



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**



**“CARACTERIZACIÓN DE BATIDOS Y PANQUÉS CON LA ADICIÓN  
DE ALMIDÓN NATIVO DE MAÍZ”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**MARIANA VERDUZCO IBARRA**

DIRECTORA ACADÉMICA:

**DRA. ANDREA YAZMIN GUADARRAMA LEZAMA**

COASESOR:

**M. en C.Q. HECTOR CARRILLO NAVAS**

JUNIO, 2016

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	5
1. MARCO TEÓRICO	7
1.1. Harina de trigo	8
1.2. Almidones nativos	9
1.2.1. Gelatinización	13
1.3. Batidos	14
1.3.1 Caracterización de batidos	19
1.4. Horneado en productos de panificación	21
1.4.1 Caracterización de panqués	24
2. JUSTIFICACIÓN	27
3. HIPÓTESIS	29
4. OBJETIVOS	31
4.1. Objetivo general	32
4.2. Objetivos específicos	32
5. MATERIALES Y MÉTODOS	33
5.1. Materiales	34
5.2. Métodos	34
5.2.1. Preparación de los batidos	34
5.2.2. Caracterización térmica de los batidos	35
5.2.3. Propiedades reológicas de los batidos	35
5.2.4. Horneado de los batidos	36
5.2.5. Microestructura de los panqués	36
5.2.6. Análisis de color de los panqués	36
5.2.7. Análisis de textura de los panqués	37
5.2.8. Análisis estadístico	37
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
6.1. Caracterización térmica de los batidos	39

6.2. Propiedades reológicas de los batidos	41
6.2.1. Viscosidad aparente de los batidos	41
6.2.2. Viscoelasticidad de los batidos	43
6.3. Microestructura de los panqués	44
6.4. Análisis de color de los panqués	46
6.5. Análisis de textura de los panqués	48
7. CONCLUSIONES	51
8. BIBLIOGRAFÍA	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formulación de batidos	34
Tabla 2. Parámetros térmicos de los batidos	40
Tabla 3. Parámetros de color de los panqués	47
Tabla 4. Parámetros de textura de los panqués	48
Tabla 5. Parámetros de ajuste a la ecuación sigmoidea de los datos experimentales	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de la amilosa y amilopectina	12
Figura 2. Termograma del batido formulado con 100% harina de trigo	39
Figura 3. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla de los batidos	42
Figura 4. Barridos de deformación de los batidos: (a) módulo elástico, (b) módulo viscoso y (c) ángulo de pérdida	43
Figura 5. Micrografías de los panqués: (a), (b) B <sub>0</sub> , (c), (d) B <sub>25</sub> , (e), (f) B <sub>50</sub> , (g), (h) B <sub>75</sub> y (i), (j): B <sub>100</sub>	46
Figura 6. Apariencia de la corteza de los panqués: (a) B <sub>0</sub> , (b) B <sub>25</sub> , (c) B <sub>50</sub> , (d) B <sub>75</sub> y (e) B <sub>100</sub>	46
Figura 7. Comportamiento de las propiedades texturales típicas en función del contenido de harina de trigo	49

# RESUMEN

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue elaborar y caracterizar diferentes formulaciones de batidos para panqué con la adición de almidón nativo de maíz, mismo que además de influir en las condiciones de procesamiento y su comportamiento viscoelástico, también influye en la microestructura y textura de los panqués obtenidos. En la caracterización de las diferentes formulaciones de batido, se evaluó el efecto de la sustitución total y parcial de harina de trigo por almidón nativo de maíz y su efecto en las propiedades reológicas y térmicas, mientras que en el panqué obtenido se determinaron las características microestructurales, texturales y de color. El análisis térmico realizado mostró que los gránulos de almidón, independientemente de su naturaleza, fueron sometidos solamente a una hinchazón incipiente debido a la disponibilidad de agua limitada en la matriz del batido. A medida que se incrementa el porcentaje de harina de trigo sustituida por almidón nativo de maíz en las diferentes formulaciones, el batido presentó un mayor ordenamiento en su estructura y los valores de entalpía de gelatinización aumentaron, produciendo una disminución en la viscosidad aparente de los batidos y en los módulos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ). Los valores de las propiedades texturales (dureza, adhesividad, resiliencia, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad) del panqué disminuyeron a medida que el contenido de almidón nativo de maíz fue mayor, por lo que se presentó una distribución de color más homogéneo. Este estudio ofrece una alternativa para la elaboración de productos reducidos en gluten debido a que el uso de almidón nativo de maíz habilita la modulación de las propiedades texturales de los panqués a base de trigo sin disminuir la viscoelasticidad del batido.

# **ABSTRACT**



## **ABSTRACT**

The effect of substituting wheat flour by native corn starch on the rheological and thermal properties of sponge cake batter formulations, and on the texture and microstructural characteristics of sponge cake were evaluated. Thermal analysis showed that starch granules underwent only incipient swelling due to the limited availability of water in the batter matrix. Increasing replacement of wheat flour by native corn starch endowed increasing order to the batter matrix, but produced a decrease in the apparent viscosity, and a drop in the storage and loss moduli. The textural characteristics of the sponge cake decreased monotonously as the native corn starch content increased, so a more homogeneous color distribution was presented. In brief, the use of native corn starch enabled the modulation of the textural properties of wheat-based breads without sacrificing dough viscoelasticity.

# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

En el mundo se elaboran diversos productos de panificación, utilizando harinas de diferentes cereales. Todos los productos de panificación poseen diferentes características físicas, de textura y sensoriales.

Los dos principales constituyentes que conforman los batidos en los productos de panificación, son los polisacáridos (almidón) y las proteínas (gluten). Estos ingredientes, además de influir en las condiciones de procesamiento, también influyen en el comportamiento viscoelástico de los batidos obtenidos, y en consecuencia en la estructura y textura del producto final. El almidón es uno de los polisacáridos que más se usa en la industria alimentaria debido a su bajo costo, gran disponibilidad y a su capacidad para impartir una gran variedad de consistencias, dependiendo del producto al cual se adiciona. En el caso de las formulaciones panarias elaboradas con harina de trigo, el almidón contenido en la misma, presenta un efecto significativo tanto en el volumen como en la estructura de la miga del pan horneado. En el caso del panqué, la estructura y el volumen del mismo dependerán de la aireación del huevo para formar un panqué estable. La lecitina y otras proteínas contenidas en el huevo (ovoalbúmina, ovomucina, conalbúmina, ovomucoide) sirven como emulsificantes en la incorporación de la grasa y los polisacáridos; durante el mezclado el batido forma una emulsión con suficiente consistencia y viscosidad para retardar la separación de los componentes, así mismo estas proteínas tienen la funcionalidad de incorporar suficiente aire para proporcionar una textura esponjosa al panqué obtenido.

# MARCO TEÓRICO

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Harina de Trigo

El grano de trigo está constituido por tres componentes; el endospermo que contiene principalmente almidón y proteínas, el germen que está compuesto principalmente de lípidos y proteínas y el salvado que contiene fibra dietética (Marquart, Jacobs Jr, McIntosh, Poutanen, & Reicks, 2008). Estos tres componentes se separan en el molino durante el proceso de refinación. A partir de este proceso, se obtiene la harina de trigo blanco y se utiliza para la elaboración de productos derivados de harina de trigo, entre ellos los productos de panificación.

Según la NOM-147-SSA1-1996 se define como harina o harina de trigo, al producto obtenido de la molienda del trigo del grano maduro, entero, quebrado, sano y seco del género *Triticum*, L; de las especies: *T. vulgare*, *T. compactum* y *T. durum* o mezclas de éstas, limpio y sano en el que se elimina gran parte del salvado y germen. El resto del material se tritura hasta obtener un grano con un tamaño de partícula pequeño.

La harina de trigo se compone principalmente de almidón (70-75%), agua (14%) y proteína (8-14%). En un sentido general las harinas son cualquier polvo fino y suave de origen vegetal. Sin embargo, sólo las harinas que contienen almidón pueden ser utilizadas como sustitutos de harina de trigo en los productos reducidos en gluten. El almidón, como mayor componente, tiene un impacto directo sobre las propiedades de la harina, empezando desde su apariencia física. Otros componentes de las harinas son proteínas, carbohidratos (no almidón), lípidos, minerales, vitaminas y enzimas que dependen altamente de su origen y método de procesamiento, y en algunos casos pueden tener un mayor efecto en las características de los sistemas de harina que el almidón en sí (Gallagher, 2008).

El proceso de molienda de la harina, podría modificar las características del almidón, una parte significativa de los gránulos (hasta 10% en el caso del trigo) que está dañado por cizallamiento mecánico (De Leyn, 2006). El tipo de molienda y tamizado es decisivo para la composición química de la harina, debido a que el contenido de almidón, y otros carbohidratos, incluyendo fibra, lípidos, proteínas, minerales y vitaminas en varias partes de las semillas de la planta no es uniforme lo que permite su separación física. Los polisacáridos (que no son almidón) se unen con el agua y afectan a la reología de las masas. Los polímeros de proteínas también afectan a la unión del agua y al comportamiento de flujo de los sistemas de harina, aunque su rol es mucho menos importante que en masas de trigo (Witczak, Ziobro, Juszczak, & Korus, 2016).

## **1.2. Almidones nativos**

El almidón es un biopolímero semi-cristalino que se almacena en distintas partes de las plantas, por ejemplo, en los granos de cereales, raíces, tubérculos, hojas, semillas, frutas y polen. Los gránulos de almidón en tejidos de almacenamiento pueden variar en forma, tamaño y composición. Este existe en entidades discretas las cuales reciben el nombre de gránulos. La composición química, estructura y propiedades también son esencialmente típicos del origen biológico del almidón (Smith, 2001). Su concentración varía de acuerdo al estado de madurez de la fuente donde son obtenidos, ya sea de frutas o granos (Zhang, Whistler, BeMiller, & Hamaker, 2005).

El tamaño, la forma y la estructura de los gránulos difieren substancialmente entre fuentes botánicas, los diámetros varían en un rango de 1  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ ; las formas pueden ser elípticas, esféricas, angulares, simples o compuestas (Singh, Singh, Kaur, Sodhi & Gill., 2003). Existe amplia diversidad en la estructura y las características del gránulo de almidón nativo, incluyendo una variación significativa entre gránulos de una misma especie. Dependiendo del origen del almidón y, de la alta susceptibilidad de los gránulos a la modificación se pueden obtener varios derivados de almidón que se utilizan a menudo en el procesamiento de alimentos

y en otras ramas de la industria. Además de la modificación directa, los sistemas de almidón nativo pueden ser modificados por la selección adecuada de los componentes, en su mayoría hidrocoloides (a menudo de origen polisacárido), que interactúan con el almidón y que proporciona propiedades de estabilización, densidad, gelificantes y emulsionantes (BeMiller, 2011).

Los almidones nativos se definen como aquellos almidones que son extraídos de fuentes vegetales. Estos se encuentran en semillas, raíces y tubérculos, así como en los tallos, las hojas, las frutas e incluso polen. Estos no presentan ninguna modificación química como la hidrólisis o cualquier otro tratamiento. Los almidones nativos regulan y estabilizan la textura de los alimentos ya que tienen propiedades tanto espesantes como gelificantes. Debido a diversas condiciones de procesos tales como pH, presión y temperatura; la estructura del almidón nativo tiene algunos inconvenientes debido a que disminuye su resistencia al cizallamiento, se descompone por efecto de la temperatura, retrogradación y sinéresis por lo que se reduce su uso en aplicaciones industriales, pero esto puede ser superado por la modificación del almidón (Hernández-Jaimes, Bello-Pérez, Vernon-Carter, & Alvarez-Ramírez, 2013).

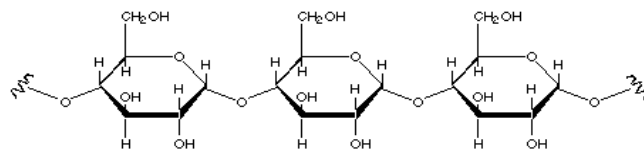
El almidón nativo en su forma granular es responsable de las propiedades físicas de algunas materias primas importantes, tales como harinas y mezclas secas utilizadas para la preparación de alimentos. En estos casos, el tamaño, la forma y superficie de los gránulos es decisiva para el tamaño medio de las partículas, el área de contacto, propiedades de flujo y de absorción, así como su susceptibilidad a los reactivos químicos y al tratamiento enzimático, incluyendo en el tracto digestivo (Crittenden, Laitila, Forsell, Mättö, Saarela, Mattila-Sandholm & Myllärinen, 2001).

Los gránulos de almidón, son cuerpos birrefringentes, es decir tienen dos índices de refracción, cuando se irradian con luz polarizada desarrollan la típica “cruz de malta”, esto se debe a que dentro del gránulo se localizan zonas cristalinas de

moléculas de amilosa ordenadas de forma paralela a través de puentes de hidrógeno, así como zonas amorfas de amilopectina, que no tienen la posibilidad de asociarse entre sí o con la amilosa. Por lo anterior, los gránulos que contienen una proporción grande de la fracción ramificada (amilopectina), no presentan birrefringencia; esta característica se pierde cuando los gránulos alcanzan la gelatinización (Vaclavik, 2002; Badui, 2013).

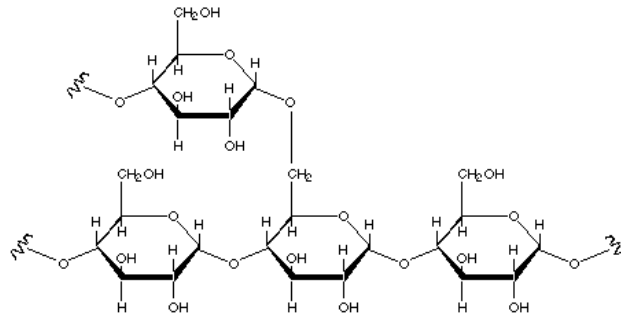
El gránulo de almidón está compuesto por capas concéntricas de dos biopolímeros de diferente estructura: la amilosa y amilopectina (Figura 1). En ambos casos, el bloque de construcción de estos biopolímeros es una  $\alpha$ -D glucopiranososa. Las cantidades relativas de estos dos polímeros y su organización física dentro de la estructura granular, le confieren propiedades fisicoquímicas y funcionales a los almidones y a los alimentos que los contienen principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización por lo que influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos (Bello-Pérez, Paredes-López, Roger, & Colonna, 1996; Huang & Rooney, 2001).

La amilosa (Figura 1a) es un polímero esencialmente lineal, aunque usualmente existe en forma de hélice, lo cual le permite formar algunas veces complejos con ácidos grasos libres, mono y di-glicéridos, alcoholes lineales y yodo. Es una cadena lineal extendida de 200 - 2500 unidades y peso molecular hasta de un millón, es decir la amilosa es una  $\alpha$ -D-(1,4)-glucana (Jacobs & Delcour, 1998; Thomas & Atwell, 1999). La amilopectina (Figura 1b) se diferencia de la amilosa debido a que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las ramas están unidas al tronco central por enlaces  $\alpha$ -D-(1,6), localizadas cada 15 - 25 unidades lineales de glucosa (Thomas & Atwell, 1999).



**a) Amilosa**





**b) Amilopectina**

**Figura 1. Estructura molecular de la amilosa y amilopectina.**

Las diferencias en la estructura de ambos polímeros dan lugar a una variación significativa en sus propiedades. La amilosa es mucho más propensa al proceso de cristalización, llamada retrogradación, y puede formar geles duros y películas fuertes, mientras que la amilopectina se dispersa en agua y se retrograda mucho más lento, lo que resulta en geles suaves y películas débiles (Pérez & Bertoft, 2010).

La estructura, composición y proporción de amilosa y amilopectina en el almidón, contribuyen notablemente en las propiedades funcionales del mismo, por esta razón ha sido estudiada ampliamente en términos de su tamaño molecular, ramificación y longitud de las cadenas internas y externas (Bello-Pérez, Agama-Acevedo, Sánchez-Hernández, & Paredes-López, 1999).

Un estudio realizado por Kihlberg, Johanson, Kohler & Risvik, (2004) demuestra que la molienda del grano de trigo presenta efectos significativos en el tamaño de distribución de las partículas de harina y en el almidón; consecuentemente esto repercute en la calidad física y sensorial del pan, mostrando un pan con una miga compacta y humedad baja.

Jaiswal & Jayaram, (2015) realizaron un estudio en donde extrajeron el almidón de una fuente botánica, en donde demuestran que las condiciones de aislamiento del

almidón y la fuente de origen, repercuten en las propiedades funcionales que tendrá el almidón extraído.

Aunque la aplicación de almidones nativos se limita principalmente a aspectos de alimentos, los gránulos y polímeros podrían ser fácilmente modificados por medios químicos, físicos y enzimáticos, lo que permite la obtención de productos con propiedades físicoquímicas y funcionales deseables (Hernández-Jaimes, Utrilla-Coello, Carrillo-Navas, García-Márquez, Meraz, Bello-Pérez, Vernon-Carter, & Alvarez-Ramirez, 2014).

### **1.2.1 Gelatinización**

La gelatinización es el término usado para describir fenómenos moleculares asociados con el calentamiento de almidón en agua, el cual cambia de una forma semi-cristalina (la cual no es digerible), a una forma eventualmente amorfa (digerible), en esta los gránulos de almidón se hinchan y retienen un máximo de agua hasta que se rompen y producen una dispersión de moléculas de amilosa y amilopectina. En la gelatinización se forma una suspensión temporal de una gran cantidad de partículas que no están disueltas en el medio, y estas partículas van a precipitar a menos que haya agitación (Tester, Debon, & Sommerville, 2000; Vaclavik, 2002; Badui, 2013).

En agua fría los gránulos de almidón son insolubles (estructura organizada de gran estabilidad) y presentan un ligero hinchamiento. En condiciones de exceso de agua y al elevar la temperatura (60 - 70°C), los puentes de hidrógeno de la región amorfa del gránulo se rompen permitiendo que el agua se asocie con los grupos hidroxilos libres y la energía térmica permite que pase agua a través de la porción amorfa de la red molecular. Esto está definido por la movilidad de las cadenas de los polímeros por encima del valor de la temperatura de transición vítrea, ocurriendo el cambio de estado vítreo a gomoso. Este cambio a su vez, facilita la movilidad molecular en las regiones amorfas, siendo un proceso reversible y permitiendo el hinchamiento del grano. El gránulo se expande al mismo tiempo

que los polímeros se hidratan. Posteriormente se produce una transición molecular irreversible, los enlaces de hidrógeno de la región cristalina se rompen (Camire, Camire & Krumhar, 1990).

Con una estructura granular completa más “perdida”, la entrada de agua se produce más fácilmente cuando continúa el calentamiento, provocando el hinchamiento rápido de los gránulos de almidón. El rango de temperatura en el que tiene lugar el hinchamiento de todos los gránulos se conoce como rango de gelatinización, y es característico de cada variedad de almidón. No sólo se produce el hinchamiento de los gránulos de almidón, sino que hay también una progresiva lixiviación de la amilosa a partir de los gránulos de almidón hinchados. La amilosa liberada de los gránulos queda en dispersión coloidal. Así, la dispersión es un sol en el que los gránulos intactos están en suspensión. Si la temperatura continúa aumentando, los gránulos implosionan en vez de estallar. La implosión continúa con una rotura gradual en fragmentos. Dado que el gránulo se rompe, libera amilosa y amilopectina dispersándose en el seno de la disolución, lo que causa un aumento de viscosidad (Tester & Morrison, 1990).

La gelatinización está influenciada por diversos factores, tales como la cantidad de agua, la temperatura, el tiempo de calentamiento, la agitación, la presencia de ácido, azúcares y grasas. Estos factores necesitan trabajar en sincronía con la finalidad de que se presente la máxima gelatinización en los almidones (Brown, 2015).

### **1.3 Batidos**

Una masa es considerada como una mezcla de ingredientes (agua, harina, levadura, sal etc.) que tiene una consistencia entre sólida y líquida. Los batidos a diferencia de las masas, son producidos al airear una mezcla líquida para formar una espuma por medio de acción mecánica, los cuales tienen la capacidad de proporcionar suficiente viscosidad al sistema, para atrapar las burbujas de aire durante el mezclado así como para retenerlas durante el procesamiento de

horneado, dando como resultado un panqué con atributos de calidad deseable como alto volumen, esponjosidad, estructura de la miga uniforme, suavidad, tolerancia al endurecimiento, etc.

Un batido es un sistema complejo de macro emulsiones en el que la grasa y el aire se dispersan mecánicamente en una fase acuosa continua de azúcar. Una emulsión es una dispersión de gotas de un líquido inmiscible dentro de otro, las cuales son conocidas como “fases”. La emulsión puede ser de aceite en agua o de agua en aceite (Gülüm, Sahin, & Turabi, 2008). El batido de panqué puede ser considerado como un complejo de emulsión de aceite-en-agua con una fase acuosa continua que contiene los ingredientes secos en suspensión (Gelinas, Roy, & Guillet, 1999).

La funcionalidad de los ingredientes en un batido tales como harina, huevo, aceite, azúcar etc., tienen efecto en las propiedades viscoelásticas y físicas (volumen, forma, porosidad, color y texturales) de los productos obtenidos, de acuerdo a las diferentes formulaciones elaboradas (Wilderjans, Luyts, Brijs, & Delcour, 2013), estas dependen de muchos factores, como los ingredientes del batido, los aditivos, las enzimas y las condiciones de procesamiento (Massey, Khare, & Niranjana, 2001).

La eliminación o reducción de gluten en batidos a base de trigo, tiene un impacto significativo en su estructura y textura. El papel de almidón en estos sistemas es siempre importante, ya que su elección y tratamiento podrían afectar significativamente las propiedades del producto final (Witczak, Juszczak, Ziobro, & Korus, 2015).

Los batidos pueden ser preparados ya sean en una fase o en multifases de mezclado (Lai & Lin, 2006). En el preparado en varias fases, se mezclan la grasa y el azúcar para producir una espuma ligera, posteriormente la harina es adicionada al final del proceso, mientras que el preparado en una sola fase todos los

ingredientes se mezclan al inicio del proceso (Wilderjans, Luyts, Brijs & Delcour, 2013).

Las propiedades físicas del batido desempeñan un papel importante en la determinación de las características de los panqués resultantes. Las propiedades más relevantes son la densidad y la reología. Los cambios en la viscosidad de la mezcla se pueden correlacionar con las variaciones en el volumen del panqué. La densidad se relaciona con la cantidad de burbujas de gas que se incorpora durante la mezcla mecánica que a su vez está relacionada con la calidad del panqué. El primer objetivo de la etapa de mezclado es la combinación de todos los ingredientes del batido de manera uniforme para formar una emulsión estable que contiene los dos ingredientes principales: grasa y agua. El segundo objetivo del mezclado es la de incorporar un gran número de burbujas de aire en el batido (Conforti, 2006).

En la producción de batidos, el mezclado desarrolla las propiedades viscoelásticas de gluten y también incorpora aire, que tiene un efecto importante en la reología y textura. Existe una relación íntima entre la mezcla, la aireación y reología: el diseño y el funcionamiento del mezclador desarrollará textura, aireación y reología en diferentes grados (Campbell & Shah, 1999); la reología afectará al tiempo y la entrada de energía necesaria para alcanzar un desarrollo óptimo (Campbell, 1995).

Es importante la retención de burbujas de aire durante las primeras etapas de la cocción, debido a que los resultados de aireación de los alimentos generan cambios en la reología del batido y pueden generar un incremento en la viscosidad del batido que ayuda a la incorporación de aire (Gómez, Oliete, García-Álvarez, Ronda, & Salazar, 2008). Las burbujas de aire incorporado se estabilizan por las proteínas del huevo adsorbidas, por lo tanto las proteínas y grasa se comportan como partículas que estabilizan la emulsión formada, así como la espuma dentro del batido (Dickinson, 2010).

Durante la mezcla del batido, las partículas de harina (en un grado limitado) impiden la coalescencia de grasa por obstrucción física o mediante el aumento de la viscosidad de la fase acuosa (Shepherd & Yoell, 1976). La capacidad de absorción de agua de las partículas de harina influye en la viscosidad del batido. El aumento de la viscosidad restringe la migración y la fusión de las partículas de grasa y las células de gas, de esa manera, contribuye a formar una emulsión y una espuma estable. Durante el mezclado del batido (así como en la elaboración de masas para pan), no se da un desarrollo completo del gluten en una estructura continua viscoelástica. Las formulaciones y procedimientos para la mezcla de batidos para panqué (por ejemplo pH, tiempo de mezcla corto y alta concentración de azúcar) contribuyen al desarrollo mínimo de gluten y proporcionan un entorno favorable para la dispersión de gluten (Donelson & Wilson, 1960). En batidos para panqués, el gluten se diluye con huevos, grasa y azúcar, por lo tanto es menos concentrado que en la masa del pan. Debido a la menor viscosidad del batido para panqué en comparación con la masa para pan, existe menos fricción y por tanto menos energía se ejerce sobre el gluten durante el mezclado (Cauvain & Young, 2006). Aunque el desarrollo de la red de gluten es limitada en el batido, las proteínas de gluten pueden ser importantes para la estructura del panqué durante el horneado (Wilderjans, Pareyt, Goesaert, Brijs, & Delcour, 2008).

El huevo es uno de los componentes que afecta las propiedades viscoelásticas, físicas del batido y del panqué resultante. Los principales componentes del huevo entero son la clara y la yema, que están separados por la membrana vitelina. En base al peso, la cáscara normalmente representa el 11% del peso, la clara y yema de huevo un total de 58% y el 31%, respectivamente (Campbell, Gu, Dewar, & Euston, 2008). Durante la mezcla, tiene que ser formada una emulsión estable. Las grandes partículas de grasas se rompen en otras más pequeñas y la reducción de la tensión interfacial en las interfases agua-aceite puede ayudar a facilitar este proceso. Algunas proteínas en la fracción livetina de yema de huevo, así como las lipoproteínas de la yema reducen la tensión interfacial. En presencia de yema de huevo, las proteínas de la clara de huevo se excluyen

competitivamente desde la interfaz aceite-agua. Por lo tanto, no contribuyen a la formación de la emulsión y estabilización (Kiosseoglou, 2004).

El azúcar (disacárido no reductor) es el más comúnmente utilizado en la fabricación de panqués. Se compone de una molécula de fructosa y una molécula de glucosa unidas por un enlace  $\alpha$ -(1,2) glucosídico. Es un ingrediente importante de los panqués con muchas funciones diferentes, además de impartir dulzor. La competencia entre las proteínas del gluten y el azúcar por agua da como resultado una falta ó una reducción en el desarrollo del gluten en el batido. Además el azúcar retrasa la gelatinización del almidón, así como la desnaturalización de las proteínas del huevo. El principal efecto de aumentar los niveles de sacarosa es un retraso notable en la temperatura de gelatinización del almidón. Esto se ha atribuido a que el azúcar limita la disponibilidad de agua de gránulos de almidón y el descenso de la actividad de agua (Wilderjans, Luyts, Brijs & Delcour, 2013).

Una de las mayores dificultades en la clasificación de los panqués, es que hay diferentes definiciones en el mundo de los mismos, así como la variación de los ingredientes funcionales según su tipo. En esencia, los panqués son productos de un batido elaborado con una mezcla de harina, azúcar, huevos, grasa o aceite. Los panqués son relativamente densos y tiene una miga suave y sabor dulce. Su contenido final de humedad varía típicamente entre 18 % y 28 % y por tanto son más bajos que los de pan, pero mayor que los de las galletas. Esto se encuentra basado principalmente en los niveles de ingredientes y en los diferentes métodos de preparación (Wilderjans, Luyts, Brijs & Delcour, 2013).

Aunque los panqués difieren en sus métodos de producción, así como en sus formulaciones, la mayoría de los batidos para panqué contienen dos sistemas que, al calentarse, se combinan para formar la estructura del material de la pared del panqué (Wilderjans, Kerckhofs, Lagrain, Brijs, Wevers, & Delcour, 2010).

### **1.3.1 Caracterización de batidos**

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia. Este campo abarca el comportamiento de flujo de fluidos complejos tales como polímeros, alimentos, sistemas biológicos, pastas, suspensiones, emulsiones y otros compuestos (Morrison, 2001). En general, para medir el comportamiento reológico, una deformación o tensión controlada bien definida se aplica a un material en un tiempo dado y se mide la respuesta a una fuerza resultante (o viceversa) para dar una cierta indicación de los parámetros del material tales como rigidez, viscosidad, dureza, resistencia o tenacidad del material.

Los objetivos generales de las mediciones reológicas son:

- Obtener una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas de los materiales.
- Obtener información relacionada con la estructura molecular y la composición del material.
- Caracterizar y simular el comportamiento del material durante el procesamiento y control de calidad.

Los principios reológicos y las teorías pueden ser utilizados como una ayuda en el control de procesos y diseño, así como una herramienta en la simulación y la predicción de la respuesta del material a flujos complejos y condiciones de deformación que se encuentran a menudo en situaciones de procesamiento prácticos, que pueden ser inaccesibles a mediciones reológicas normales. Uno de los principales objetivos de la reología es determinar diferentes propiedades de tal forma que sea reproducible, de manera que permita la comparación entre diferentes muestras, tamaños y formas de ensayo y métodos de ensayo (Dobraszczyk & Schofield, 2002; Wikström & Bohlin, 1996).

La reología puede estar relacionada con la funcionalidad del producto: muchos ensayos reológicos se han utilizado para intentar predecir la calidad definitiva del



producto, tales como el comportamiento de la mezcla y el comportamiento en el horno. Esto se basa en la ingeniería estructural del análisis de materiales, en donde se llevan a cabo mediciones de laboratorio a pequeña escala de propiedades mecánicas y estas se han extrapolado al comportamiento de grandes estructuras de ingeniería como puentes, edificios, contenedores de presión, etc. Resultando en la idea de que las pruebas controladas de laboratorio en muestras pequeñas de alimentos bien definidas pueden ser relacionadas con situaciones más grandes y complejas que se encuentran en situaciones prácticas de procesamiento (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

En pruebas reológicas, para materiales rígidos se divide la fuerza y desplazamiento por las dimensiones de la muestra original para obtener la tensión (fuerza/área original de la sección transversal). Debido a que los cambios en las dimensiones de las muestras son pequeños y uniformes con el desplazamiento; esto nos permite eliminar el tamaño de la muestra como una variable. Muchos materiales alimenticios no son rígidos y se someten a grandes deformaciones en la práctica, donde la geometría cambia a menudo de una manera no uniforme e imprevisible de manera que da tensiones y deformaciones grandes y no uniformes a lo largo de la muestra. En este caso, es necesario normalizar la prueba por el cambio real en las dimensiones durante la deformación para obtener cierto esfuerzo (fuerza/área instantánea) o deformación (desplazamiento/longitud instantánea); en el cual las dimensiones de la muestra se deben medir localmente y de forma independiente, mediante el uso de extensómetros o de técnicas sin contacto como el láser, técnicas fotográficas o de vídeo. Para los materiales que fluyen en función de las escalas de medición de tiempo normales, el esfuerzo es normalmente dividido por la velocidad de deformación (deformación/tensión) para obtener viscosidad (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Es difícil acceder a las masas, pastas o batidos durante el mezclado, laminado y horneado sin interrumpir el proceso y afectar la estructura del material. Por lo tanto, se tiene que predecir el intervalo de condiciones para los mismos, durante

un proceso determinado y luego se extrapolan los resultados a partir de medidas reológicas, realizadas en condiciones de laboratorio simples y bien definidas, por ejemplo, a través de modelos matemáticos utilizando métodos analíticos o computacionales. Las pruebas reológicas comúnmente utilizadas en cereales son: a) esfuerzos oscilatorios pequeños con deformación dinámica; b) esfuerzos pequeños y grandes de deformación y relajación; c) mediciones extensionales grandes de deformación; y d) medidas de fluidez (Scott & Richardson, 1997; Dobraszczyk, Smewing, Albertini, Maesmans, & Schofield, 2003).

El comportamiento reológico de batidos es sumamente importante en su caracterización, debido a que estos análisis permiten predecir el comportamiento que tendrán los productos durante su elaboración, así como las características de textura y suavidad de los mismos. Los ensayos reológicos tratan de medir las fuerzas requeridas para producir deformaciones controladas, como aplastando (compresión), flexión o separando (tensión), y para presentarlas de una manera tal que sea independiente de la muestra, el tamaño, la geometría, y el modo de prueba. Estos, miden propiedades bien definidas tales como el estrés, la tensión, rigidez o la viscosidad (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

#### **1.4. Horneado en productos de panificación**

El horneado es el proceso de cocción que consiste en someter un alimento a la acción de calor seco, este proceso se efectúa en un horno. Durante el horneado de panqués, el batido (emulsión aireada) se convierte en un semisólido poroso debido a la gelatinización del almidón y la coagulación de proteínas, esto causado por un incremento de temperatura, mismo que origina que la viscosidad de la mezcla disminuya, y como resultado, las burbujas de aire se mueven y se pierden del batido a un ritmo creciente (Handleman, Conn, & Lyons, 1961). Esto se debe tanto a la fusión de la grasa y a la relación inversa entre la viscosidad y la temperatura. Asimismo, al aumentar la temperatura, el batido se desproporciona y las burbujas de aire suben para mantener densos los gránulos de almidón suspendidos antes de que la gelatinización ocurra (Delcour y Hosney, 2010;

Wilderjans, Pareyt, Goesaert, Brijs, & Delcour, 2008). Ambas transiciones de fase son dependientes de las fuentes de almidón y proteínas mismas que permitirán que el panqué aumente su volumen y que se conserve durante mayor tiempo (Ronda, Oliete, Gómez, Caballero, & Pando, 2011).

El procesamiento de panqués se lleva a cabo en una serie de etapas: en la primera etapa, el gas contenido en las celdas del batido es dióxido de carbono, que existe en estado libre, se solubiliza en la fase acuosa como ácido carbónico. Cuando la mantequilla se funde (37 - 39°C), las celdas de gas en expansión se liberan en la fase acuosa y se estabilizan por las proteínas del huevo. En esta etapa, las partículas de harina todavía se encuentran suspendidas en la fase acuosa, en la que la grasa está dispersa en forma de gotas líquidas. Después de la fusión de la grasa, las celdas de gas están presentes en la fase acuosa. Estas pueden perderse fácilmente del batido debido a tres mecanismos de desestabilización, es decir, aumento de la burbuja, coalescencia y desproporción (Shepherd & Yoell, 1976).

Posteriormente, cuando la temperatura del batido alcanza 49 °C, el CO<sub>2</sub> es liberado y se expande de acuerdo con la ley de los gases ideales. La presión de vapor del agua llega a ser significativa, mientras que la expansión del batido se ve contrarrestada con la formación de costra, que se inicia cuando el batido entra al horno. Durante este tiempo hay cambios en la estructura física del batido; las burbujas de gas presentes inicialmente dan lugar a la formación de una estructura porosa (Bedolla, Dueñas, Esquivel, Favela, Guerrero, Mendoza, Navarrete, Olgúin, Ortiz, Pacheco, Quiroz, Ramírez & Trujillo, 2004).

Aproximadamente a los 60 °C, los gránulos de almidón comienzan a hincharse; este fenómeno está limitado por el contenido de humedad. Simultáneamente con la hinchazón del almidón, algunas de las proteínas de huevo se desnaturalizan y coagulan lo que también contribuye al aumento de la viscosidad del batido y le dan un aspecto sólido. A esto se le conoce como ajuste de la estructura. Se considera

que el almidón toma agua del gluten durante el horneado, ayudando a soportar la estructura del pan hasta que el gluten se desnaturaliza. La desnaturalización del gluten de trigo inicia aproximadamente a los 70 °C, cuando esta acción procede, el gluten se hace menos soluble (Bedolla, Dueñas, Esquivel, Favela, Guerrero, Mendoza, Navarrete, Olguín, Ortiz, Pacheco, Quiroz, Ramírez & Trujillo, 2004). Al alcanzar los 85°C la ovoalbúmina, proteína más abundante en la clara de huevo, y la única que contiene cuatro grupos sulfhidrilo libres, se desnaturaliza durante la cocción (Kiosseoglou & Paraskevopoulou, 2006).

La última reacción en el horneado es el oscurecimiento de la corteza; ésta alcanza temperaturas de 195°C (la de la miga no excede los 100°C), en estas condiciones se propician reacciones de oscurecimiento no enzimático (reacciones de Maillard) que son iniciadas por reacciones entre azúcares reductores y proteínas, lo que da la formación de melanoidinas, que son responsables del desarrollo del color marrón y compuestos de sabor (Oliver, Stanley, & Melton, 2006).

Los gradientes de temperatura en el batido dan como resultado el establecimiento de una estructura formada en la parte inferior del panqué, más que en la parte superior y central (Wilderjans, Kerckhofs, Lagrain, Brijs, Wevers & Delcour, 2010). Como resultado final, cuando la presión dentro de las celdas de gas cerradas aumenta, estas se rompen. En ese momento, la presión dentro de las células se reduce a la presión atmosférica en el horno. La apertura de las células se acompaña de una amplia canalización entre las células de gas, que permite el escape de aire de la estructura del panqué. La estructura es entonces una espuma sólida con conectividad celular extensa (Kiosseoglou & Paraskevopoulou, 2006). Cuando el panqué se retira del horno, se enfría y los gases se contractan o condensan, por lo que las membranas de gas deben de tener suficiente elasticidad para soportar la expansión rápida y no romperse antes que el panqué. La resistencia estructural de la miga determina si se produce colapso (Wilderjans, Luyts, Brijs & Delcour, 2013).

El volumen del panqué está influenciado por la temperatura de gelatinización del almidón, que a su vez se ve afectada por los niveles de humedad y de azúcar. La disponibilidad de agua dentro del producto determina el grado de gelatinización del almidón. Debido a que, durante la cocción, la humedad se pierde por evaporación de la superficie, los gránulos de almidón en la corteza no se gelatinizan (Wilderjans, Kerckhofs, Lagrain, Brijs, Wevers & Delcour, 2010).

Miñarro, Albanell, Aguilar, Guamis & Capellas (2012) utilizaron almidón de maíz para la elaboración de panqué en formulaciones con base de harina de legumbres (harina de garbanzo, harina de algarroba, aislado de proteína de chícharo, harina de soya), los cuales presentaron buenas características fisicoquímicas. Los batidos con harina de algarrobo y almidón de maíz mostraron buenas propiedades reológicas, pero la calidad del panqué fue baja.

Ronda, Oliete, Gómez, Caballero & Pando (2011), evaluaron el efecto de utilizar diferentes fuentes de almidón (arroz, maíz, papa y trigo) y tipos de proteínas (proteína de soya y proteína de trigo) en las propiedades reológicas de batidos, densidad del batido y el volumen del panqué. En general todos los batidos presentaron características adecuadas en el procesamiento y en consecuencia en el panqué obtenido. Los batidos formulados con almidón de arroz y proteína de soya presentaron un comportamiento reológico similar a los formulados con harina de trigo, ya que exhibieron la consistencia más alta y los módulos viscoso y elástico más altos.

#### **1.4.1 Caracterización de panqués**

La textura de un alimento es la manifestación sensorial y funcional de las propiedades estructurales, mecánicas y de superficie de los alimentos que son detectadas mediante los sentidos de visión, sonido, tacto y kinestésicos. La textura es un atributo clave de calidad utilizado en la industria de alimentos frescos y procesados para evaluar la calidad del producto y la aceptabilidad del mismo por el consumidor. Se han tratado de relacionar los análisis sensoriales con análisis

físicos tales como el análisis de perfil de textura (APT); la percepción oral de un alimento es muy diferente al de un equipo instrumental, debido a que el humano evalúa muchos aspectos simultáneamente. Dado que la percepción humana de la textura es muy subjetiva, la medición de la textura sigue siendo un ejercicio complejo y por lo tanto, presenta un desafío para los investigadores y profesionales de la industria (Rosenthal, 2010, Chen & Opara, 2013).

La prueba de análisis de perfil de textura (APT) fue creada como una prueba imitativa, que se basa en la imitación de la masticación o en el proceso de mascar con un ciclo de compresión doble; en esta se asemeja a lo que sucede en la boca humana, por lo que se ha sugerido que tal prueba debe operar a una velocidad semejante a la velocidad de la mandíbula humana (Rosenthal 1999). Se ha estudiado la velocidad a la cual mordemos y se ha estimado que la mandíbula se mueve a una velocidad de entre 33 y 66 mm/s (Tornberg, Fjelknermodig, Ruderus, Glantz, Randow & Stafford, 1985).

El análisis de perfil de textura (APT) es una prueba que mide fuerza de compresión y consiste en: se le indica al instrumento que con la punta o sensor comprima el alimento a cierta distancia (dada en mm o en porcentaje con respecto a la altura de la muestra) a una velocidad dada. La prueba se inicia cuando la punta o sensor detecta la superficie de la muestra y este será el punto de referencia. En esta operación la punta viaja hacia abajo hasta llegar a la distancia indicada inicial.

Durante este proceso, la punta de la prueba detecta la fuerza y se obtiene la curva fuerza-tiempo. La forma de la curva puede variar de la presentada como típica. Las fuerzas positivas indican la resistencia que ofrece la muestra a la penetración o compresión por parte de la punta en el proceso de bajada. Las fuerzas negativas indican la fuerza debido a la muestra que se adhiere a retirarse del sensor. Desde la salida del instrumento de la muestra, este es capaz de medir cinco

características primarias: dureza, cohesividad, adhesividad, elasticidad y fragilidad (también llamada fracturabilidad) (Bourne, 2002).

El perfil típico del análisis de perfil de textura (APT) puede evaluar una amplia gama de propiedades de textura de los alimentos frescos y procesados, tales como:

- Dureza: Es la máxima fuerza necesaria para comprimir la muestra.
- Elasticidad: Es la capacidad de la muestra para recuperar su forma original después de que la fuerza de deformación se elimina.
- Cohesividad: Medida en la que la muestra puede ser deformada antes de la ruptura.
- Adhesividad: El área total negativa entre el primer y el segundo pico.
- Gomosidad: Es la fuerza necesaria para desintegrar una muestra semisólida en un estado de equilibrio de la deglución; es la dureza  $\times$  cohesión.
- Masticabilidad: Es el trabajo necesario para masticar una muestra sólida a un estado estacionario de la deglución; es la elasticidad  $\times$  gomosidad (Jaworska & Bernas, 2010; Guiné & Barrocab, 2012).

El estudio del análisis de textura en panqué y/o productos de panificación nos permite evaluar la calidad del producto, tanto en el desarrollo como en la producción de los mismos. Young (2012), estudió la aplicación del análisis de textura en productos de panificación, al igual que Ortalan et al. (2015), estudian el endurecimiento de la miga para lo cual se le hace un análisis de textura usando un texturómetro.

# JUSTIFICACIÓN



## 2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, las enfermedades crónico-degenerativas en la población mexicana se han incrementado de forma importante. En la actualidad, se están desarrollando nuevas formulaciones en alimentos, con la finalidad de reducir el contenido de algunos ingredientes alergénicos en los mismos. El gluten contenido en las harinas destinadas para los productos de panificación es el que le proporciona las características de elasticidad y viscosidad deseada a los batidos con los cuales se elaborarán los productos de panificación. Muchos de los consumidores de los productos de panificación son alérgicos al gluten, por ello existe un gran interés en la reducción de gluten en estos productos, sin embargo las características físicas en los batidos y los productos obtenidos podrían verse afectadas.

Hasta donde se sabe, no hay trabajos que relacionen el efecto de la sustitución parcial o total de la harina de trigo por almidón nativo de maíz en formulaciones para elaborar panqué. Por lo anteriormente mencionado la caracterización de los batidos y panqués permitirá conocer las proporciones de almidón de maíz que se puede sustituir en la formulación para panqué, para obtener las características viscosas y elásticas deseadas y con la cual se pueden elaborar productos de panificación reducidos en gluten.

# HIPÓTESIS

### **3. HIPÓTESIS**

La elaboración de panqués adicionados con almidón nativo de maíz presentarán características fisicoquímicas similares a los elaborados solo con harina de trigo.

# **OBJETIVOS**

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Elaborar y caracterizar diferentes formulaciones de batidos para panqué y panqués obtenidos, adicionados con diferentes proporciones de almidón nativo de maíz.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar la formulación de los batidos para panqué con la adición de almidón nativo de maíz en diferentes proporciones.
- Evaluar las propiedades reológicas y térmicas de las diferentes formulaciones de los batidos para la elaboración de panqués.
- Determinar las condiciones de tiempo y temperatura óptimos para hornear los batidos y obtener panqués con características fisicoquímicas deseables.
- Realizar un estudio de las propiedades microestructurales, texturales y de color de la miga en las diferentes formulaciones de panqué obtenidas.

# **MATERIALES Y MÉTODOS**

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. MATERIALES

Los materiales para la preparación del batido consistieron en: harina de trigo (contenido de humedad 13.10 g / 100 g, proteína 7.39 g, fibra dietaria 0.5 g / 100 g, lípidos 0.395 g / 100 g, cenizas 0.85 g / 100 g) adquirida en la Harinera del Parayas S.A de C.V. (Guadalajara, Jalisco. México). Mantequilla, huevo fresco, azúcar, polvo para hornear Royal, leche ultra pasteurizada envasada (3.12 % de proteína, y 2.8 % de grasa total) fueron adquiridos en un supermercado en el Estado de México, México. El almidón nativo de maíz (S-4126) fue adquirido en Sigma-Aldrich (ST. Louis, MO, E.U.). El contenido de amilosa reportado por el proveedor fue  $25.03 \pm 0.62$  g / 100 g. Se utilizó agua desionizada en todos los experimentos.

### 5.2 MÉTODOS

#### 5.2.1 Preparación de los batidos

Cinco batidos fueron preparados en dos fases, usando el batido para panqué descrito por Young & Cauvain (2007): (i) Se preparó una mezcla líquida (mezcla A) mezclando leche, huevo entero fresco (previamente homogeneizado por 1 min antes de pesar) y agua desionizada, con la ayuda de un homogeneizador básico Ultra-Turrax T-50 (IKA Works, Inc., Wilmington, DE, USA), operado a 4000 rpm durante 5 min; (ii) se obtuvo una mezcla de polvos (mezcla B) al mezclar harina formado por 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 por almidón nativo de maíz/harina de trigo, azúcar y polvo para hornear, como se muestra a continuación:

**Tabla 1. Formulación de batidos.**

<b>Mezcla A</b>		<b>Mezcla B</b>	
Leche	6.16 %	Almidón Nativo de Maíz/Harina de Trigo	27.42 %
Huevo	20.56 %	Azúcar	20.56 %
Agua Desionizada	0.82 %	Polvo para Hornear	0.52 %

(iii) Se mezclaron: la totalidad de las mezclas B, 23.96% de mantequilla, y 50% de la mezcla A en un recipiente con un mezclador de espiral (Taurus, México) operado a 10000 rpm durante 10 min a temperatura ambiente; y (iv) el otro 50% de la mezcla A se incorporó y se mezcló durante 3 min a 10000 rpm. Los batidos resultantes se codificaron como B<sub>0</sub>, B<sub>25</sub>, B<sub>50</sub>, B<sub>75</sub>, y, B<sub>100</sub>, el subíndice se refiere al contenido de almidón nativo de maíz.

### **5.2.2. Caracterización térmica de los batidos**

Las propiedades térmicas fueron analizadas utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC) (TA Instruments, Q1000, New Castle, DE, E.U.) previamente calibrado con Indio. Las muestras de batido ( $15.0 \pm 1$  mg) fueron colocadas en charolas de aluminio cerradas herméticamente y fueron calentadas en un intervalo de temperatura de 25 a 100 °C a una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Se utilizó una charola de aluminio vacía como referencia. Las temperaturas ( $T_i$ ,  $T_m$ ,  $T_f$ ) y entalpías ( $\Delta H$ ) se determinaron con el uso del software del equipo (Universal Analysis 2000, New Castle, DE, E.U.). Los valores de entalpía se expresaron como J/g almidón.

### **5.2.3. Propiedades reológicas de los batidos**

Se llevaron a cabo mediciones oscilatorias y de flujo utilizando un Reómetro Physica MCR 300 (Physica Meßtechnik GmbH, Stuttgart, Alemania), con una geometría cono-plato, en la que el cono de rotación es de 50 mm de diámetro, y el ángulo de cono de 2° utilizando un gap de 0.05 mm. Aproximadamente 1.25 mL de muestra se colocó cuidadosamente en el sistema de medición, y se dejó reposar durante 5 min a 25 °C para asegurar la recuperación de la estructura. Los bordes de las muestras fueron cubiertos con aceite para reducir la evaporación de agua. El control de la temperatura se consiguió con el sistema de medición Physica TEK 150P. Las curvas de flujo se obtuvieron al variar la velocidad de cizalla en el intervalo de 0.00001 a 1000 s<sup>-1</sup>. Los barridos de amplitud se llevaron a cabo en el rango de 0.001-1000% a 1 rad s<sup>-1</sup>. El módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y el módulo de pérdida ( $G''$ ) se obtuvieron con el software del equipo (US200/32 V2.50) Para



las velocidades de cizalla en el rango de 0.1 a 10 s<sup>-1</sup>, los datos experimentales fueron descritos por:  $n_{ap} = K\dot{\gamma}^{n-1}$ , donde  $n_{ap}$  es la viscosidad aparente (Pa s),  $K$  es el coeficiente de viscosidad Pa s<sup>n</sup>,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de cizalla (s<sup>-1</sup>) y  $n$  es el índice de comportamiento de flujo.

#### **5.2.4. Horneado de los batidos**

Las formulaciones de los batidos (100 g) se pusieron en recipientes metálicos cuyas paredes interiores fueron untadas con una capa delgada de aceite vegetal y harina de trigo (relación 4:1), con el fin de evitar la adhesión del batido. Los recipientes metálicos se metieron en un horno de convección estática precalentado, y las formulaciones de batido se hornearon a 180 °C durante 30 min a un contenido de humedad del 20 %. Los recipientes metálicos se retiraron del horno y se dejaron enfriar por 30 minutos hasta que se alcanzó una temperatura cálida. Las formulaciones de panqué se retiraron de los recipientes y se dejaron enfriar hasta llegar a temperatura ambiente y se colocaron en bolsas de plástico a prueba de agua, hasta el momento del análisis. Las condiciones de almacenamiento fueron en refrigeración estándar (4 °C con una humedad relativa de 25 %).

#### **5.2.5. Microestructura de los panqués**

Las muestras fueron montadas en pequeños barriles de aluminio utilizando cinta adhesiva de doble cara de carbono y se observaron utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6510LV (Akishima, Japón) a un voltaje de aceleración de 15kV. Las muestras fueron recubiertas con aproximadamente 20 nm de oro usando un equipo Denton Vacuum DESK IV. Se obtuvieron micrografías con aumentos de 500x y 2000x.

#### **5.2.6 Análisis de color de los panqués**

El color de la corteza de las formulaciones de panqué se analizó mediante un colorímetro Hunter Lab Modelo 45/0L (Hunter Associates Lab., Indiana, E.U.). Los parámetros de color L\*, a\* y b\* son medidas de luminosidad, rojo/verde y

amarillo/azul, respectivamente. Con este fin, el instrumento fue calibrado con un blanco ( $L^* = 97.63$ ,  $a^* = 0.78$  y  $b^* = 0.25$ ). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

### **5.2.7. Análisis de textura de los panqués**

Se realizó un análisis de perfil de textura (APT) usando un texturómetro (Brookfield, CT3-4500, Massachusetts, E.U.) equipado con una sonda cilíndrica (TA25/1000,  $D = 50.8$  mm,  $L = 20$  mm). Los panqués se comprimieron hasta 40% de su altura original. Los análisis de la textura se realizaron 3 h después del horneado.

Se aplicaron dos ciclos utilizando una carga de disparo de 10 g y una velocidad de ensayo de 1 mm/s. Los siguientes parámetros se cuantificaron y se definen como (Trinh & Glasgow, 2012): elasticidad (altura que la muestra recupera durante el tiempo que transcurre entre el final del primer ciclo y el inicio del segundo ciclo), adhesividad (área de fuerza negativa para el primer ciclo, lo que representa el trabajo necesario para tirar del émbolo de compresión lejos de la muestra), cohesividad (relación del área de fuerza positiva durante la segunda compresión que se da durante la primera compresión), dureza (la fuerza máxima absoluta en la primera compresión), resiliencia (relación entre las áreas bajo las curvas de compresión y descompresión) y la masticabilidad (dureza x cohesividad x elasticidad). Estos parámetros fueron obtenidos al analizar las curvas obtenidas por el software del equipo.

### **5.2.8. Análisis estadístico**

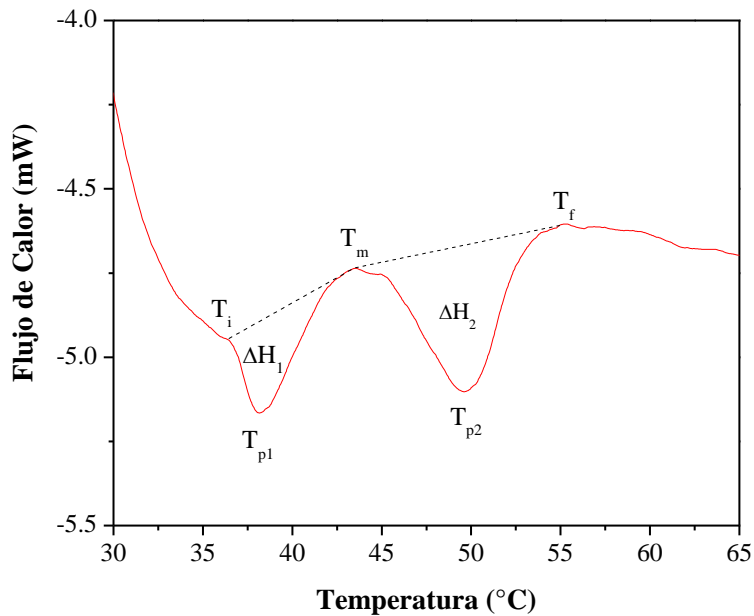
Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey para una significación estadística de  $P \leq 0.05$ , utilizando el software estadístico SPSS 19.0. Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Caracterización térmica de los batidos

La Figura 2 presenta una curva DSC típica de un batido, donde se pueden observar dos picos característicos.



**Figura 2. Termograma del batido formulado con 100% harina de trigo.**

Los dos picos endotérmicos se encuentran entre 37 °C y 62 °C. El pico de menor temperatura se encuentra alrededor de 37 - 39 °C, y puede ser atribuido a la fusión de las fracciones de la mantequilla. Se determinó la temperatura de fusión de la mantequilla (34 - 36 °C) que se utilizó para las formulaciones de batido con mediciones de DSC de acuerdo con los estudios de Nassu & Guaraldo-Goncalves (1999). La temperatura del primer pico presentó un ligero aumento en función del aumento del almidón nativo de maíz contenido en las formulaciones del batido. La formulación de batido elaborado solamente con harina de trigo ( $B_0$ ) presentó una temperatura máxima de 36.7 °C y aumentó a 38.6 °C, cuando fue sustituido totalmente por almidón nativo de maíz ( $B_{100}$ ). El aumento de la temperatura del primer pico sugiere que el almidón nativo de maíz promueve la interacción entre

las moléculas de almidón y los lípidos (Pareyt, Finnie, Putseys & Delcour, 2011). Se ha sugerido que durante el mezclado del batido y el horneado, las partículas de harina (por ejemplo, gránulos de almidón) se hidratan y se rompen para formar una microestructura empacada (Delcour & Hosney, 2010). El incremento de la temperatura de fusión de 1.7 J/g a 4.6 J/g (63.04 %) cuando la harina de trigo fue completamente sustituida por almidón nativo de maíz, indica una mejor interacción de los gránulos de almidón con los otros componentes del batido, incluyendo los lípidos de la mantequilla y proteínas de huevo (Cauvain, 2015). La temperatura del segundo pico se encuentra alrededor de los 50.0 °C y puede estar relacionado con el hinchamiento incipiente de los gránulos de almidón en un contenido de humedad limitada (menos de 50 %). Este pico endotérmico se ha atribuido a una fusión cooperativa de los gránulos de almidón mediada por el agua (Chevallier, Colonna, Della Valle & Lourdin, 2000).

Los valores de temperatura máxima se muestran en la Tabla 2 y concuerdan con los reportados en la literatura (Singh, Singh, Kaur, Sodhi & Gill, 2003).

**Tabla 2. Parámetros térmicos de los batidos.**

Muestra	Gelatinización de almidón						
	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>p1</sub> (°C)	ΔH <sub>1</sub> (J/g)	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>p2</sub> (°C)	ΔH <sub>2</sub> (J/g)	T <sub>f</sub> (°C)
B <sub>0</sub>	36.72 ± 0.92	38.60 ± 0.77	1.70 ± 0.03	44.07 ± 1.10	49.94 ± 0.89	7.69 ± 0.27	54.19 ± 2.17
B <sub>25</sub>	37.25 ± 0.75	38.96 ± 0.70	2.53 ± 0.05	44.32 ± 1.64	50.72 ± 1.13	8.50 ± 0.26	55.64 ± 1.39
B <sub>50</sub>	37.82 ± 1.13	39.76 ± 0.99	3.13 ± 0.06	44.81 ± 1.34	50.82 ± 1.98	9.23 ± 0.18	56.35 ± 1.69
B <sub>75</sub>	38.04 ± 0.57	39.90 ± 1.20	3.98 ± 0.09	45.25 ± 1.23	50.86 ± 1.27	9.82 ± 0.23	59.67 ± 2.09
B <sub>100</sub>	38.55 ± 0.69	40.14 ± 0.88	4.60 ± 0.07	45.28 ± 1.08	51.33 ± 2.05	10.57 ± 0.30	62.21 ± 1.25

T<sub>i</sub>, temperatura de inicio; T<sub>p</sub>, temperatura de pico; T<sub>m</sub>, temperatura a la mitad; T<sub>f</sub>, temperatura final; ΔH, entalpía. Los valores de la media ± la desviación estándar, se realizaron por triplicado. Los superíndices con diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas (P ≤ 0.05).

Estos valores se relacionan con una menor disponibilidad de agua y con cambios en la naturaleza del medio. En estas condiciones, los gránulos de almidón son incapaces de someterse a un proceso de gelatinización completa, que sólo lleva a la hinchazón parcial de los gránulos de almidón (Day, Fayet, & Homer, 2013). La

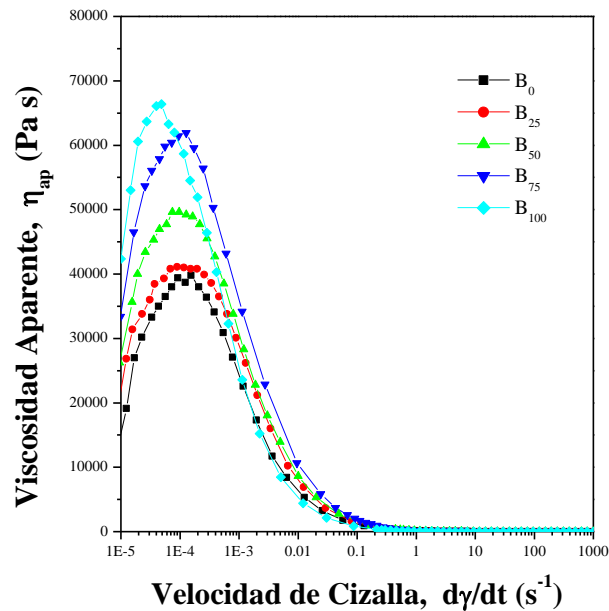
temperatura final para el segundo pico endotérmico aumentó de 54.2 °C para (B<sub>0</sub>) a 62.2 °C para (B<sub>100</sub>), demostrando el postulado de que el almidón nativo de maíz promueve la interacción entre los gránulos de almidón y los componentes del batido. La entalpía asociada al segundo pico endotérmico mostró un aumento de 7.7 J/g a 10.6 J/g (27.36 %) cuando la harina de trigo fue completamente sustituida por el almidón nativo de maíz. Los valores de entalpía para el segundo pico fueron más bajos que las entalpías de gelatinización reportados en la literatura, ya sea para la harina de trigo o almidón nativo de maíz (alrededor de 15-18 J/g), lo que indica una gelatinización incompleta de los gránulos de almidón. La presencia de hidrocoloides dentro de la matriz del batido puede reducir el valor de la entalpía cuando la disponibilidad de agua es limitada (Tester & Somerville, 2003). El almidón parcialmente gelatinizado da como resultado una estructura amorfa en el pan final (Primo-Martin, Van de Pijpekamp, Van Vliet, De Jongh, Plijter & Hamer, 2006).

Los resultados anteriores indican que la incorporación de almidón nativo de maíz dentro de la matriz del batido promueve interacciones con otros componentes (lípidos y proteínas) a través de enlaces de hidrógeno y electrostáticos (Angioloni & Collar, 2011) y un aumento en el orden de la microestructura del batido (Cauvain, 2015). El patrón endotérmico a temperaturas más altas surgió debido a un aumento de la movilidad de los lípidos, las proteínas y los gránulos de almidón dentro de la matriz del batido debido a efectos térmicos, lo que lleva a la homogeneización de la microestructura. Además, las transformaciones químicas pudieron haber estado involucradas, tales como la formación de complejos lípido-proteína, plegamiento y desplegamiento de proteínas, entre otros (Angioloni & Cuello, 2011; Collar, Martínez, & Rosell, 2001).

## **6.2. Propiedades reológicas de los batidos**

### **6.2.1. Viscosidad aparente de los batidos**

La Figura 3 presenta la dependencia de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de las formulaciones para batidos.



**Figura 3. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla de los batidos.**

El comportamiento reoespesante fue exhibido a bajos valores de velocidad de cizalla (hasta  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), probablemente causado por un acomodamiento compacto de los sólidos (por ejemplo, racimos de partículas) dentro de la matriz del batido (Wagner & Brady, 2009). A medida que el contenido de almidón nativo de maíz en las formulaciones de batido aumentó, se logró un valor máximo en la viscosidad aparente. En valores de velocidad de cizalla altos, la viscosidad aparente fue disminuyendo progresivamente a medida que el contenido de almidón nativo de maíz aumentó. Este cambio en el comportamiento de la viscosidad aparente puede atribuirse a la alineación de los gránulos de almidón en la dirección del flujo a medida que la velocidad de cizalla aumentó (Won & Kim, 2004). Teniendo en cuenta la expresión de ley de potencia, todas las muestras se caracterizaron por valores similares del índice de comportamiento de flujo con  $n = 0.12 \pm 0.002$ , (es decir, las diferencias estadísticas no son significativas) lo que refleja que en la región de reoadelgazamiento, hay un deterioro relativamente rápido de la viscosidad aparente que se produjo con la velocidad de cizalla. Es interesante observar que los valores de  $n$  fueron ligeramente inferiores a los reportados para

la masa añadida con almidón resistente (Korus, Witczak, Ziobro, & Juszcak, 2009), semillas de frutas desgrasadas (Korus et al., 2012) y con inulina (Juszcak et al., 2012).

### 6.2.2. Viscoelasticidad de los batidos.

Las Figuras 4a y 4b presentan el barrido de deformación de las formulaciones de los batidos.

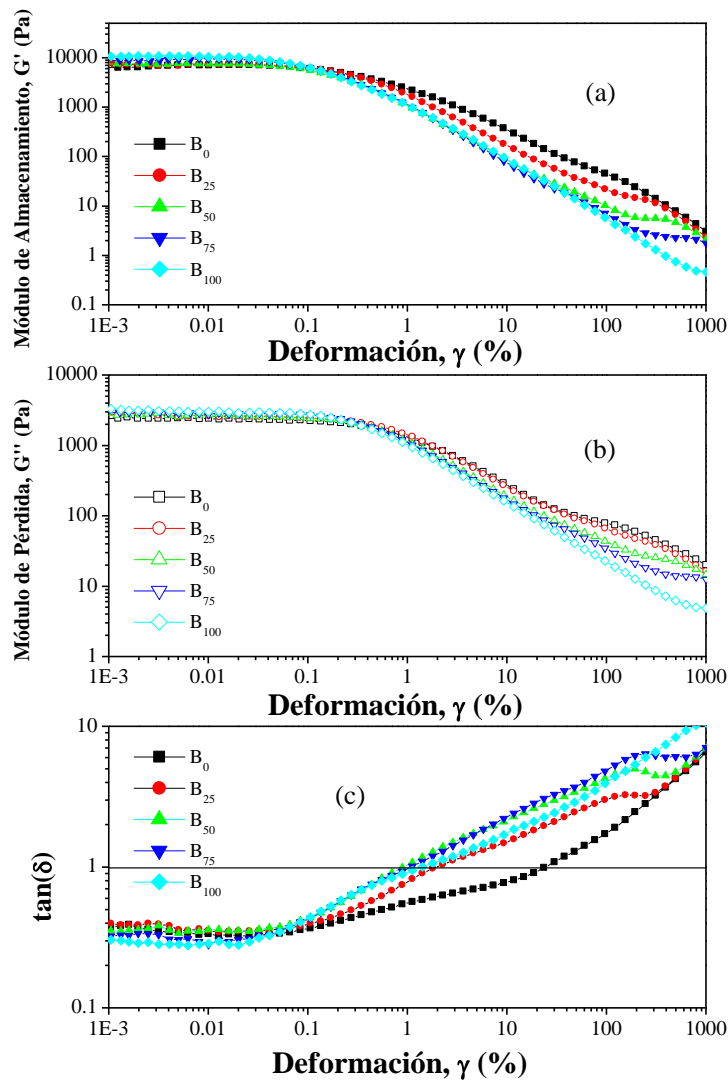


Figura 4. Barridos de deformación de los batidos: (a) Módulo elástico, (b) Módulo viscoso y (c) Ángulo de pérdida.

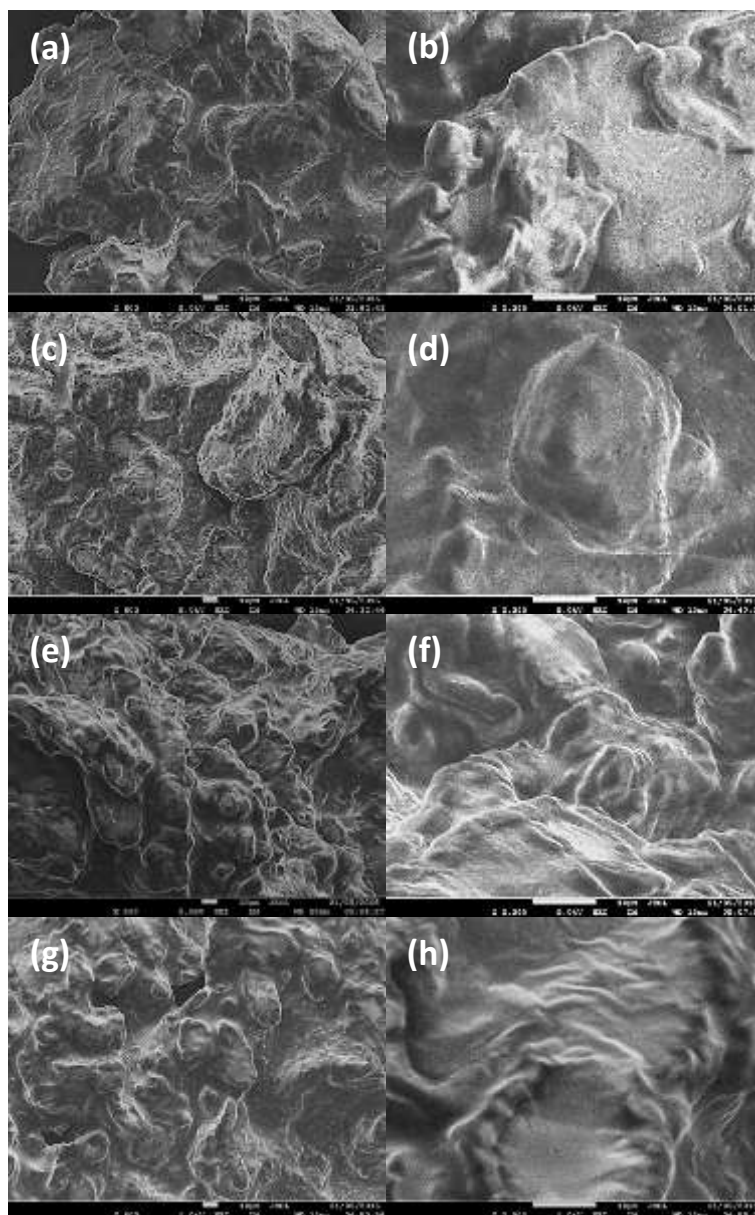


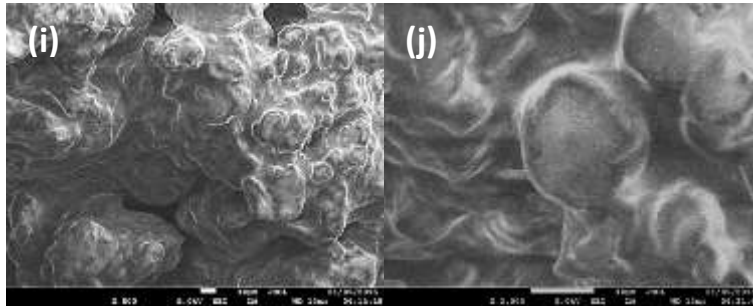
Los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) se encontraron en un valor muy cercano en la región viscoelástica lineal para todas las formulaciones de los batidos, que se extendió a valores de deformación de hasta 0.06% para ( $G'$ ) y de 1.2% para ( $G''$ ). Sin embargo, la incorporación de almidón nativo de maíz llevó a un decaimiento más rápido de ambos módulos para valores de deformación más altos. Cuanto mayor fue el contenido de almidón nativo de maíz, los módulos decayeron a tasas más rápidas. Esto significa que la sustitución de la harina de trigo por almidón nativo de maíz produjo un batido más frágil. El gluten juega un papel importante en la estructuración de la red 3D del batido. De esta manera, la reducción del contenido de gluten podría dar lugar a redes 3D más frágiles ya que se pierden los enlaces inducidos por el gluten. En la Figura 4c se presenta el ángulo de pérdida ( $\tan(\delta) = G''/G'$ ) en función de la deformación. Los valores de  $\tan(\delta) < 1$  reflejan un comportamiento de tipo sólido, mientras que los valores  $\tan(\delta) > 1$  denotan un comportamiento de tipo líquido. Para la formulación del batido que contiene sólo la harina de trigo ( $B_0$ ) el cambio de sólido-líquido a líquido fue localizado aproximadamente a 25% de deformación. Sin embargo, este valor se redujo drásticamente entre 1 a 2.5% para las formulaciones de los batidos que contenían almidón nativo de maíz. Puesto que el gluten es la proteína básica para la formación de estructuras, su reducción conduce a formulaciones de batidos con una mayor tendencia a fluir, lo que sugiere la formación de microestructuras 3D frágiles (Mariotti, Iametti, Cappa, Rasmussen, & Lucisano, 2011).

### **6.3. Microestructura de los panqués**

La Figura 5 presenta las imágenes de Microscopia Electrónica de Barrido de los panqués obtenidos a partir de la cocción de los batidos. Los paneles izquierdo y derecho corresponden a los aumentos de 500x y 2000x, respectivamente. El panqué hecho con el batido que contiene sólo la harina de trigo ( $B_0$ ) exhibió una distribución irregular de sólidos correspondientes a los gránulos de almidón de trigo y restos de ellos resultantes del proceso de molienda (Figura 5a y 5b). Estos sólidos están cubiertos por los productos de cocción del batido, que consisten en lípidos, proteínas y amilosa/amilopectina. Estos componentes pueden conducir a

interacciones para formar complejos, incluyendo complejos lípido-amilosa (Thachil, Chouksey, & Gudipati, 2014; Gerits, Pareyt, & Delcour, 2014), y complejos lípido-proteína (Pomeranz & Chung, 1978). La incorporación de almidón nativo de maíz produjo una microestructura granular, la cual se puede observar fácilmente en las imágenes. Dada la limitada disponibilidad de agua, los gránulos de almidón se sometieron solamente a una hinchazón incipiente y, por tanto, la integridad del gránulo se mantuvo después de la cocción. Las Figuras 5h y 5j muestran gránulos de almidón nativo de maíz cubiertos por los productos obtenidos en la cocción.



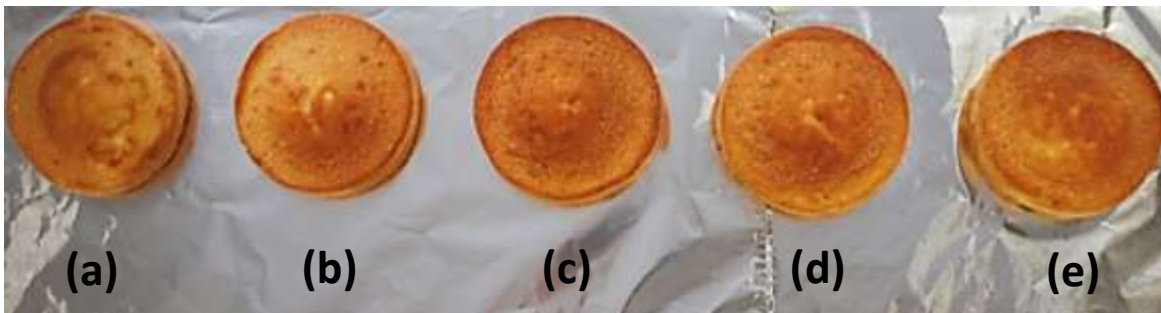


**Figura 5. Micrografías de los panqués: (a), (b) B<sub>0</sub>, (c), (d) B<sub>25</sub>, (e), (f) B<sub>50</sub>, (g), (h) B<sub>75</sub> y (i), (j) B<sub>100</sub>.**

A su vez, la microestructura de las formulaciones de panqué que contienen mayor cantidad de almidón nativo de maíz fue más ordenada y esto fue reflejado en las entalpías de las formulaciones de batido correspondientes (Tabla 1).

#### **6.4. Análisis de color de los panqués**

Las características fisicoquímicas (humedad, pH, azúcar reductor, y microestructura) del batido, son características determinantes para el color de los panqués (Esteller & Lannes, 2008). La Figura 6 muestra la apariencia de la corteza de las formulaciones de panqué.



**Figura 6. Apariencia de la corteza de los panqués: (a) B<sub>0</sub>, (b) B<sub>25</sub>, (c) B<sub>50</sub>, (d) B<sub>75</sub> y (e) B<sub>100</sub>.**

El color de la corteza de B<sub>0</sub> no fue homogéneo, presentando regiones de amarillo a café. La adición de almidón nativo de maíz en el panqué dio como resultado una distribución de color más homogéneo. Las ranuras en la corteza determinaron el

contenido de almidón no gelatinizado y por tanto la homogeneidad superficial de la corteza del pan (Della Valle, Chiron, Jury, Raitière, & Réguerre, 2012). Además, el color café causado por las reacciones de Maillard entre las proteínas y azúcares, fue influenciado por la distribución y la disponibilidad de agua en la matriz del batido (Vanin, Lucas, & Trystram, 2009). La distribución homogénea de color en la corteza sugiere que la adición de gránulos de almidón nativo de maíz indujera una microestructura del batido más homogénea y ordenada, que concuerda con el análisis térmico que se describe en la Tabla 1. También es evidente que los componentes del batido tuvieron una mayor movilidad para un menor contenido de almidón nativo de maíz, lo que causó la agregación no homogénea de la humedad en la superficie del panqué.

De acuerdo con la parametrización estándar del Hunter Lab,  $a^*$  que va desde -120 a la 120 toma valores positivos para los colores rojizos y valores negativos para los verdosos. Por otro lado,  $b^*$  con valores en el rango de -120 a 120 toma valores positivos para los colores amarillentos y valores negativos para los azulados. Además,  $L^*$  con valores que van de 0 a 100 es una medida aproximada de la luminosidad, que es la propiedad que asigna un color a un equivalente de la escala de grises (Pathare, Opara, & Al-Said, 2013). En la Tabla 2 se presentan los parámetros de color de los panqués.

**Tabla 3. Parámetros de color de los panqués.**

<b>Muestra</b>	<b>L*</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>
B <sub>0</sub>	61.04 ± 1.2 <sup>a</sup>	9.92 ± 0.7 <sup>a</sup>	26.43 ± 1.2 <sup>a</sup>
B <sub>25</sub>	58.12 ± 0.9 <sup>b</sup>	10.36 ± 0.8 <sup>b</sup>	25.56 ± 1.1 <sup>b</sup>
B <sub>50</sub>	55.27 ± 1.1 <sup>c</sup>	11.60 ± 0.7 <sup>b</sup>	22.88 ± 0.9 <sup>b</sup>
B <sub>75</sub>	54.21 ± 1.2 <sup>c</sup>	11.42 ± 0.9 <sup>b</sup>	22.12 ± 1.0 <sup>b</sup>
B <sub>100</sub>	54.34 ± 1.1 <sup>c</sup>	11.73 ± 0.7 <sup>b</sup>	22.24 ± 0.9 <sup>b</sup>

Los valores de la media ± la desviación estándar, se realizaron por triplicado. Los superíndices con diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

La luminosidad disminuyó cuando se aumentó el contenido de almidón nativo de maíz. El color rojizo, que se refleja en los valores de  $a^*$  mostró un ligero aumento a medida que el almidón nativo de maíz fue incrementado. En contraste, el color amarillento que se refleja por los valores de  $b^*$  disminuyó a medida que se incorporó mayor cantidad de almidón nativo de maíz. A medida que se incorporó mayor cantidad de almidón nativo de maíz, existió una mayor disponibilidad de carbohidratos, promoviendo el aumento de las reacciones de Maillard y por lo tanto, la disminución de los colores amarillentos. No se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en los parámetros de color para los panqués con contenidos de almidón nativo de maíz de 50% y más altos.

### 6.5. Análisis de textura de los panqués.

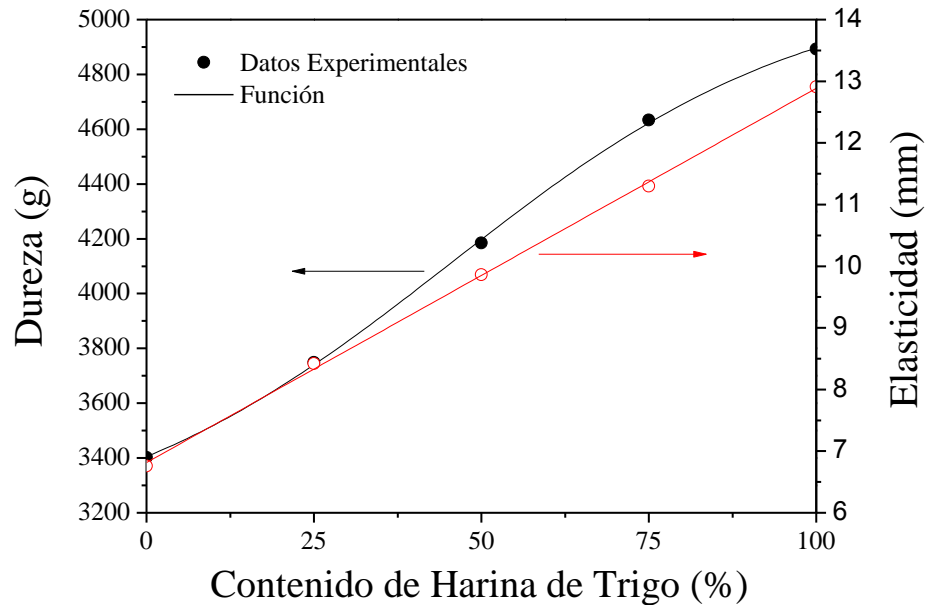
La Tabla 4 resume las propiedades texturales de los panqués. Sorpresivamente, todas las propiedades disminuyeron, cuando el contenido de almidón nativo de maíz incrementó, encontrando diferencias significativas. Como ya se ha observado en las imágenes de Microscopia Electrónica de barrido de la Figura 5, lo anterior indica que la incorporación de almidón nativo de maíz tuvo efectos importantes en la microestructura de los panqués. Por ejemplo, la dureza cambió de 4893.5 g para  $B_0$  a 3402.5 g para  $B_{100}$ . El efecto de los gránulos de almidón nativo de maíz también fue relevante para la cohesividad, que disminuyó de 0.56 a 0.23. La microestructura de los panqués que contienen gránulos de almidón nativo de maíz fue menos compacta en comparación con los de harina de trigo puro ( $B_0$ ).

**Tabla 4. Parámetros de textura de los panqués.**

Muestra	Dureza (g)	Adhesividad (mJ)	Resiliencia	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Masticabilidad (mJ)
$B_0$	4893.50 ± 97.87 <sup>e</sup>	0.92 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.19 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>e</sup>	12.91 ± 0.32 <sup>e</sup>	319.72 ± 4.80 <sup>e</sup>
$B_{25}$	4633.50 ± 78.76 <sup>d</sup>	0.75 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>b,c</sup>	0.45 ± 0.02 <sup>d</sup>	11.30 ± 0.35 <sup>d</sup>	228.68 ± 5.72 <sup>d</sup>
$B_{50}$	4185.00 ± 75.33 <sup>c</sup>	0.60 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>a,b</sup>	0.37 ± 0.02 <sup>c</sup>	9.86 ± 0.20 <sup>c</sup>	150.30 ± 3.01 <sup>c</sup>
$B_{75}$	3749.00 ± 82.48 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>b</sup>	8.42 ± 0.25 <sup>b</sup>	99.92 ± 2.80 <sup>b</sup>
$B_{100}$	3402.50 ± 95.27 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.01 <sup>a</sup>	6.73 ± 0.16 <sup>a</sup>	78.61 ± 1.97 <sup>a</sup>

Los valores de la media ± la desviación estándar, se realizaron por triplicado. Los superíndices con diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

Las características texturales para los panqués que solamente contenían harina de trigo (B<sub>0</sub>), presentaron un incremento en comparación con las otras formulaciones, como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Comportamiento de las propiedades texturales típicas en función del contenido de harina de trigo.**

Las características texturales pueden mostrar ya sea un comportamiento lineal (por elasticidad) o un patrón sigmoideo (para dureza). Este patrón sugiere que las características de textura pueden ser descritas por una función sigmoidea de la siguiente forma:

$$PT = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp[(X - X_0)/dx]} \quad (1)$$

donde  $PT$  denota una característica de textura y  $X$  es el contenido de harina de trigo (%).  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $X_0$  y  $dx$ , son parámetros de ajuste.

La Tabla 4 resume los parámetros estimados (StatSoft Inc, E.U.) de las propiedades texturales de los panqués.

**Tabla 5. Parámetros de ajuste a la ecuación sigmoidea de los datos experimentales.**

<b>Característica de Textura</b>	<b>A<sub>1</sub></b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>X<sub>0</sub> (%)</b>	<b>dx (%)</b>
Dureza	3086.32	5141.06	45.64	27.00
Adhesividad	0.18	150.22	637.65	101.25
Resiliencia	0.08	0.28	89.16	53.65
Cohesividad	-0.17	30.28	735.39	171.09
Elasticidad	-243.49	81.16	-1107.26	912.69
Masticabilidad	62.14	451.64	82.52	26.16

Los valores de la media  $\pm$  la desviación estándar, se realizaron por triplicado. Los superíndices con diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

Para valores grandes del parámetro  $dx$ , la función sigmoidea estuvo cerca de un comportamiento lineal. De esta manera, cuanto mayor sea el valor de  $dx$ , más probable es que el comportamiento sea lineal. Los parámetros de elasticidad, cohesividad y adhesividad exhibieron los valores más altos del parámetro  $dx$ , lo que indica que la fluctuación de estas características de textura siguió un comportamiento lineal similar.

En contraste, la masticabilidad, resiliencia y dureza muestran los valores más pequeños, que reflejan un comportamiento sigmoideo de estas características. A su vez, el comportamiento sigmoideo sugirió que los gránulos de almidón nativo de maíz actuaron no sólo como material de relleno del batido cocido, sino también como ingredientes activos que interactúan con los otros componentes del batido (por ejemplo, lípidos y proteínas).

# **CONCLUSIONES**



## 7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que la sustitución parcial o total de la harina de trigo por almidón nativo de maíz modifica significativamente las propiedades térmicas y reológicas del batido y la textura y la microestructura de los panqués obtenidos a partir de ellos. Las propiedades modificadas incluyen una mayor viscosidad en estado estacionario y una mayor tendencia a fluir a medida que aumenta la velocidad de cizalla. El análisis térmico reveló una gelatinización incipiente de los gránulos de almidón nativo de maíz como resultado de la disponibilidad de agua limitada dentro de la matriz del batido. De esta manera, el batido puede ser visto como un gel débil relleno dado por la harina de trigo y/o gránulos de almidón nativo de maíz. La adición de almidón nativo de maíz produjo una microestructura más ordenada del batido, que se refleja por el aumento de la entalpía de gelatinización. La consolidación de la microestructura del batido por gránulos de almidón nativo de maíz llevó a la disminución de las propiedades viscoelásticas (módulos de almacenamiento y pérdida).

La interacción entre las moléculas de almidón y lípidos/proteínas parecen ser un factor importante en la modificación del comportamiento reológico y térmico en los batidos. La hinchazón limitada de los gránulos de almidón nativo de maíz dio como resultado una menor hidratación de la microestructura formando hidrocoloides, y por tanto un batido débil. Este efecto también se reflejó en el análisis textural de los panqués, que mostraron que las características de textura disminuyeron a medida que el contenido de almidón nativo de maíz aumentó. De esta manera, además de la reducción de gluten, la incorporación de almidón nativo de maíz cambia las propiedades de textura de los panqués obtenidos a partir del horneado de dicho batido. La adición de almidón nativo de maíz en la formulación para panqué aporta características reológicas y de textura similares al control. Por lo tanto, es viable la sustitución de harina de trigo por almidón nativo de maíz en una formulación para panqué como alternativa para elaborar productos bajos o sin presencia de gluten.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Angioloni, A., & Collar, C. (2011). Significance of lipid binding on the functional and nutritional profiles of single and multigrain matrices. *European Food Research and Technology*, 233, 141-150.

Badui Dergal, S. (2013). *Química de los alimentos*. Pearson: México.

Bedolla B. S., Dueñas G. C., Esquivel I. I., Favela T. T., Guerrero H. R., Mendoza M. E., Navarrete L. A., Olguín M. L., Ortiz G. J., Pacheco P. O., Quiroz B. M., Ramírez S.A. & Trujillo C. M. (2004). *Introducción a la Tecnología de Alimentos*. 2ª edición. Limusa: México.

Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sánchez-Hernández, L., & Paredes-López, O. (1999). Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(3), 854-857.

Bello-Pérez, L. A., Paredes-López, O., Roger, P., & Colonna, P. (1996). Amylopectin—properties and fine structure. *Food Chemistry*, 56(2), 171-176.

BeMiller, J. N., (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86 (2), 386-423.

Bourne, Malcolm C.. (2002). *Food Texture and Viscosity - Concept and Measurement* (2nd Edition). Elsevier. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFTVCME06/food-texture-viscosity/food-texture-viscosity>

Brown, A. (2014). *Understanding Food: Principles and preparation*. Nelson Education: USA.

Camire, M. E., Camire, A., & Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 29(1), 35-57.

Campbell, L. J., Gu, X., Dewar, S. J., & Euston, S. R. (2008). Effects of heat treatment and glucono-D-lactone-induced acidification on characteristics of soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 23(2), 344-351.

Campbell, G. M. (1995). New mixing technology for the food industry. *Food Technology International Europe*, 119-122.

Campbell, G. M., Shah, P. (1999). Entrainment and disentrainment of air during bread dough mixing, and their effect on scale-up of dough mixers. In: Campbell, G. M., Webb, C., Pandiella, S. S., Niranjana, K. (Eds.), *Bubbles in Food*, American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA.

Cauvain, S. (2015). Principles of dough formation. In *Technology of breadmaking*. Springer International Publishing: USA.

Cauvain, S. P., & Young, L. (2006). Baked products: Science, technology and practice. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Chen L. & Opara U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food Research International*, 51(2), 823-835.

Conforti, F. D. (2006). Cake manufacture. In Y. H. Hui, H. Corke, I. De Leyn, W. Nip, & N. Cross (Eds.), *Bakery products: Science and technology* (pp. 393-409). Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Chevallier, S., Colonna, P., Della Valle, G., & Lourdin, D. (2000). Contribution of major ingredients during baking of biscuit dough systems. *Journal of Cereal Science*, 31, 241-252.

Collar, C., Martínez, J. C., & Rosell, C. M. (2001). Lipid binding of fresh and stored formulated wheat breads. Relationships with dough and bread technological performance. *Food Science and Technology International*, 7, 501-510.

Crittenden, R., Laitila, A., Forssell, P., Mättö, J., Saarela, M., Mattila-Sandholm & T., Myllärinen, P. (2001). Adhesion of bifidobacteria to granular starch and its implications in probiotic technologies. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(8), 3469-3475.

Day, L., Fayet, C. & Homer, S. (2013). Effect of NaCl on the thermal behaviour of wheat starch in excess and limited water. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 31-37.

De Leyn, I., (2006). Functional additives. *Bakery products: Science and technology*. Blackwell Publishing, 233-244.

Delcour, J. A., & Hosney, R. C. (2010). Principles of cereal science and technology. AACC International: USA.

Della Valle, G., Chiron, H., Jury, V., Raitière, M., & Réguerre, A. L. (2012). Kinetics of crust formation during conventional French bread baking. *Journal of Cereal Science*, 56, 440-444.

Dickinson, E. (2010). Food emulsions and foams: stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15, 40-49.

Dobraszczyk, B. J., Morgenstern, M. P. (2003). Rheology and the breadmaking process - Review. *Journal of Cereal Science*, 38, 229-245.

Dobraszczyk, B. J., Schofield, J. D. (2002). Rapid assessment and prediction of wheat and gluten baking quality with the 2-g direct drive mixograph using multivariate statistical analysis. *Cereal Chemistry*, 79, 607-612.

Dobraszczyk, B.J., Smewing, J., Albertini, M., Maesmans, G., Schofield, J.D. (2003). Extensional rheology and stability of gas cell walls in bread doughs at elevated temperatures in relation to breadmaking performance. *Cereal Chemistry* 80, 218–224.

Donelson, D. H., & Wilson, J. T. (1960). Effect of the relative quantity of flour fractions on cake quality. *Cereal Chemistry*, 37, 241-262.

Esteller, M. S., & Lannes, S. (2008). Production and characterization of sponge-dough bread using scalded dye. *Journal of Texture Studies*, 39(1), 56-67.

Gallagher, E. (2008). *Formulation and nutritional aspects of gluten-free cereal products and infant foods*. In: Arendt, E.K., Dal Bello, F. (Eds.), *Gluten-free cereal products and beverages*. Academic Press, 321- 346.

Gelinas, P., Roy, G., & Guillet, M. (1999). Relative effects of ingredients on cake staling based on an accelerated shelf-life test. *Journal of Food Science*, 64(5), 937-940.

Gerits, L. R., Pareyt, B., & Delcour, J. A. (2014). A lipase based approach for studying the role of wheat lipids in bread making. *Food Chemistry*, 156, 190-196.

Gómez, M., Oliete, B., García-Álvarez, J., Ronda, F., & Salazar, J. (2008). Characterization of cake batters by ultrasound measurements. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 408-413.

Gülüm, S., Sahin, S. & Turabi, E., (2008). Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*, 22(2), 305-312.

Guiné, R. P. F., & Barroca, M. J. (2012). Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioprocess Processing*, 90, 58-63.

Handleman, A. R., Conn, J. F., & Lyons, J. W. (1961). Bubble mechanics in thick foams and their effects on cake quality. *Cereal Chemistry*, 38, 294-305.

Hernández-Jaimes, C., Bello-Pérez, L. A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2013). Plantain starch granules morphology, crystallinity, structure transition, and size evolution upon acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 207-213.

Hernández-Jaimes, C., Utrilla-Coello, R. G., Carrillo-Navas, H., García-Márquez, E., Meraz, M., Bello-Pérez, L. A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2014). Corn starch acid hydrolysis at the onset gelatinization temperature: Morphology, crystallinity, viscoelasticity, and thermal properties. *Starch-Stärke*, 66(7-8), 636-644.

Huang, D. P., & Rooney, L. W. (2001). Starches for snack foods. *Snack foods processing*, 115-130.

Jacobs, H., & Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(8), 2895-2905.

Jaiswal, K. & Jayaram K. (2015). Physicochemical properties and release characteristics of starches from seeds of Indian Shahi Litchi. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 256-261.

Jaworska, G., & Bernas, E. (2010). Effects of pre-treatment, freezing and frozen storage on the texture of *Boletus edulis* (Bull: Fr.) mushrooms. *International Journal of Refrigeration*, 33, 877-885.

Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J., Cieřlik, E., & Witczak, M. (2012). Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 353-360.

Kihlberg, I., Johansson, L., Kohler, A. & Risvik, E. (2004). Sensory qualities of whole wheat pan bread—influence of farming system, milling and baking technique. Department of Domestic Sciences, Uppsala University, Sweden-Norway.

Kiosseoglou, V. (2004). Interactions and competitive adsorption effects in egg-based products. *Worlds Poultry Science Journal*, 60,311-320.

Kiosseoglou, V., & Paraskevopoulou, A. (2006). Eggs. In: Y. H. Hui, H. Corke, I., De Leyn, W. Nip, & N. Cross (Eds.), *Bakery products: Science and technology*, 161-172.

Korus, J., Juszczak, L., Ziobro, R., Witczak, M., Grzelak, K., & Sójka, M. (2012). Defatted strawberry and blackcurrant seeds as functional ingredients of gluten-free bread. *Journal of Texture Studies*, 43(1), 29-39.

Korus, J., Witczak, M., Ziobro, R., & Juszczak, L. (2009). The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 988-995.



Lai, H. M & Lin T. C. (2006). *Bakery products. Handbook of food science, technology and engineering*. CRC Press, Boca Raton.

Mariotti, M., Iametti, S., Cappa, C., Rasmussen, P., & Lucisano, M. (2011). Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of the uncooked products. *Journal of Cereal Science*, 53, 319-327.

Marquart, L., Jacobs Jr, D. R., McIntosh, G. H., Poutanen, K., & Reicks, M. (Eds.). (2008). *Whole grains and health*. John Wiley & Sons.

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(8), 1152-1157.

Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., Capellas, M. (2012). Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 476-48.

Morrison, Faith A. (2001). *Understanding Rheology*. Oxford: University Press.

Nassu, R. T., & Guaraldo Gonçalves, L. A. (1999). Determination of melting point of vegetable oils and fats by differential scanning calorimetry (DSC) technique. *Grasas y Aceites*, 50, 16-21.

Oliver, C. M., Stanley, R. A., & Melton, L. D. (2006). Creating proteins with novel functionality through the Maillard reaction. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46, 337-350.

Ortolan, F., Brites, L. T. G., Montenegro, F. M., Schmiele, M., Steel, C. J., Clerici, M. T. P. S., Almeida, E. L., & Chang, Y. K. (2015). Effect of extruded wheat flour and pre-gelatinized cassava starch on process and quality parameters of French-type bread elaborated from frozen dough. *Food Research International*, 76, 402-409.

Pareyt, B., Finnie, S. M., Putseys, J. A., & Delcour, J. A. (2011). Lipids in bread making: sources, interactions, and impact on bread quality. *Journal of Cereal Science*, 54, 266-279.

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 36-60.

Pérez, S. & Bertoft, E., (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch Stärke*, 62 (8), 389-420.

Pomeranz, Y. & Chung, O. K. (1978). Interaction of lipids with proteins and carbohydrates in breadmaking. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 55(2), 285-289.

Primo-Martin, C., Van de Pijpekamp, A., Van Vliet, T., De Jongh, H. H. J., Plijter, J. J., & Hamer, R. J. (2006). The role of the gluten network in the crispness of bread crust. *Journal of Cereal Science*, 43, 342-352.

Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P. A., & Pando, V. (2011). Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 272-277.

Rosenthal, A. J. (1999). Relation between instrumental and sensory measures of food texture. In *Food Texture: Measurement and Perception* (A.J. Rosenthal, ed.) pp. 1-17, Aspen Publishers Inc: Gaithersburg, MD.

Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P. A. & Pando, V. (2011). Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 272–277.

Rosenthal, A.J. (2010). Texture profile analysis – How important are the parameters? Oxford Brookes University. Gipsy Lane, Oxford, UK.

Scott, G., & Richardson, P. (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology* 8, 119-124.

Shepherd, I. S., & Yoell, R. (1976). Cake emulsions. In S. Friberg (Ed.), *Food emulsions*, 216-275.

Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N.S., & Gill, B.S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219-231.

Smith, A. M. (2001). The biosynthesis of the starch granule. *Biomacromolecules*, 2, 335-341.

Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry*, 67(6), 551-557.

Tester, R. F., Debon, S. J. J., & Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. *Carbohydrate Polymers*, 42(3), 287-299.

Tester, R. F. & Sommerville, M. D. (2003). The effects of non-starch polysaccharides on the extent of gelatinisation, swelling and  $\alpha$ -amylase hydrolysis of maize and wheat starches. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 41-54.

Thachil, M. T., Chouksey, M. K., & Gudipati, V. (2014). Amylose-lipid complex formation during extrusion cooking: effect of added lipid type and amylose level on corn based puffed snacks. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(2), 309-316.

Thomas, D. J., & Atwell, W. A. (1999). Starches. Eagan Press Handbook Series: USA.

Tornberg, E., Fjellkner-Modig, S., Ruderus, H., Glantz, P. O., Randow, K., & Stafford, D. (1985). Clinically recorded masticatory patterns as related to the sensory evaluation of meat and meat products. *Journal of Food Science*, 50(4), 1059-1066.

Trinh, K. T., & Glasgow, S. (2012). On the texture profile analysis test Accessed 05.01.16. [www.conference.net.au/chemeca2012/papers/202.pdf](http://www.conference.net.au/chemeca2012/papers/202.pdf)

Vaclavik, & Vickie A. (2002). Fundamentos de ciencia de los alimentos. España: Acribia.

Vanin, F., Lucas, T., & Trystram, G. (2009). Crust formation and its role during bread baking. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 333-343.

Wagner, N. J., & Brady, J. F. (2009). Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*, 62, 27-32.

Wilderjans, E., Kerckhofs, G., Lagrain, B., Brijs, K., Wevers, M., & Delcour, J. A. (2010). Baking gradients cause heterogeneity in starch and proteins in pound cake. *Cereal Chemistry*, *87*, 475-480.

Wilderjans, E., Luyts, A., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2013). Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in food science & technology*, *30*(1), 6-15.

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.

Wikström, K., & Bohlin, L. (1996). Multivariate analysis as a tool to predict bread volume from mixogram parameters. *Cereal Chemistry*, *73*, 686-690.

Witczak, M., Ziobro, R., Juszczak, L., & Korus, J. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems—A review. *Journal of Cereal Science*, *67*, 46-57.

Won, D., & Kim, C. (2004). Alignment and aggregation of spherical particles in viscoelastic fluid under shear flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, *117*, 141-146.

Young, L. S. (2012). Applications of texture analysis to dough and bread. Woodhead. Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 562-579.

Young, L.S. & Cauvain, S.P. (2007). Technology of breadmaking. *Springer*. Alemania.

Zhang, P., Whistler, R. L., BeMiller, J. N., & Hamaker, B. R. (2005). Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility—a review. *Carbohydrate Polymers*, *59*(4), 443-458.