 minutos (izquierda) y 30 minutos (derecha). Control ● ; 80°C ▲ ; 100°C ○ ; 130°C ■ .

## 4.2. Caracterización de los bizcochos

Una vez elaborados los bizcochos con la harinas descritas anteriormente y teniendo en cuenta el factor tiempo de batido (2 y 10 minutos) se procedió a la caracterización de estos. El análisis de la subida de la masa de los bizcochos durante el horneado (Fig. 4.5.) no mostró un efecto claro del tiempo de batido, así como del tratamiento térmico y de la temperatura, si bien parece que las harinas tratadas durante 30 minutos a 80 °C y 100 °C, independientemente del tiempo de batido, tuvieron un comportamiento similar e igual al del patrón, produciéndose un descenso en la subida de la masa para los tratamientos a 130 °C.

Tal y como expone Wilderjans y col. (2013), la transformación de los ingredientes en un bizcocho supone una serie de procesos complejos que no son fáciles de estudiar y comprender. Parece ser que el motivo sobre el que fundamentar las diferentes alturas en el producto puede ser por la acción del gluten y el almidón de la propia harina. Las altas temperaturas suponen una desnaturalización de las gliadinas (componente que forma el gluten) y un hinchazón de éstas. Se trata de un proceso de desnaturalización que provoca un incremento de viscosidad del gluten, llevando a un aumento de la viscosidad y dando

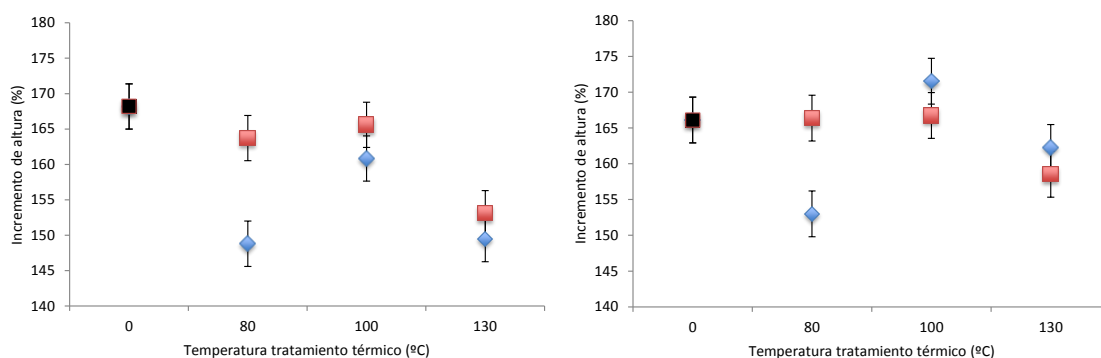
resultados más positivos en el incremento de altura en el proceso de horneado (Neill y col., 2012). Falcao-Rodrigues y col. (2005) también sugirieron al respecto que las gliadinas tienen un papel significativo causando una mayor viscosidad. El calor provoca el aumento del número de puentes de disulfuro y cambios conformacionales (Attenburrow y col., 1990) que afectan mayormente a las gliadinas y moléculas de bajo peso molecular como la albúmina y la globulina (Guerrieri y col. 1996). Sin embargo, el gluten, por la cantidad presente y sus características, tiene una función menos importante que el almidón en este tipo de productos (Gómez y col., 2012). Durante el batido no se produce un desarrollo del gluten y en la masa su función no es estructural (Wilderjans y col., 2013). Por esto, en principio la justificación de los efectos observados podrían basarse en la acción del almidón junto al tiempo de batido.

El almidón presenta una estructura granular en la que contiene sus componentes principales: amilosa y amilopectina. Como ya se ha mencionado anteriormente, en el pretratamiento térmico cuanto mayor sea la temperatura y el tiempo, mayor será el grado de pregelatinización. Durante el procesado, sucede la gelatinización del almidón por la incorporación de agua que produciría el hinchamiento de los gránulos y la salida de amilosa, produciendo una solución que junto al horneado daría a la formación de un gel (red tridimensional) que capta y retiene agua. El almidón de harina de trigo tiene una temperatura de gelatinización de 52-64°C (Cheftel y Cheftel, 1992). Por encima de 55-70°C la gelatinización del almidón da lugar a una suspensión con una mayor viscosidad (Cheftel y Cheftel, 1992), ese incremento en viscosidad está relacionado con la habilidad de las cadenas de amilosa de reorganizarse y formar un gel (Gómez y col., 2008) que podría favorecer la posterior captación y retención de gas, ofreciendo una mejora en el incremento de altura del bizcocho, respecto a uno formulado con harina sin tratar. Esto concuerda con lo indicado por Cauvain y Young (2006) en que las variaciones en la retención de gas de la masa y expansión del batido de la masa permiten evaluaciones de altura en el producto.

En base a esto, las harinas T130 podrían haber sufrido un exceso de tratamiento, donde además de la gelatinización del almidón, la pérdida de agua produjo efectos como la retrogradación no reversible de parte de la amilosa y con ello la pérdida de capacidad de aumento de la viscosidad posterior. Ello genera que la fuerza y estabilidad del gel sea menor, debido a una peor interacción con el agua que causa que los volúmenes sean inferiores (Wilderjans y col., 2008). Como indicaron Wilderjans y col. (2013) la capacidad de absorción de agua de la harina influye en la viscosidad de la masa y un aumento de la viscosidad restringe la migración y coalescencia de las partículas tanto de aire como de grasa, por lo que contribuye a una emulsión y espuma más estable. Gough y col. (1978), también sugirieron que el grado en que sucede la gelatinización del almidón podría determinar la fuerza de la estructura de la miga y por tanto, la habilidad del bizcocho para resistir el colapso. Además, es sabido que el volumen específico depende del aire incorporado durante el batido y su retención en el horneado, y esto depende de la viscosidad de la masa y la distribución de las burbujas dentro de ella (Stauffer, 1990).

Temperaturas superiores a 100 °C pueden estar influyendo sobre el almidón de forma excesiva, inhibiendo la subida de las masas. Es de destacar como las harinas tratadas térmicamente durante 10 minutos, y con un batido de 2 minutos, presentaron un descenso en la subida lo cual podría ser debido a un exceso de pretratamiento en el gluten, que origina una pérdida de funcionalidad de este y una falta de pregelatinización del almidón, lo que supone

una menor retención de agua y de aire en la masa, a la vez que una menor incorporación de cantidad de aire. En cambio cuando se aplicó un batido durante 10 minutos dicho descenso no se evidenció para los tratamientos térmicos a 100 y 130 °C. Esto podría mostrar que se necesita de una combinación tiempo / temperatura cercana a 100 °C para que el efecto de estos sobre el almidón genere los cambios que influyan sobre la subida del bizcocho.



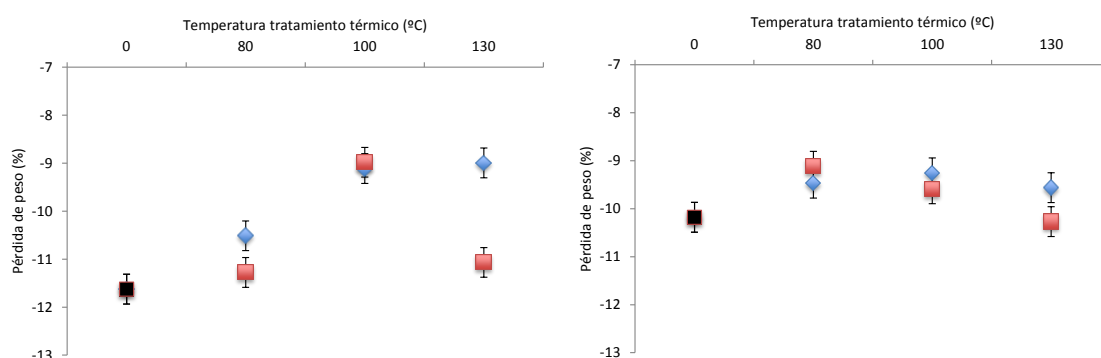
**Fig. 4.5. Representación gráfica de incremento de altura en porcentaje de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■, 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).**

Como explicaron Gómez y col. (2012) la pérdida de peso está provocada mayormente por la evaporación de agua durante el horneado, por esto, una mayor capacidad de retención de agua debida a la gelatinización del almidón supondrían unas pérdidas menores en el producto. Además, conocer el porcentaje de peso que pierde el producto respecto a la masa añadida previamente al horneado, resulta interesante a la hora de buscar una relación y explicación respecto a los datos (tomados mediante técnicas de imagen) de la estructura que presenta la miga de bizcocho o las características de la harina de su formulación. El análisis de la pérdida de peso durante el horneado de las masas batidas durante 2 minutos (Fig. 4.7. izquierda) mostró como este decrece a medida que aumentó la temperatura de tratamiento térmico hasta los 100 °C, para volver a crecer a la temperatura de 130 °C. Esto podría ser debido a la fuerza del gel del almidón a temperaturas inferiores a 130 °C, el cual retendría más agua y por tanto se produciría una menor pérdida de agua (Gómez y col., 2012). Así temperaturas cercanas a 130 °C y tiempos más prolongados de tratamiento térmico (30 minutos) podrían reducir esta capacidad de mayor retención de agua del almidón. En el caso de las masas batidas durante 10 minutos (Fig. 4.7. derecha), los bizcochos pretratados térmicamente durante 10 minutos se vieron menos afectados por la temperatura de pretratamiento, siendo en todos los casos menores las pérdidas de pesos que las obtenidas para el batido de 2 minutos. Esto podría ser debido a que el incremento del tiempo de batido facilitaría la fijación del agua por el almidón, lo que genera una menor pérdida de peso. En cambio al aumentar el tiempo del pretratamiento térmico de la harina a 30 minutos, se produce un incremento en la pérdida de peso durante el horneado del bizcocho que estaría relacionada con la retrogradación de la amilosa de forma irreversible, formando complejos insolubles y por tanto perdiendo capacidad de retención del agua (Zhang y col., 2014).

Cabría pensar por tanto, que el tratamiento óptimo con calor de la harina sería cuando mayor fuera el tratamiento térmico, porque mayor sería la gelatinización y se obtendría un producto con unos valores en pérdida de peso inferiores e incremento de altura superiores como sucedió en el trabajo de Neill y col. (2012), en el que el tratamiento tiempo/temperatura



óptimo fue de 120-130°C y 30 min, pero esto no ocurrió en el presente trabajo. Los más favorables en cuanto a altura y pérdida de peso se recogieron en harinas T100 y no en harinas T130. Este efecto ya lo comentó Cheftel y Cheftel (1992), indicando que una prolongación del tratamiento hidrotérmico, puede suponer una ruptura de los gránulos, hidrólisis parcial y disolución más o menos completa de las moléculas constituyentes, lo que origina un descenso de la viscosidad. De igual modo, con el tiempo o a una alta concentración, hay formación de geles cristalinos y precipitados irreversibles (Cheftel y Cheftel, 1992), como pudo ser en el caso de T130. Otro motivo de esta diferencia, es que el alto tratamiento térmico realizado en harinas T130, pudo dar lugar a la formación de otros compuestos diferentes debido a las reacciones de Maillard.



**Fig. 4.6. Representación gráfica de la pérdida de peso de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■, 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).**

El análisis de segmentación de imagen 2D aplicado a la caracterización del tamaño y número de burbujas de los bizcochos mostró como el tiempo de batido es muy influyente. Como se puede observar en la Figura 4.7., independientemente del tiempo de tratamiento térmico y de la temperatura aplicada, los bizcochos elaborados con un batido de 2 minutos presentaron un menor número de burbujas y de mayor tamaño que los elaborados con un batido de 10 minutos. Evaluando la incidencia de la temperatura de pretratamiento de las harinas sobre las características de las burbujas quedó de manifiesto como el tratamiento a 100 °C es el que genera un mayor número de burbujas y de menor tamaño, siendo esto muy acentuado cuando se realiza el batido durante 10 minutos. En tratamientos a 130 °C, el efecto tiempo fue muy acentuado. Mientras a 10 minutos se evidenció la formación de pequeñas burbujas cuando el tiempo de batido fue de 10 minutos, a 30 minutos de tratamiento térmico las diferencias generadas se redujeron. Este comportamiento, aunque menos acentuado, también se dio para todas las temperaturas donde las diferencias entre las burbujas generadas por efecto del tiempo de batido se redujo. De acuerdo con Massey y col. (2001) quienes analizaron la incorporación de aire en la masa batida usando una batidora a presión, el tamaño de burbuja decrece con el tiempo de batido, como ocurrió en nuestro trabajo entre tiempos 2 y 10 minutos como se puede observar en la Figura 4.7. Así mismo, el mayor tiempo de batido supone una mejor dispersión de las burbujas de aire dentro de la masa y junto a una mejor retención debido al tratamiento con calor, supone una mayor fuerza del gel que origina mejores resultados tras el proceso de horneado (Meza y col., 2011).

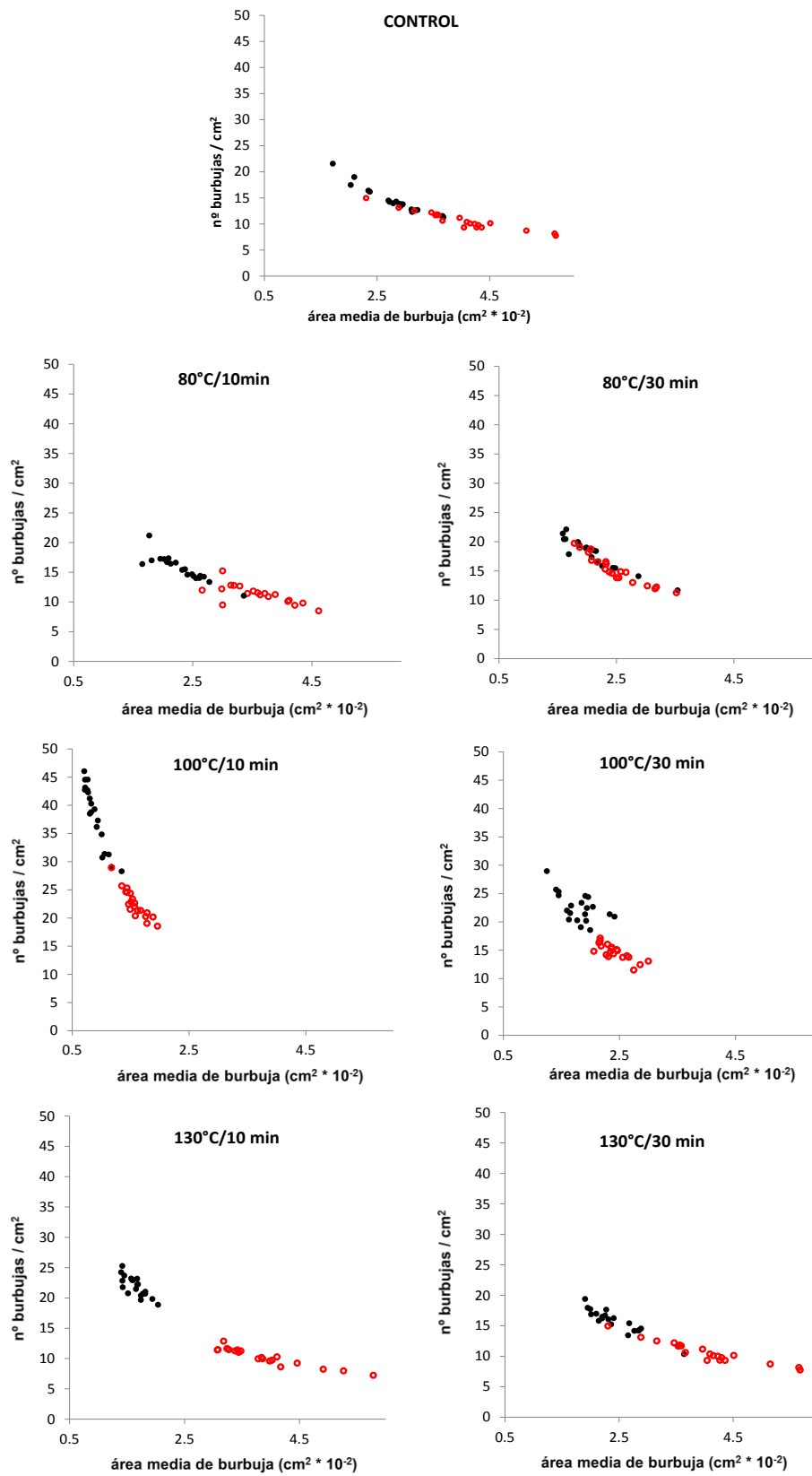
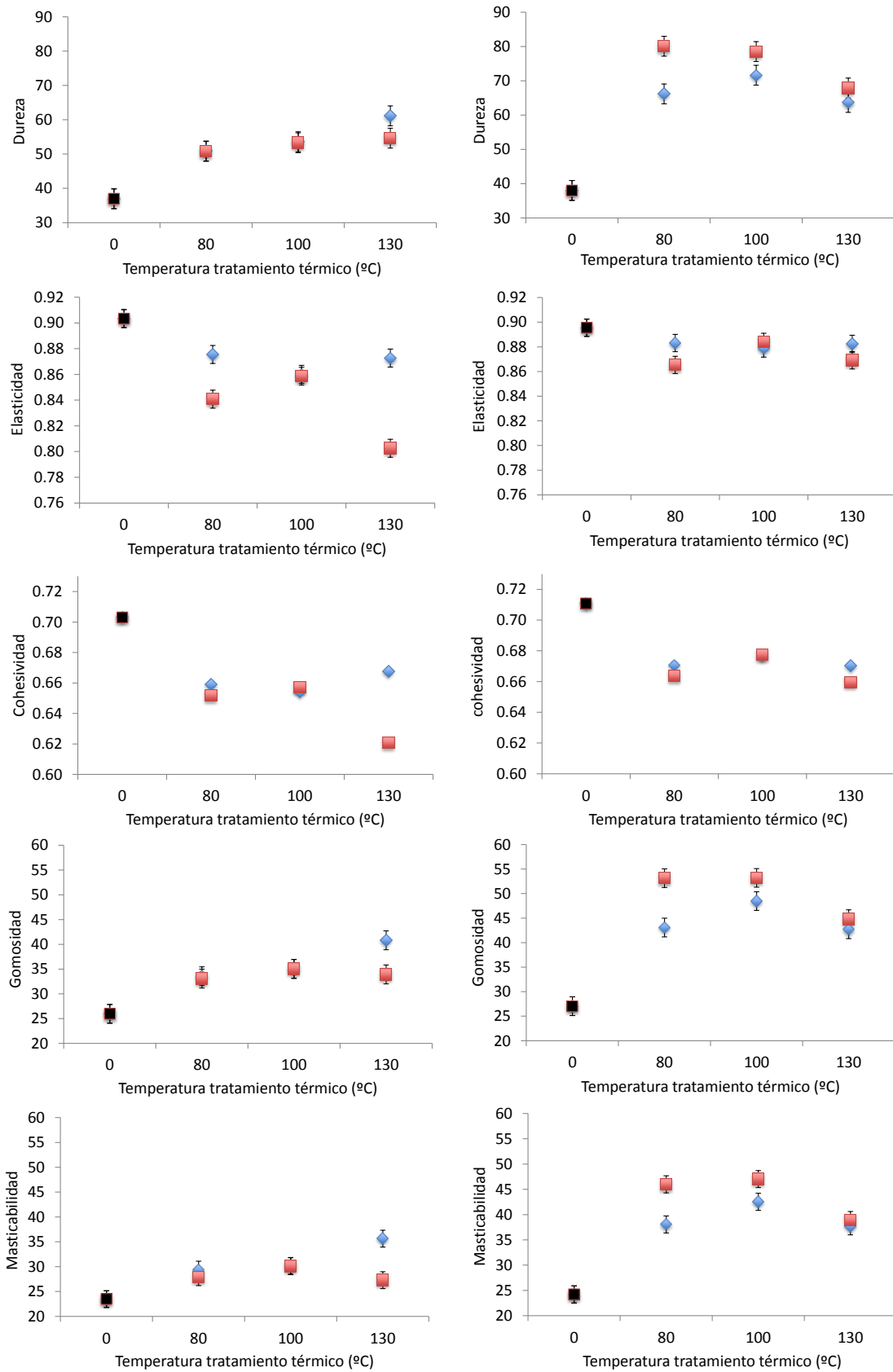


Fig. 4.7. Representación gráfica del número de burbujas frente al área media de burbuja presentes en los bizcochos, diferenciando tratamiento térmico recibido por las harinas (temperatura y tiempo de tratamiento) y el tiempo de batido 2 minutos ○ y 10 minutos ● .

En el estudio realizado por Edoura-Gaena y col. (2007) mostraron que los cambios en las propiedades reológicas de la masa están afectados por la cantidad de aire incorporado y Allais y col. (2006) demostraron que el aire incorporado a la masa modifica la viscosidad. La viscosidad disminuye si el aire retenido es menor (Tan y col., 2011) por lo que junto a la gelatinización del almidón, se debe considerar como otro importante factor que contribuye a la viscosidad de las masas batidas (Swami y col, 2004). Por tanto, ambos factores que afectan a la reología de las muestras, deben verse reflejados sus efectos en los resultados de análisis de textura. Así pues, el análisis de textura (Fig. 4.8.) mostró como los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente presentaron una mayor dureza que el elaborado con la harina control, siendo esta mayor para los bizcochos elaborados con 10 minutos de batido con respecto a los elaborados con solo 2 minutos. El mismo comportamiento se observó para la gomosidad y masticabilidad. En el caso de la elasticidad, si bien para los bizcochos elaborados con 2 minutos de batido esta fue menor que para la obtenida para el control, más acentuado a mayor tiempo de tratamiento térmico de las harinas, para el batido a 10 minutos las diferencias con el control fueron mínimas, no observándose ningún efecto de la temperatura y del tiempo de tratamiento térmico. Finalmente la gomosidad de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente independientemente del tiempo y de la temperatura de tratamiento presentaron valores inferiores a los observados para los bizcochos control. Todo esto podría deberse a la pregelatinización y principalmente, al efecto del gluten dañado. Wilderjans y col. (2008) indicaron que aunque el desarrollo de la red de gluten es limitada en los bizcochos, esto no implica que tenga una función inerte, especialmente durante el horneado donde la interacción de las proteínas es importantísima para la estructura fina. Por otro lado, las diferencias significativas que se observaron en los parámetros de textura a diferentes tiempos de batido podrían estar relacionadas con la cantidad de aire incorporado, el menor tamaño de la burbuja y su mayor dispersión dentro de la masa batida antes del horneado.



**Fig. 4.8. Representación gráfica de los parámetros de textura (dureza, elasticidad, cohesividad, gomosidad y masticabilidad) de los bizcochos elaborados con las harinas tratadas térmicamente durante 0 ■, 10 ◆ y 30 minutos ■ y con un tiempo de batido de 2 minutos (izquierda) y de 10 minutos (derecha).**

## 5. CONCLUSIONES

Los análisis de los resultados muestran como las herramientas de imagen utilizadas en el estudio pueden ser interesantes en el control de procesado de masas batidas elaboradas con harinas pretratadas térmicamente. Así el análisis multiespectral es capaz de discriminar las harinas en función de la temperatura de pretratamiento, principalmente en las harinas tratadas durante 30 minutos, estando esta discriminación fundamentalmente basada en la información procedente del espectro del infrarrojo cercano. El análisis de segmentación de imagen mostró como el tamaño y dispersión de las burbujas de gas generado en los bizcochos dependió de la temperatura de del pretratamiento y del tiempo de este, así como del tiempo de batido de la masa, siendo las harinas tratadas a 100 °C durante 10 minutos y con un batido de 10 minutos las que generaron un bizcocho con un menor tamaño de burbujas y con una distribución más uniforme de estas.

En base al estudio se puede afirmar que el tratamiento con calor y el tiempo de batido son dos variables de procesado que tienen efectos significativos sobre el proceso, por lo que resulta interesante tener conocimiento de su comportamiento de cara a mejorar el procesado de producto.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ALLAIS, I.; EDOURA-GAENA, R.B.; GROS, J.B.; TRYSTRAM, G. (2006). Influence of egg type, pressure and mode of incorporation on density and bubble distribution of a lady finger batter. *Journal of Food Engineering*, 74: 198–210.
- ALLEN, E.; LUCK, P.J.; DAVIS, J.P. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, 20: 284–292.
- ASEMAC (2012). *Manual de calidad de panadería, bollería y pastelería*. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid. 58 pp.
- ATTENBURROW, G.; BARNES, D.J.; DAVIES, A.P.; INGMAN, S.J. (1990). Rheology properties of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 12: 1–14.
- BENLLOCH, J.V.; AGUSTI, M.; SÁNCHEZ, A.; RODAS, A. (1995). Colour segmentation techniques for detecting weed patches in cereal crops. *Proc. of Fourth Workshop on Robotics in Agriculture and the Food-Industry*, 30-31.
- BENLLOCH, J.V.; SÁNCHEZ, A.; AGUSTI, M.; ALBERTO, P. (1996b). Weed Detection in Cereal Fields Using Image Processing Techniques, Precision Agriculture. *Precision agricu* 3, 903-90. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- BENLLOCH, J.V.; SÁNCHEZ-SALMERÓN, A.; CHRISTENSEN, S.; WALTER, M. (1996a). Weed mapping in cereal crops using image analysis techniques. Conference on Agricultural Engineering (*AgEng '96*), 1059-1060. Universidad Politécnica de Madrid.

- BERNABÉ, J.C. (2009). *Influencia de los componentes de la harina en la panificación*. Indespan S.L.
- CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G.; CHANONA-PÉREZ, J.; RAMOS-CRUZ, A.L.; LÓPEZ-LARA, A.I.; TLAPALE-VALDIVIA, A.D.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G.F. (2008). *Fractal and image analysis of Mexican sweet bread bubble distribution; influence of fermentation and mixing time*. In: CAMPBELL, G.M.; SCANLON, M.; PYLE, L.; NIRANJAN, K. (Eds.), *Bubbles in Food 2: Novelty, Health and Luxury American*. Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA.
- CAMPBELL, G. M.; MOUGEOT, E. (1999). Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science and Technology*, 10: 283–296.
- CAUVAIN, S.P.; HODGE, G.; MUIR, D.M.; DODDS, N.J. (1976). *Treatment of grain*. U.S. Patente: 3974298.
- CAUVAIN, S.P.; YOUNG, L. S. (2006). *Productos de panadería: Ciencia, Tecnología y Práctica*. Editorial Acribia, S.A.. Zaragoza. 251 pp.
- CHEFTEL, J.C.; CHEFTEL, H. (1992). *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Volumen 1*. Traducción: Francisco López Capont. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 404 pp.
- CHESTERTON, A.K.S.; MEZA, B.E.; MOGGRIDGE, G.D.; SADD, P.A.; WILSON, D.I. (2011). Rheological characterisation of cake batters generated by planetary mixing: Elastic versus viscous effects. *Journal of Food Engineering*, 105: 332–342.
- CHOI, G. Y.; BAE, J. H.; HAN, G. J. (2007). The quality characteristics of sponge cake containing a functional and natural product. *Journal of East Asian Dietary Life*, 17: 236-242.
- CROWLEY, P.; GRAU, H.; ARENDT, E.K. (2000). Influence of additives and mixing time on crumb grain characteristics of wheat bread. *Cereal Chemistry*, 77(3): 370–375.
- DAH-JYE, L.; ROBERT, S.; JAMES, A.; STEVE, M. (2008). Development of a machine vision system for automatic date grading using digital reflective near-infrared imaging. *Journal of Food Engineering*, 86: 388–398.
- EDOURA-GAENA, R.B.; ALLAIS, I.; TRYSTRAM, G.; GROS, J.B. (2007). Influence of aeration conditions on physical and sensory properties of aerated cake batter and biscuits. *Journal of Food Engineering*, 79: 1020–1032.
- FALCAO-RODRIGUES, M.M.; MOLDAO-MARTINS, M.; BEIRAO-DA-COSTA, M.L. (2005). Thermal properties of gluten proteins of two soft wheat varieties. *Food Chemistry*, 93: 459–465.
- FOEGEDING, E.A.; LUCK, P.J.; DAVIS, J.P. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, 20: 284–292.
- GÓMEZ, M.; OLIETE, B.; ROSELL, C.M.; PANDO, V.; FERNÁNDEZ, E. (2008). Studies on cake quality made of wheatechickpea flour blends. *LWT - Food Science and Technology*, 41: 1701-1709.
- GÓMEZ, M.; DOYAGÜE, M.J.; DE LA HERA, E. (2012). Addition of pin-milled pea flour and air-classified fractions in layer and sponge cakes. *LWT - Food Science and Technology*, 46: 142-147.

- GONZALES-BARRÓN, U.; BUTLER, F. (2006). A comparison of seven thresholding techniques with the k-means clustering algorithm for measurement of bread-crumbs features by digital image analysis. *Journal of Food Engineering*, 74(2): 268–278.
- GOUGH, B. M.; WHITEHOUSE, M. E.; GREENWOOD, C. T.; MILLER, B. S. (1978). Role and function of chlorine in preparation of high ratio cake flour. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 10: 91-113.
- GRAU, R.; SÁNCHEZ, A.J.; GIRÓN, J.; IBORRA, E.; FUENTES, A.; BARAT, J.M. (2011). Nondestructive assessment of freshness in packaged sliced chicken breasts using SW-NIR spectroscopy. *Food Research International*, 44: 331–337.
- GUERRIERI, N.; ALBERTI, E.; LAVELLI, V.; CERLETTI, P. (1996). Use of spectroscopic and fluorescence techniques to access heat induced molecular modifications of gluten. *Cereal Chemistry*, 73: 368–374.
- HANAMOTO, M.; BEAN, M. (1979). *Process for Improving Baking Properties of Unbleached Cake Flours*. US. Patente: 4157406.
- HE, Y.; WU, D.; FENG, S.; LI, X. (2007). Fast measurement of sugar content of yogurt using Vis/NIR-spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, 10 (1): 1–7.
- IVORRA, E.; AMAT, S.V.; SÁNCHEZ, A.J.; BARAT, J.M.; GRAU, R. (2014). Continuous monitoring of bread dough fermentation using a 3D vision Structured Light technique. *Journal of Food Engineering*, 130: 8–13.
- LABBAFI, M.; THAKUR, R.K.; VIAL, C.; DJELVEH, G. (2007). Development of an on-line optical method for assessment of the bubble size and morphology in aerated food products. *Food Chemistry*, 102: 454–465.
- LAGRAIN, B.; BOECKX, L.; WILDERJANS, E.; DELCOUR, J.A.; LAURIKS, W. (2006). Non-contact ultrasound characterization of bread crumb: application of the Biot- Allard model. *Food Research International*, 39: 1067–1075.
- MADRID, A.; CENZANO, I.; MADRID, J.; MADRID, A. (1994). *Manual de Pastelería y Confeitería*. A. Madrid Vicente, Ediciones y Mundi-Prensa Libros, S.A. Madrid, España. 480 pp.
- MASSEY, A.H.; KHARE, A.S.; NIRANJAN, K. (2001). Air inclusion into a model cake batter using a pressure whisk: development of gas hold-up and bubble size distribution. *Journal of Food Science*. 66: 1152–1157.
- MEZA, B.; CHESTERTON, A.; VERDINI, R.; RUBIOLO, A.; SADD, P.; MOGGRIDGE, G.; WILSON, D. (2011). Rheological characterisation of cake batters generated by planetary mixing: comparison between untreated and heat-treated wheat flours. *Journal of Food Engineering*, 104: 592–602.
- MURRAY, I. (2004) *Scattered information: philosophy and practice of near infrared spectroscopy*. Proceedings of the 11th International Conference on Near Infrared Spectroscopy. NIR Publications.
- NAKAMURA, C.; YOSHIKI, K.; SEGUCHI, M. (2008). Increased volume of Kasutera cake by dry heating of wheat flour. *Food Science and Technology Research*, 14: 431–436.

- NEILL, G.; AL-MUHTASEB, A.H.; MAGEE, T.R.A.. (2012). Optimisation of time/temperature treatment, for heat treated soft wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 113: 422–426.
- OSBORNE, B.G. (2000). *Near-infrared Spectroscopy in Food Analysis. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation Volume 12: Electronic Absorption and Luminescence, Gas Chromatography, Infrared Spectroscopy, Kinetic Determinations*. John Wiley & Sons Inc, New York.
- OZAWA, M.; KATO, Y.; SEGUCHI, M. (2009). Investigation of dry-heated hard and soft wheat flour. *Starch-Stärke*, 61: 398–406.
- PÉREZ-NIETO, A.; CHANONA-PÉREZ, J.J.; FARRERA-REBOLLO, R.R.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G.F.; ALAMILLA-BELTRÁN, L.; CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G. (2010). Image analysis of structural changes in dough during baking. *LWT - Food Science and Technology*, 43: 535–543.
- PURHAGEN, J.K.; SJÖÖ, M.E.; ELIASSON, A. (2011). The use of normal and heat-treated barley flour and waxy barley starch as anti-staling agents in laboratory and industrial baking processes. *Journal of Food Engineering*, 104: 414–421.
- RIVA, M. y LIVIERO, S. (2000). Image analysis approach to characterize the bread cooking kinetic. *Industria Alimentaria*, 39(395): 593–660.
- RUSSO, J.V.; DOE, C.A. (1970). Heat treatment of flour as an alternative to chlorination. *Journal of Food Technology*, 5: 363–374.
- SAHU, J.K.; NIRANJAN, K. (2009). *Food Mixing: Principles and Applications*. Blacwell Publishing Ltd. Oxford, UK. 289 pp.
- SAHIN, S. (2008). *Cake batter rheology, en: Food Engineering Aspects of Baking Sweet Goods*. CRC Press, Florida, USA. 99-120.
- SAPIRSTEIN, H. D. (1999). *The imaging and measurement of bubbles in bread*. In: G. M. Campbell, C. Webb, S. S. Pandiella, & K. Niranjan (Eds.), *Bubbles in food* (pp. 233–244). St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists.
- SAPIRSTEIN, H.D.; ROLLER, R.; BUSHUK, W. (1994). Instrumental measurement of bread crumb grain by digital image analysis. *Cereal Chemistry*, 71(4): 383–391.
- SASIC, S.; OZAKI, Y. (2001). Short-wave near-infrared spectroscopy of biological fluids. 1. Quantitative analysis of fat, protein, and lactose in raw milk by partial least-squares regression and band assignment. *Anal-Chem*. Jan 1; 73(1): 64-71.
- SOLEIMANI, A.R.; JAFARY, A.; RAFIEE, SH. (2011). Monitoring the dynamic density of dough during fermentation using digital imaging method. *Journal of Food Engineering*, 107: 8–13.
- STAUFFER, C.E. (1990). *Functional additives for bakery foods*. New York: Van Nostrand Reinhold. 279 pp.
- SUBEDI, P.P.; WALSH, K.B.; OWENS, G. (2007). Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*, 43 (3): 326-334.
- SWAMI, S.B.; DAS, S.K.; MAITI, B.; (2004). Effect of water and air content on the rheological properties of black gram batter. *Journal of Food Engineering*, 65: 189–196.



- TAN, M.C.; CHIN, N.L.; YUSOF, Y.A. (2011). Power ultrasound aided batter mixing for sponge cake batter. *Journal of Food Engineering*, 104: 430–437.
- TONG, Q.; ZHANG, X.; WU, F.; TONG, J.; ZHANG, P.; ZHANG, J. (2010) Effect of honey powder on dough rheology and bread quality. *Food Research International*, 43: 2284–2288.
- WILDERJANS, E.; PAREYT, B.; GOESAERT, H.; BRIJS, K.; DELCOUR, J.A. (2008). The role of gluten in a pound cake system: A model approach based on gluten–starch blends. *Food Chemistry*, 110: 909–915.
- WILDERJANS, E.; LUYTS, A.; BRIJS, K.; DELCOUR, J.A. (2013). Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science & Technology*, 30: 6-15.
- WU, D.; HE, Y.; FENG, S. (2008). Short-wave near-infrared spectroscopy analysis of major compounds in milk powder and wavelength assignment. *Analytica Chimica Acta*, V. 610, (2): 232-242.
- ZAYAS, I. Y. (1993). Digital image texture analysis for bread crumb grain evaluation. *Cereal Foods World*, 38(10): 760–766.
- ZGHAL, M.C.; SCANLON, M.G.; SAPIRSTEIN, H.D. (1999). Prediction of bread crumb density by digital image analysis. *Cereal Chemistry*, 75(5): 734–742.
- ZHANG, Y.; LIU, W.; LIU, C.; LUO, S.; LI, T.; LIU, Y.; WU, D.; ZUO, Y. (2014). Retrogradation behaviour of high-amylose rice starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Food Chemistry*, 158: 255–261.

## 7. ANEXOS

Temperatura tratamiento (°C)	Control		80				100				130			
Tiempo de tratamiento (min)	-		10		30		10		30		10		30	
Visible	1,065 ± 0,001 ab		1,068 ± 0,005 b		1,069 ± 0,002 ab		1,061 ± 0,003 a		1,066 ± 0,002 b		1,066 ± 0,004 b		1,063 ± 0,003 ab	
Infrarrojo	1,019 ± 0,002 de		1,021 ± 0,003 e		1,020 ± 0,002 e		1,014 ± 0,002 ab		1,015 ± 0,002 c		1,017 ± 0,003 cd		1,013 ± 0,002 a	
Tiempo de amasado (min)	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10
Incremento altura (%)	168,19 ± 5,71 de	166,11 ± 8,08 cde	148,79 ± 8,40 a	153,00 ± 6,41 ab	163,73 ± 5,97 cde	166,39 ± 6,70 cde	160,83 ± 7,68 bcd	171,55 ± 7,68 e	165,60 ± 8,21 de	166,75 ± 7,78 cde	149,46 ± 9,06 a	162,29 ± 7,89 cd	153,11 ± 5,95 ab	158,52 ± 8,39 bc
Pérdida de peso (%)	10,10 ± 1,18 ef	9,12 ± 0,80 abcde	9,53 ± 0,85 bcdef	9,32 ± 0,89 abcdef	9,94 ± 0,84 def	8,78 ± 1,39 ab	8,99 ± 0,61 abc	8,59 ± 0,40 a	9,20 ± 0,72 abcde	9,12 ± 0,46 abcd	9,78 ± 0,73 cdef	9,21 ± 0,51 abcdef	10,17 ± 0,73 f	9,90 ± 0,54 cdef
Área media burbuja (cm <sup>2</sup> E-02)	3,52 ± 0,55 f	2,82 ± 0,51 e	3,03 ± 0,62 e	2,32 ± 0,41 cd	2,48 ± 0,46 d	2,09 ± 0,48 c	0,89 ± 0,18 a	1,57 ± 0,19 b	2,42 ± 0,25 d	2,42 ± 0,25 d	3,58 ± 0,38 f	1,65 ± 0,18 b	3,59 ± 0,58 f	2,42 ± 0,43 d
Burbujas por área total (cm <sup>2</sup> )	11,16 ± 2,03 a	14,40 ± 2,58 b	10,91 ± 2,31 a	15,59 ± 2,09 b	15,25 ± 2,47 b	18,07 ± 2,58 c	38,16 ± 5,56 e	22,54 ± 2,53 d	14,68 ± 1,42 b	14,72 ± 1,37 b	10,25 ± 1,45 a	21,89 ± 1,66 d	10,64 ± 1,78 a	15,79 ± 1,97 b
Dureza	36,95 ± 2,55 a	38,02 ± 2,37 a	50,91 ± 5,03 b	64,22 ± 5,80 cd	50,76 ± 8,67 b	80,10 ± 7,48 f	53,58 ± 4,90 b	71,64 ± 6,56 e	53,28 ± 5,68 b	78,52 ± 4,35 f	61,15 ± 4,69 c	63,68 ± 3,76 cd	54,66 ± 5,58 b	67,90 ± 5,96 de
Elasticidad	0,90 ± 0,01 i	0,90 ± 0,01 hi	0,88 ± 0,01 efg	0,88 ± 0,01 gh	0,84 ± 0,02 b	0,87 ± 0,01 cde	0,86 ± 0,01 cd	0,88 ± 0,01 fg	0,86 ± 0,01 c	0,88 ± 0,01 gh	0,87 ± 0,01 defg	0,88 ± 0,01 gh	0,80 ± 0,02 a	0,87 ± 0,01 cdef
Cohesividad	0,70 ± 0,004 i	0,71 ± 0,007 j	0,66 ± 0,007 bcd	0,67 ± 0,005 fg	0,65 ± 0,001 b	0,66 ± 0,004 de	0,65 ± 0,005 bc	0,68 ± 0,007 gh	0,66 ± 0,007 bcd	0,68 ± 0,004 h	0,67 ± 0,003 efg	0,67 ± 0,005 fg	0,62 ± 0,008 a	0,62 ± 0,009 cd
Gomosidad	25,97 ± 1,67 a	27,04 ± 1,88 a	33,56 ± 3,43 b	43,08 ± 4,05 c	33,08 ± 5,68 b	53,15 ± 5,02 e	35,07 ± 3,32 b	48,46 ± 4,40 d	35,04 ± 3,98 b	53,20 ± 3,04 e	40,82 ± 3,20 c	42,71 ± 2,82 c	33,93 ± 3,54 b	44,80 ± 4,05 cd
Masticabilidad	23,47 ± 1,68 a	24,22 ± 1,83 ab	29,40 ± 3,22 c	38,05 ± 3,73 d	27,90 ± 5,42 abc	45,99 ± 4,32 fg	30,17 ± 3,02 c	42,55 ± 3,50 efg	30,10 ± 3,60 c	47,03 ± 2,81 g	35,64 ± 3,01 d	37,69 ± 2,55 d	27,28 ± 3,33 bc	38,94 ± 3,65 de
Resiliencia	0,28 ± 0,004 i	0,26 ± 0,006 h	0,24 ± 0,005 def	0,25 ± 0,005 fg	0,24 ± 0,002 cde	0,24 ± 0,003 bc	0,24 ± 0,007 cde	0,25 ± 0,006 efg	0,24 ± 0,007 cd	0,25 ± 0,004 fg	0,25 ± 0,005 g	0,25 ± 0,004 fg	0,21 ± 0,006 a	0,23 ± 0,004 b