



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA**

**Efecto de la Adición de Salvados de Cebada y Trigo
en las Propiedades Fisicoquímicas y Reológicas de la
Masa y la Calidad del Pan**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

ANDREA SILVA RAMOS

Hermosillo, Sonora

Mayo de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, su apoyo incondicional y su dedicación durante toda mi vida. Este logro es por y para ustedes.

A mi hermano, por su apoyo y su cariño.

A mi abuela Rita, por velar siempre por mí, por todo su amor, su ayuda y su consejo. Este logro también es para usted.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, mi alma máter, por permitirme concluir con éxito una etapa tan importante en mi vida.

A la Dra. María Guadalupe Salazar García, mi directora de tesis, por guiarme durante este proceso y brindarme siempre su apoyo, su consejo pero sobre todo su cariño. Muchas gracias por todo.

Al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, por todo el aprendizaje y los conocimientos adquiridos a lo largo de esta bonita carrera.

Al Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos (DIPA), especialmente al laboratorio de Reología y Panificación, por todo el apoyo y el consejo brindado para la realización del trabajo experimental.

A mi familia y a mis amigos, los cuales me impulsan a salir adelante siempre, así como a todas las personas que tuve el gusto de conocer durante esta etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
Generalidades de los Cereales.....	4
Los Cereales en la Alimentación Humana.....	4
Composición Química de los Cereales.....	5
Procesamiento de los Cereales.....	9
Generalidades del Trigo.....	7
Salvado de Trigo.....	10
Composición Química del Grano de Trigo.....	11
Gluten de Trigo y sus Propiedades Viscoelásticas.....	16
Características y Comportamiento Reológico de la Masa	17
Generalidades de la Cebada.....	18
Composición Química.....	18
Procesamiento.....	20
Evaluación de la Calidad en Harinas.....	20
Determinaciones Químicas y Físicas para Evaluar la Calidad en Harinas.....	21
Contenido de Humedad.....	21
Contenido de Proteínas.....	21
Ensayos Reológicos de Masas.....	21

	Página
Farinógrafo.....	22
Absorción de Agua.....	22
Tiempo de Desarrollo.....	22
Estabilidad.....	22
Proceso de Panificación.....	24
Funcionalidad de los Componentes de la Harina.....	26
Aspectos Reológicos.....	29
Conceptos Básicos.....	29
Propiedades Reológicas.....	30
Ecuaciones de Estado Reológicas.....	31
Comportamiento Ideal.....	31
Desviaciones con respecto al Comportamiento Ideal.....	33
Materiales Viscoelásticos.....	35
Estudios Reológicos en Masas.....	36
Métodos Empíricos.....	36
Métodos Fundamentales.....	36
Prueba de Compresión Uniaxial.....	38
Reología de las Masa de Harina de Trigo.....	38
Métodos para Evaluar Propiedades Reológicas de la Masa.....	39
Compresión Uniaxial con Lubricación.....	39
Tratamientos Utilizados para Mejorar la Funcionalidad de las Fibras.....	42
Modificaciones Enzimáticas.....	42
Modificaciones Mecánicas (Extrusión).....	42
Beneficios de la Extrusión.....	43
Reacciones Químicas durante la Extrusión.....	44
Ingeniería de un Extrusor de Alimentos.....	45
Funcionamiento Básico del Extrusor de un Solo Tornillo.....	46

	Página
MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
Materia Prima.....	47
Acondicionamiento.....	47
Decorticación de Cebada.....	48
Proceso de Extrusión.....	48
Mezclas de Harina.....	50
Prueba de Panificación.....	51
Análisis Químico.....	51
Análisis Reológico.....	52
Determinación de Textura.....	52
Evaluación de la Viscosidad Extensional Biaxial de las Masas.....	52
Método de Compresión Uniaxial con Lubricación.....	52
Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico.....	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
Proceso de Extrusión	58
Análisis Químico de las Materias Primas.....	58
Evaluación Reológica.....	62
Evaluación de la Textura del Pan.....	67
Viscosidad Extensional Biaxial.....	70
Prueba de Panificación.....	73
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS.....	85

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1.- Composición Química Proximal de los Cereales.....	6
2.- Ejemplos de Métodos Empíricos e Imitativos.....	37
3.- Análisis Químico de las Materias Primas.....	60
4.- Absorción de Agua y Tiempo de Desarrollo obtenidos con el Farinógrafo	64
5.- Valores de la fuerza medida al 25% de deformación por gramo de muestra	68
6.- Peso obtenido (g).....	78
7.- Evaluación del Volumen del Pan de los Diferentes Tratamientos.....	79
8.- Evaluación de la Altura del Pan de los Diferentes Tratamientos.....	80
9.- Evaluación del Volumen Específico del Pan de los Diferentes Tratamientos.....	81
10.- Peso Cubos de Pan para el Análisis de Textura.....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.- Valor de la producción de trigo en México en 2013.....	8
2.- Estructura del Grano de Trigo.....	12
3.- Estructura del Grano de Cebada.....	19
4.- Farinograma Característico.....	23
5.- Estructura Química de la Amilosa y la Amilopectina.....	28
6.- Desviaciones del Comportamiento Ideal en Fluidos.....	34
7.- Extrusor Marca Brabender	49
8.- Platos utilizados en la Prueba de Compresión y Aro de Hierro para Moldear la Masa.....	54
9.- Etapas del Proceso de Moldeo de la Masa.....	55
10.- Extrudidos Obtenidos.....	59
11.- Comparación entre la absorción de agua entre la Harina de Trigo Blanca, Mezcla de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir y la de Harina Blanca + Salvado de Trigo Extrudido.....	65
12.- Comparación entre la absorción de agua entre la Harina de Trigo Blanca, Mezcla de Harina De Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s y Mezcla de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Decorticación 66 s.....	66
13.- Antes y después de la realización de la prueba de compresión en el Texturómetro marca INSTRON	69
14.- Viscosidad Extensional Biaxial de Harina de Trigo Blanca, Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir y Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido.....	71

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

Figura	Página
15.- Viscosidad Extensional Biaxial de Harina de Trigo Blanca, Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Decorticación 18 s y Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Decorticación 66 s.....	72
16.- Comparación de las formulaciones de pan	74
17.- Comparación entre Mezcla de Harina de Trigo Blanca con las Mezclas de Harina + Salvado (Extrudido Y Sin Extrudir).....	75
18.- Comparación entre mezcla de Harina de Trigo Blanca con las Mezclas de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada (Tiempo de Decorticación 18 s y 66 s).....	76

RESUMEN

En los últimos años, la demanda de productos alimenticios que tengan un alto valor nutricional pero que a su vez sean atractivos al consumidor, ha ido en aumento. Se busca un procesamiento que le proporcione al producto dichas características, pero que no impacte de manera negativa en la calidad final. El proceso de extrusión somete al alimento a un conjunto de condiciones de temperatura, presión y humedad, que resulta en un producto con propiedades modificadas, por lo que el objetivo principal de este trabajo fue determinar el efecto de incorporar salvado de trigo extrudido y salvado de cebada con dos diferentes tiempos de decorticación a la formulación de pan, así como su impacto en las características físicas, químicas y reológicas finales como la viscosidad extensional biaxial por medio del Método de Compresión Uniaxial con Lubricación. Se utilizó salvado de trigo comercial, el cual fue sometido al proceso de extrusión bajo un perfil de temperatura de 60, 80, 100 y 120 °C, y un contenido de humedad de 31 %. Los extrudidos fueron secados y molidos para adicionarse a la formulación para elaborar pan (70% Harina de Trigo Blanca y 30% Salvado de Trigo Extrudido y sin Extrudir). También se utilizaron dos fracciones de salvado de cebada, decorticada durante 18 s y 66 s respectivamente para adicionarse a las formulaciones. Se elaboró pan según la metodología oficial y se analizaron las propiedades fisicoquímicas y texturales. Se concluye que al añadir salvado de trigo extrudido influye en los parámetros físicos y reológicos, aumentando la viscosidad extensional biaxial, la fuerza de compresión, la absorción de agua y el tiempo de desarrollo, pero disminuyendo el volumen y la altura, mostrando una miga menos porosa. Por otro lado, al incrementarse el tiempo de decorticación de la cebada, aumentó la absorción de agua, pero disminuyó tanto la viscosidad extensional biaxial como la fuerza de compresión en el pan, el tiempo de desarrollo, el volumen y la altura.

Se concluyó que el salvado de trigo extrudido modifica de manera importante tanto las propiedades físicas como las propiedades reológicas de la masa y del pan, de la misma manera con el salvado de cebada, en cuyo caso el tiempo de decorticación influyó también tanto en las propiedades físicas como en las propiedades reológicas.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, los cereales se han convertido en la base de la alimentación de la humanidad, por su facilidad de cultivo y conservación, su sabor y sus diversos beneficios para la salud.

El *trigo* (*Triticum aestivum*) es el cereal más ampliamente cultivado alrededor del mundo y el que posee más sistemas de clasificación debido a su alta versatilidad y distintos usos (Verdú, 2009). Es el segundo cereal de importancia para la alimentación en México y el de mayor demanda en países desarrollados, donde gran parte de la alimentación se basa en su consumo. Un subproducto de la molienda del trigo es el salvado, cuyo uso para consumo humano se ha incrementado gradualmente a través de los años (Curti et al., 2013)

Otro cereal importante es la cebada, la cual es genéticamente de los cereales más diversos, y debido a que el grano de cebada tiene una alta concentración de fibra soluble, especialmente de β – *glucanos*, ha surgido un interés emergente en la cebada como un ingrediente de alimento funcional.

Muchos alimentos populares a base de cereales se obtienen mediante el proceso de extrusión. La extrusión provoca la fragmentación de proteínas, almidones, polisacáridos y polisacáridos no almidonosos, creando moléculas reactivas, las cuales pueden formar nuevas uniones que podrían resultar en un beneficio para la salud (Kahlon et al., 2006), es conocido también que mejora la calidad nutricional de los alimentos, la digestibilidad de algunos nutrientes, solubiliza la fibra e inactiva algunos factores anti nutricionales.

Durante la extrusión los componentes de la fibra sufren grandes modificaciones químicas, lo cual resulta en propiedades físicas, químicas, estructurales y reológicas (Larrea et al., 2010).

La calidad de la harina para la panificación depende de las características intrínsecas de sus proteínas determinadas por la variedad. El contenido y la calidad de las proteínas del trigo determinan sus propiedades reológicas y de panificación (Bushuk,1985).

Un método sencillo y confiable utilizado para evaluar las características reológicas de las masas es el flujo de compresión con lubricación, y los resultados pueden ser expresados como viscosidad extensional biaxial. Dicho método relaciona las características reológicas con la calidad de panificación (Janssen y col.,1996; Van Vliet y col., 1992).

El objetivo principal del presente trabajo es determinar el efecto de la incorporación del salvado de cebada y salvado de trigo extrudido a la formulación de pan y su impacto en las características físicas, químicas y reológicas.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

Determinar el efecto de la incorporación de salvados de cebada y trigo extrudido a la formulación de pan y su impacto en las características fisicoquímicas y propiedades reológicas.

Objetivos Particulares

- 1) Determinar el efecto de la adición de salvado de cebada a dos tiempos de decorticación sobre los parámetros fisicoquímicos de las mezclas de harina y la calidad del pan.
- 2) Evaluar el efecto de la extrusión del salvado de trigo sobre los parámetros fisicoquímicos de las mezclas de harina y la calidad del pan.
- 3) Determinar el valor de la viscosidad extensional biaxial de las masas elaboradas con el salvados de cebada y trigo.
- 4) Establecer el efecto de la adición de salvados de cebada y trigo sobre los parámetros físicos y las propiedades texturales del pan.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Generalidades de los Cereales

Desde la antigüedad, los cereales se han convertido en la base de la alimentación de la humanidad, por la facilidad de su cultivo, y conservación, el sabor y sus diferentes beneficios para la salud.

El término 'cereal' es derivativo del latín 'cereales', que significa grano, el cual es botánicamente un tipo de fruta llamada caryopsis, compuesta por pericarpio, endospermo y germen. (Sarwar et al., 2013). Tienen un papel fundamental en la alimentación del ser humano en la actualidad, sobre todo en los países con menos recursos, donde ocho de cada diez personas se encuentran en situación de pobreza extrema.

El grano se compone de tres partes esenciales: el pericarpio (es la capa externa del grano, contiene ácidos grasos, vitaminas y minerales), el endospermo (parte principal del grano, mayoritariamente compuesto de almidón) y el germen (la parte más pequeña del grano, contiene vitamina E, tiamina, fósforo y magnesio). Existen numerosas variedades y los cereales más importantes son: el trigo, maíz, arroz, avena, cebada y centeno.

Los Cereales en la Alimentación Humana

En las últimas décadas, las cuestiones de sobrepeso y población obesa se han convertido en una preocupación muy grande tanto para las autoridades de salud pública como para los gobiernos. Grandes campañas de comunicación han despertado la conciencia de los consumidores sobre la composición de su alimentación, así como las ventajas de un estilo de vida más saludable.

Como consecuencia, los consumidores se encuentran buscando alimentos más sanos, así como una mayor variedad en sus dietas (Frédéric et al., 2012). Los alimentos elaborados con cereales de grano entero presentan un contenido nutritivo y de fibra mayor que los refinados, dado que en este proceso se eliminan ciertas partes del cereal, como el salvado y el germen. Más del 50% de la ingesta calórica diaria mundial se deriva directamente del consumo de granos de cereal.

Composición Química de los Cereales

Son alimentos ricos en hidratos de carbono, proporcionan energía y también un poco de proteína, que normalmente es de buena calidad. Todos aquellos que conservan su corteza son los llamados integrales, más ricos en minerales, vitaminas y fibras vegetales, como se muestra en la **Tabla 1**. El alto valor nutricional de los distintos cereales es similar y se pueden destacar las siguientes cualidades (Verdú, 2009):

Proteína, se encuentra principalmente en la capa aleurona y germen, y aunque no se encuentra en altos niveles en los cereales, representa un aporte del 60% de las consumidas por el ser humano debido al gran consumo de los cereales a nivel mundial. La proteína incluye albúminas y globulinas que son solubles en agua y las insolubles son prolaminas y gluteninas.

Carbohidratos, el componente mayoritario es el almidón (70% del peso) que se localiza principalmente en el endospermo; por otro, lado está la fibra dietética, encontrada en las capas más externas de los cereales, la cantidad y tipo de fibra cambia dependiendo del cereal que se trate.

Tabla 1. Composición Química Proximal de los Cereales.^a

Cereal	Proteína (%)	Extracto Etéreo (%)	Fibra Cruda (%)	Cenizas (%)	ELN^b (%)
Trigo					
<i>Panadero</i>	14.4	2.3	2.9	1.9	78.5
<i>Suave</i>	9.9	2.8	2.7	1.7	82.9
<i>Cristalino</i>	13.2	2.8	2.8	2.0	79.2
Cebada	11.5	2.2	5.6	2.9	77.8
Avena	17.1	6.4	11.3	3.2	62.0

^a Todos los valores están expresados en base seca.

^b Extracto Libre de Nitrógeno

Fuente: Serna Saldívar, 1996.

Grasa, se encuentra en cantidades muy pequeñas, excepto en la avena, y son en su mayoría grasas insaturadas.

Vitaminas y minerales, hay grandes diferencias en los contenidos de estos nutrientes en los distintos cereales.

Los cereales con grano entero contienen diferentes fitoquímicos que han sido relacionados con beneficios significativos a la salud. (Sarwar et al.,2013).

Dentro de estos fitoquímicos se incluyen:

- 1) *Lignina*: Puede disminuir el riesgo de padecer una enfermedad coronaria, así como retardar el cáncer en animales.
- 2) *Ácido fólico*: Reduce el índice glicémico del alimento, lo cual es importante para las personas que padecen diabetes, y ayuda a la protección contra el desarrollo de células cancerígenas en el colon.

Generalidades del Trigo

El trigo (*Triticum aestivum*) es el cereal más ampliamente cultivado alrededor del mundo (Verdú, 2009) y el que posee más sistemas de clasificación debido a su alta versatilidad y distintos usos. Es el segundo cereal en importancia para la alimentación en México. El valor de la producción de trigo en Sonora (Figura 1) es el más alto en México: 63,300 millones de pesos. Supera a Baja California y a Guanajuato por amplio margen, como se muestra en la Figura 1. Esto se debe a la mayor superficie sembrada y sus buenos rendimientos (Márquez Berber, et al., 2014).

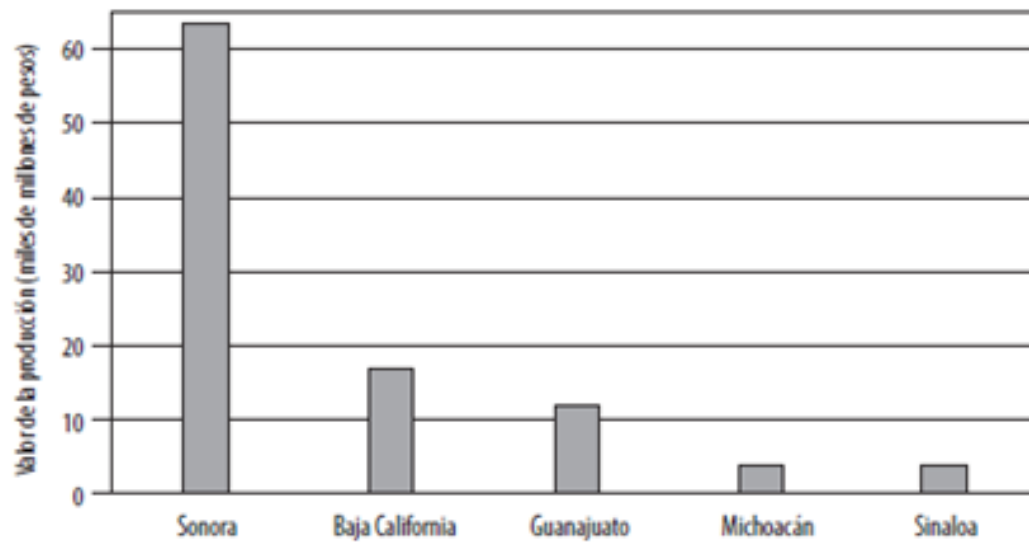


Figura 1. Valor de la producción de trigo en México en 2013

Fuente: SIAP, 2014

Procesamiento de los Cereales

Los cereales típicamente se someten a una variedad de procesos para producir una variedad de diferentes productos, incluyendo productos no alimenticios. La molienda es el proceso principal asociado a los cereales, especialmente el pan elaborado con trigo y centeno (McKevith, 2004).

Molienda

El proceso de molienda puede ser básicamente descrito como: molienda, tamizado, separación y nueva molienda. Estos pasos son repetidos para extraer una parte particular del grano, el endospermo.

Durante la molienda, diversos cambios técnicos pueden suceder. En primer lugar, puede haber cambios mecánicos en el almidón, lo cual puede incrementar el nivel de actividad enzimática. Éstos cambios son importantes en la panificación para proveer acceso a la enzima alfa-amilasa para que ésta trabaje y no sea tan intrínsecamente negativo (McKevith,2004). Así como la molienda, una variedad de otros procesos pueden ser utilizados en la producción tanto de cereales como productos de cereales. Generalmente, las técnicas utilizadas resultan en la fragmentación de la matriz alimentaria y la gelatinización de los gránulos de almidón. Esto hace que sean fácilmente digestibles.

La mayoría de los granos utilizados para la alimentación humana son molidos para remover el salvado (pericarpio) y el germen, principalmente para satisfacer las expectativas de los consumidores. El proceso de molienda despoja al grano de nutrientes importantes incluyendo la fibra dietaria, fenoles, vitaminas y minerales, los cuáles son benéficos para la salud. (Awika, 2011).

Salvado de Trigo

La fracción del salvado es un subproducto de la molienda y tiene aplicaciones alimenticias (Curti et al., 2013) y no alimenticias (Aprich et al., 2013). El término "salvado" es aplicado a una variedad de productos derivados de granos de cereales, y usualmente se relaciona con las capas exteriores del grano o cariósido. La mayoría de los productos elaborados a base de salvado de trigo contienen altos niveles de fibra insoluble, ceniza, vitaminas, lípidos y pigmentos (Pavlovich et al., 2012). El salvado es el principal subproducto de la molienda del trigo, el cual sirve como una de las mayores fuentes de fibra con un porcentaje de aproximadamente 33.4 a 63 %.

A pesar del conocimiento sobre de que el grano de trigo contiene componentes que son benéficos en la salud humana, su uso en la industria alimentaria es limitado. Sin embargo, el interés en incorporar salvado de trigo en la dieta se ha incrementado en años recientes, mayormente debido al estatus del salvado de trigo como una fuente de fibra (Pavlovich et al., 2012). Globalmente, el número de productos alimenticios con salvado de trigo incorporado ha aumentado de 52 productos en 2001 a 800 productos aproximadamente en 2011 (Pruckler et al., 2014).

El salvado de trigo comprende aproximadamente el 14% de la cariósido y puede estar incluido en la harina integral, pero normalmente, es separado de la harina, y se destina a la alimentación animal (Quaglia, 1991). De acuerdo a Serna Saldívar (1996) la composición química del salvado de trigo es; humedad 8.8%, proteína 14.9%, materia grasa 4.49%, cenizas 9.18% y fibra cruda 11.84%.

La harina integral y el salvado de trigo son las fuentes más importantes de fibra en la industria dedicada a la elaboración de productos de panificación (Gajula et al., 2008).

Composición Química del Grano de Trigo

Además de la diversidad genética que representan los trigos, la variedad de suelos y climas en lo que éste se cultive hacen que su composición cambie. Por lo general el trigo tiene una composición química proximal promedio, mostrada en la **Figura 2**, de 14.6% de proteína, 1.8% de lípidos, 3 % de fibra cruda, 2% de cenizas y 78.6% de carbohidratos digeribles (Hoseney, 1991).

La cariósida o grano tiene una longitud por término medio de 8 mm y un peso aproximado de 35 mg. El tamaño de los granos varía según la variedad y según la posición en la espiga (Hoseney, 1991).

Además del embrión desde el centro hacia la periferia del grano se pueden distinguir el endospermo (compuesto de endospermo almidonoso y la capa de aleurona), la testa (compuesta de epidermis nuclear) y el pericarpio (formado por las células tubulares, células cruzadas, hipodermis y epidermis) (Antoine et al., 2003). La cariósida o grano por su parte se subdivide en tres partes fundamentales: pericarpio (12.5%), endospermo (85%) y germen (2.5%) (Reyes-Pérez, 2013). La estructura del trigo le proporciona a éste sus características únicas (Hoseney, 1991).

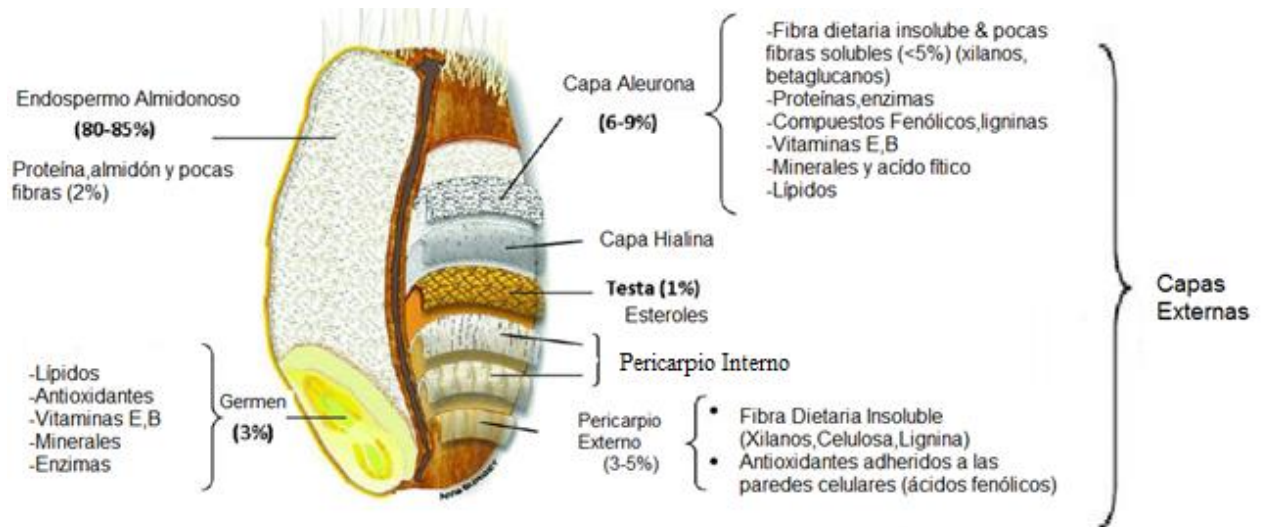


Figura 2. Estructura del grano de trigo

Fuente: Oluwatoyin, 2015.

Almidón

El almidón es el componente mayoritario en el grano. Se presenta en forma de gránulos, los cuáles se encuentran formados por dos tipos de moléculas: amilosa y amilopectina, siendo la amilopectina el componente principal de la mayoría de los almidones y su estructura desempeña un papel importante en las características del almidón. El almidón es el substrato para la enzima amilasa que produce los azúcares fermentables para la levadura y sirve como debilitante del gluten, lo que contribuye a optimizar las propiedades viscoelásticas de la masa

El proceso inicia con el hinchamiento de los gránulos del almidón y el incremento del volumen de éstos por la absorción de agua, y posteriormente el ablandamiento cuando la estructura de los gránulos se rompe, y finalmente la ruptura de los gránulos de almidón y la liberación de amilosa, ambos provocando un incremento en la viscosidad. La velocidad de gelatinización depende de manera importante de la cantidad de agua (Blanshard, 1986). El tamaño de los gránulos de almidón también es uno de los factores que afectan la textura de la miga del pan.

Mientras que la mayoría de las diferencias en las masas se atribuyen comúnmente a las proteínas del gluten, el almidón puede causar diferencias de la misma manera. Dichas diferencias son aparentes en la panificación. La masa desarrollada óptimamente, es aquella en la cual existe una matriz continua e interconectada rodeada en su mayoría por gránulos de almidón (Petrofsky y Hosenev, 1995).

Vitaminas

Las principales vitaminas que contiene el trigo son tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantoténico, ácido fólico, colina, inositol, tocoferoles, xantofila y precursores de vitamina A, y a su vez carece por completo de otras vitaminas como C y D (Quaglia,1991).

Minerales

Entre los minerales con los que cuenta el trigo en sus componentes son el potasio (K), magnesio (Mg), fósforo (P) y azufre (S), aunque no se encuentren en cantidades significativas (Pomeranz y Williams, 1990).

Enzimas

Las enzimas son piezas clave en la panificación moderna, debido a que proveen una mayor calidad a los productos. Las enzimas tienen una trayectoria probada de facilitar el manejo de las masas, el proceso de tolerancia, incremento en el volumen específico, una estructura de migas más finas, además de una vida de anaquel más larga.

Algunos ejemplos son las celulasas, hemicelulasas, pentosanasas, proteasas, lipasas y oxidasas, aunque la más utilizada es la α – *amilasa*. La actividad de la α – *amilasa* en el sistema de la masa y durante la panificación tiene un impacto en varias de las características del producto, incluyendo el volumen del pan, la firmeza y la vida de anaquel (Sanz Panella et.al., 2014). Las α y β amilasas son enzimas que se encargan de la producción de azúcares simples a partir de grandes cadenas de almidón.

Las lipasas son enzimas que catalizan la hidrólisis de ésteres. Otras enzimas que podemos encontrar en el grano de trigo son las fosfatasas, oxidasas fenólicas y aromáticas, catalasa y peroxidasa (Salazar García, 2004).

Proteína

El trigo se caracteriza por su bajo contenido de proteínas y niveles altos de carbohidratos; los carbohidratos consisten esencialmente de almidón, dextrinas, pentosas y azúcares. La variedad de componentes no está uniformemente distribuida en las diferentes estructuras del grano. Como resultado, la cáscara y el salvado tienen un alto contenido de lípidos, proteínas, azúcar y cenizas. El endospermo consiste principalmente de almidón y es más bajo en contenido de proteínas que el germen y, en algunos cereales, que el salvado (Salazar García, 2004).

El contenido de proteína del trigo es un índice importante de su calidad para la elaboración de diferentes productos alimenticios y es el componente que más afecta la funcionalidad y calidad de los productos de trigo.

Esto es debido a que parámetros muy importantes, como absorción de agua, tiempo de amasado y estabilidad están en función de la cantidad y calidad de la proteína (Serna Saldívar, 1996). El potencial de elaboración del pan de trigo está asociado con la cantidad y calidad de su proteína, como se mencionó anteriormente.

Gluten de Trigo y sus Propiedades Viscoelásticas

La masa de trigo posee características tanto de un líquido viscoso como de un sólido elástico, por lo que se le denomina material viscoelástico. Las proteínas del gluten constituyen la fracción predominante que controla las propiedades viscoelásticas de las masas de trigo (Faubion y Hosney, 1990).

Cuando la harina de trigo se mezcla con el agua, las gliadinas y gluteninas, (proteínas que se encuentran en proporciones similares) forman una “bola” viscoelástica a la que se le conoce como gluten. De forma general, son las propiedades reológicas del gluten las que van a determinar la calidad de la panificación de la harina (Pavlovich, 2007). Tales proteínas son las responsables de la extensibilidad (gliadinas) y de la elasticidad (gluteninas) de la masa. La fracción de gliadinas comprende proteínas monoméricas, que presentan enlaces disulfuro intramoleculares. La fracción de gluteninas, por otro lado, se compone de proteínas poliméricas, que presentan enlaces disulfuro intermoleculares. Cuando dichas fracciones se hidratan, también muestran propiedades físicas distintas, las gliadinas se comportan como un líquido viscoso y la fracción de gluteninas se convierte en un sólido elástico (Blanshard, 1986).

Durante la elaboración de la masa, las moléculas del gluten se hidratan e interactúan para formar una estructura tridimensional, la cual determina las propiedades de la masa. Una buena capacidad de retención del gas de la masa es necesaria para producir un pan con volumen más alto y uniforme.

Características y Comportamiento Reológico de la Masa

Las propiedades del gluten (su combinación de viscosidad, elasticidad y cohesividad) son las responsables de proporcionar la calidad de panificación de la harina de trigo, y las fracciones de gliadinas y de gluteninas influyen de manera importante en las diferencias que se presentan en la calidad del gluten entre las variedades del trigo (Blanshard, 1986).

La masa en sí, es una combinación de agua y harina. Es un estado posterior a la harina y previo al pan. Las propiedades reológicas de la masa son fundamentales para el proceso de panificación, debido a que influyen tanto en el comportamiento de la masa durante las etapas de manejo mecánico (separación, mezclado y moldeado) así como en el volumen del pan.

El comportamiento de la masa resultante cuando se somete a un trabajo mecánico es determinado por las propiedades reológicas de la masa. La masa experimenta un estrés diferente durante las etapas de la panificación en los cuáles se encuentra sometida a diferentes deformaciones que varían desde un esfuerzo de corte hasta una elongación. El mezclado y el desarrollo de la masa incluyen deformaciones mayores que los que suceden durante la etapa de fermentación o la etapa de horneado (Pavlovich, 2007).

Un gran número de factores afectan la reología de la masa durante el tiempo transcurrido después del mezclado. Dentro de ellos se incluyen la relajación del estrés inducido durante el mezclado, la continua hidratación de los componentes de la harina y la redistribución del agua.

Generalidades de la Cebada

La cebada es uno de los cereales genéticamente más diversos, pertenece a la familia Poaceae, de la tribu Triticeae y del género *Hordeum*. Existen 32 especies que están separadas en cuatro secciones, las cuales fueron propuestas por Bothmer (1992) y son las siguientes: *Hordeum*, *Anisolepis*, *Critesion* y *Stenostachys* (García Villa, 2013).

La cebada es un diploide con 7 pares de cromosomas. Similarmente a cualquier otro grano, la composición química y características morfológicas de la cebada son determinadas por el genotipo y condiciones de crecimiento. Estas características influyen directamente en la calidad nutricional y la funcionalidad de este grano y sus componentes (Yeung, 2001). Debido a que el grano de cebada tiene una alta concentración de fibra soluble, y especialmente de β – *glucanos*, ha surgido un interés emergente en la cebada como un ingrediente de *alimento funcional*. Interés renovado en la cebada para usos alimenticios y dicho interés se basa en los efectos de los β – *glucanos* en disminuir el colesterol en la sangre y el índice glicémico (Shakib y Gabriel, 2010)

Composición Química

De manera similar a cualquier grano de cereal, la cebada contiene almidón (52 – 72 %), proteína, polisacáridos no amiláceos y lípidos como sus componentes mayoritarios. Los polisacáridos no amiláceos incluyen: celulosa, P - glucanos y hemicelulosa, también referidas como pentosas. Sus componentes minoritarios son azúcares, vitaminas y minerales, como se muestra en la **Figura 3**.

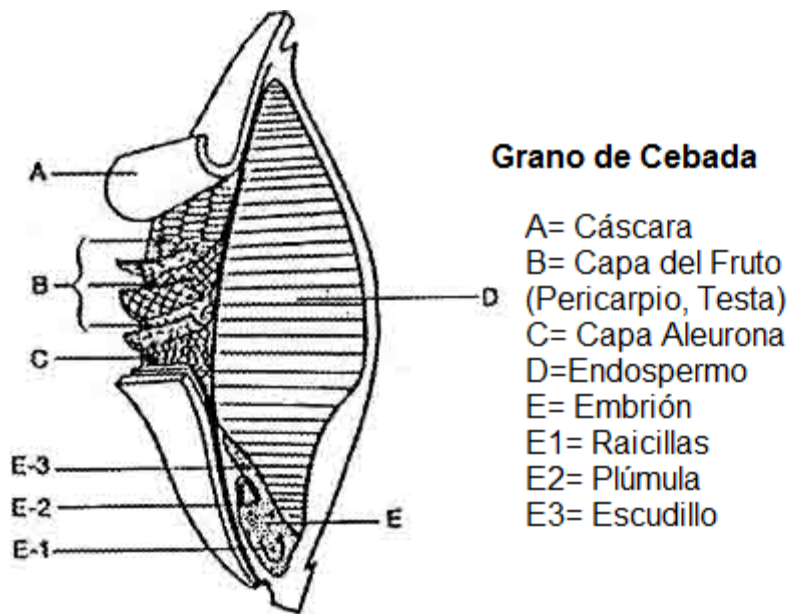


Figura 3. Estructura del grano de cebada

Fuente: Cerveza de Argentina.ar

La composición química y la funcionalidad de los componentes de los granos de cebada difiere con la variedad y entre granos de la misma variedad, debido a factores genéticos, condiciones de crecimiento y variaciones analíticas.

Procesamiento

Así como en otros granos de cereales, la cebada requiere uno o más pasos en su procesamiento para reducir o cambiar los granos en una forma más utilizable y comestible. Los procesos de molienda que son usados para la cebada son tanto la húmeda como la seca. Otros procesamientos utilizados en la cebada son la extrusión y el malteado (Newman y Newman, 2010).

Evaluación de la Calidad en Harinas

Los parámetros para determinar la calidad de las harinas (trigo y cebada en este caso) pueden ser medidos utilizando diferentes aparatos como lo son el farinógrafo, mixógrafo, extensógrafo, alveógrafo, entre otros. Dichos instrumentos fueron diseñados para medir las propiedades de la masa.

Generalmente, lo necesario para llevar a cabo las mediciones son principalmente agua y la harina a analizar. Los resultados de las pruebas nos permiten conocer, analizar y explicar las diferencias entre dos o más tipos de harina (Salazar García, 2004).

Determinaciones Químicas y Físicas para Evaluar la Calidad en Harinas

Contenido de Humedad

La determinación de la humedad es un paso importante en la evaluación de la calidad de granos y cereales procesados. Por otro lado, el contenido de humedad de los productos obtenidos está relacionado con las propiedades texturales y la aceptación del producto (Serna Saldívar,1996).

Contenido de Proteínas

Las proteínas son los compuestos que más impactan en la calidad y funcionalidad de los productos del trigo. Factores tan importantes como la absorción de agua, tiempo de amasado y estabilidad, así como la mayoría de las características reológicas, están en función de la cantidad y calidad de las proteínas presentes en la harina (Serna Saldívar,1996).

Ensayos Reológicos de Masas

Las pruebas más importantes para determinar la funcionalidad de las harinas son los llamados ensayos reológicos. Tienen como objetivo estudiar las propiedades del gluten hidratado y formado por la acción del amasado. Las pruebas son de gran importancia debido a que se relacionan con los parámetros del procesamiento y la calidad del producto terminado (Serna Saldívar,1996).

Farinógrafo

El Farinógrafo mide y registra la resistencia que opone la masa al mezclado (esfuerzo mecánico) y se basa en determinar la consistencia ideal de la masa (500 unidades farinográficas o Brabender). Se emplea también para determinar el grado de absorción de agua y determinar la estabilidad, así como otras características durante el amasado. Un Farinograma característico se muestra en la **Figura 4**. Los parámetros que se evalúan en los farinogramas se explican a continuación:

Absorción de Agua. Cantidad de agua que se requiere añadir a la harina para obtener la consistencia óptima o ideal.

Tiempo de Desarrollo. Es el tiempo medido desde el momento en que el agua ha sido adicionada hasta el punto en donde la curva alcanza la máxima consistencia.

Estabilidad. Diferencia entre el tiempo que transcurre desde que la curva alcanza las 500 UB hasta el momento en que la curva deja las 500 UB.

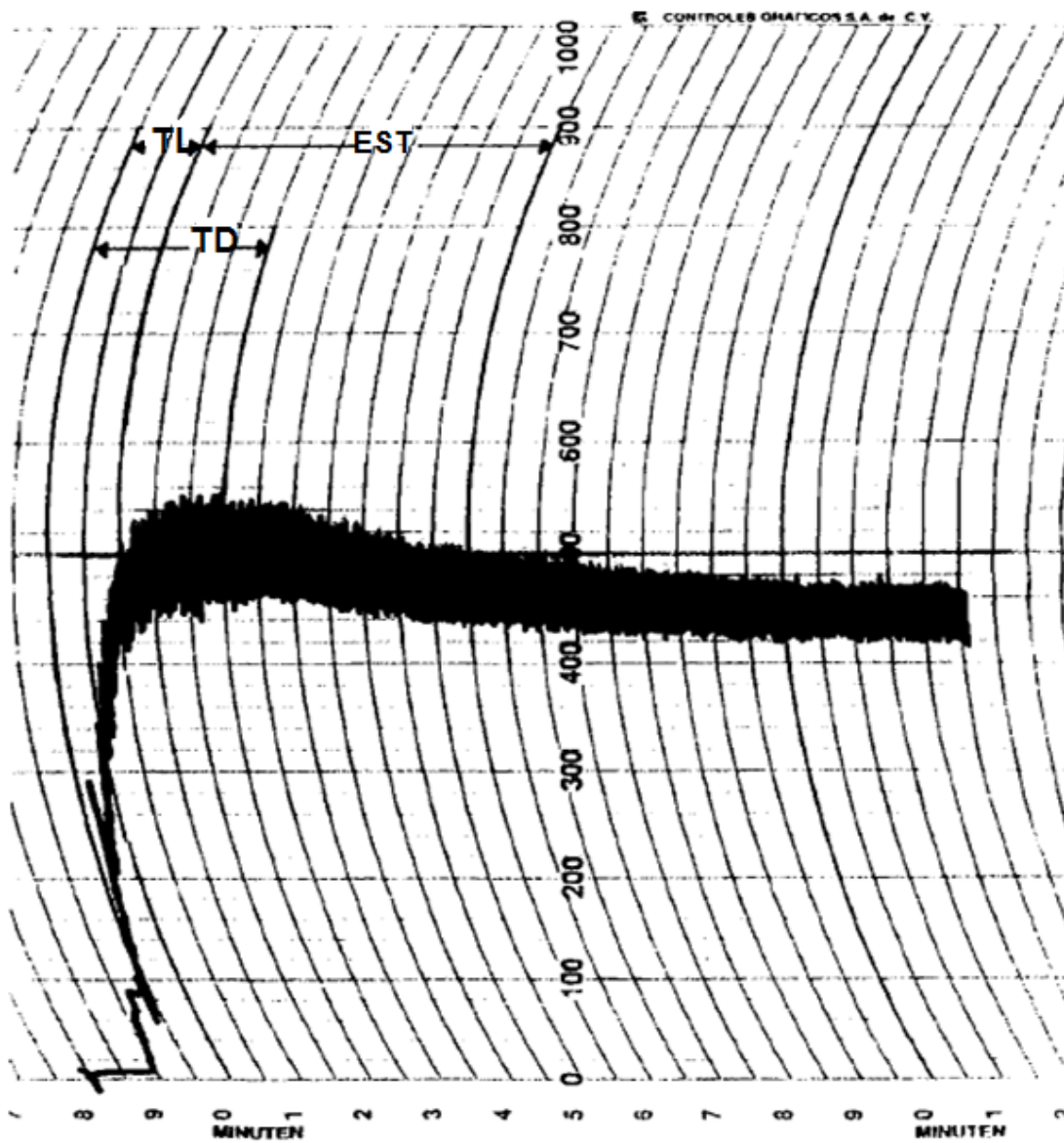


Figura 4. Farinograma Característico. TL= Tiempo de Llegada; TD= Tiempo de Desarrollo; EST= Estabilidad.

Proceso de Panificación

El objetivo principal del proceso de panificación es el de convertir una masa en estado fluido en un producto horneado sólido. Otro objetivo importante es el de lograr un aumento de volumen durante el horneado, debido a la expansión de la masa que se da durante esta etapa hasta que la estructura de la miga esté formada. La masa es un material que se resiste al efecto del flujo viscoso del horneado (Blanshard,1986).

La fuerza de panificación de la masa aumenta la expansión de las células de gas; dicho efecto, de expansión, fineza y homogeneidad en la expansión del gas le confieren la estructura a la miga. Otro cambio que ocurre durante el proceso de panificación no es tan evidente. La estructura de la masa con células de gas separadas es transformada en una especie de "esponja" en donde las células de gas están interconectadas (Blanshard,1986).

La gelatinización del almidón es el cambio más notable de la masa durante el proceso de panificación. Es la explicación más obvia para la transformación de una masa viscosa en un producto horneado sólido. La gelatinización se lleva a cabo en una serie de etapas a escala molecular que se traslapan en el tiempo, y se inicia con el hinchamiento de los gránulos del almidón y el incremento del volumen de éstos por la absorción de agua, después ocurre el ablandamiento cuando la estructura de los granos se pierde, continuando con la ruptura de los gránulos y la liberación de amilosa.

El hinchamiento y la liberación de amilosa causan un incremento en la viscosidad. El grado de gelatinización del almidón varía en cada producto horneado (Blanshard,1986).

Posteriormente, en la etapa de fermentación, la levadura y la harina son hidratadas en presencia del sustrato adecuado (azúcar). Esta operación se lleva a cabo bajo un control riguroso de temperatura y humedad. Una alta humedad relativa evita que la masa sufra una deshidratación que afectaría la calidad y rendimiento del producto final. Las células de la levadura una vez activadas atacan al sustrato más disponible, que son azúcares (sacarosa, fructosa y glucosa), produciendo ácidos orgánicos. El gas es en su mayoría atrapado y acumulado en la red de gluten de la masa (Serna Saldívar,1996).

Las temperaturas del horneado pueden variar de un horno a otro y con el producto, pero típicamente se encuentran entre los 220-250 °C. Un parámetro fundamental en el volumen del pan es obtener una temperatura en el centro de la masa entre 92-96 °C al final del horneado, asegurando así que la estructura del producto se ha formado por completo.

A medida que la masa se calienta pasa progresivamente por una serie de cambios físicos, químicos y bioquímicos. La estabilidad estructural se mantiene por la expansión del gas atrapado. La velocidad de gelatinización depende en gran medida de la cantidad de agua. El proceso de gelatinización comienza a baja temperatura y su progreso es mayor a medida que se aumenta la cantidad de agua (Blanshard,1986).

La expansión es causada en su mayoría por la producción de gas, y por la evaporación del agua y del bióxido de carbono que está disuelto en la masa. Una de las razones de su restricción es la resistencia del material viscoso a fluir entre las células de gas. Durante el horneado la viscosidad de la masa primero disminuye. Cuando la temperatura se eleva posteriormente, su viscosidad aumenta rápidamente. La combinación de la evaporación y los cambios en las propiedades reológicas llevan a una pérdida en la retención del gas (Blanshard,1986).

Funcionalidad de los Componentes de la Harina

La harina es el componente más importante en todos los productos derivados de la panificación; sus constituyentes químicos afectan la funcionalidad y las características del producto terminado. Los factores que determinan la calidad de una harina son la cantidad y la calidad de la proteína. La calidad de la proteína está relacionada con las proteínas del gluten, las cuales le dan las características únicas que posee y pertenecen a dos grupos principales que son a) Gliadinas, responsables de la cohesividad de la masa y b) Gluteninas, las que le confieren la elasticidad (Hoseney, 1991).

Los carbohidratos, proteínas, lípidos y agua son los constituyentes químicos que determinan las propiedades de la masa y las características sensoriales del pan, afectando la funcionalidad y las características del producto final (Serna Saldívar,1996).

Proteínas

La proteína es el componente que más afecta la funcionalidad y la calidad de los productos de trigo. Esto debido a que importantes factores como absorción de agua, tiempo de amasado y estabilidad están en función de la cantidad y la calidad de la proteína (Serna Saldívar,1996). Las proteínas del gluten son las únicas que juegan un papel fundamental en la transformación de la harina en masa y su funcionalidad está determinada por la concentración y la calidad (Blanshard,1986). Las gliadinas son un amplio grupo de proteínas con propiedades similares. Son de cadena simple y son muy pegajosas cuando están hidratadas. Tienen poca o nula resistencia a la extensión y son las responsables de la cohesividad de la masa. Las gluteninas son otro grupo amplio de proteínas. Son de cadena ramificada. Son elásticas, pero no cohesivas, y confiere a la masa su propiedad de extensión (Hoseney,1991).

La combinación de ambos grupos de proteínas es responsable de las propiedades viscoelásticas que permiten a la masa ser procesada en pan u otro alimento.

Carbohidratos

Los principales carbohidratos que se encuentran presentes en la harina de trigo son: almidón, azúcares simples y pentosanas. El almidón es el constituyente principal, siendo aproximadamente 70% del peso a un 14% de humedad. Su gránulo está compuesto de amilosa y amilopectina en proporciones de 1:3, como se muestra en la **Figura 5**.

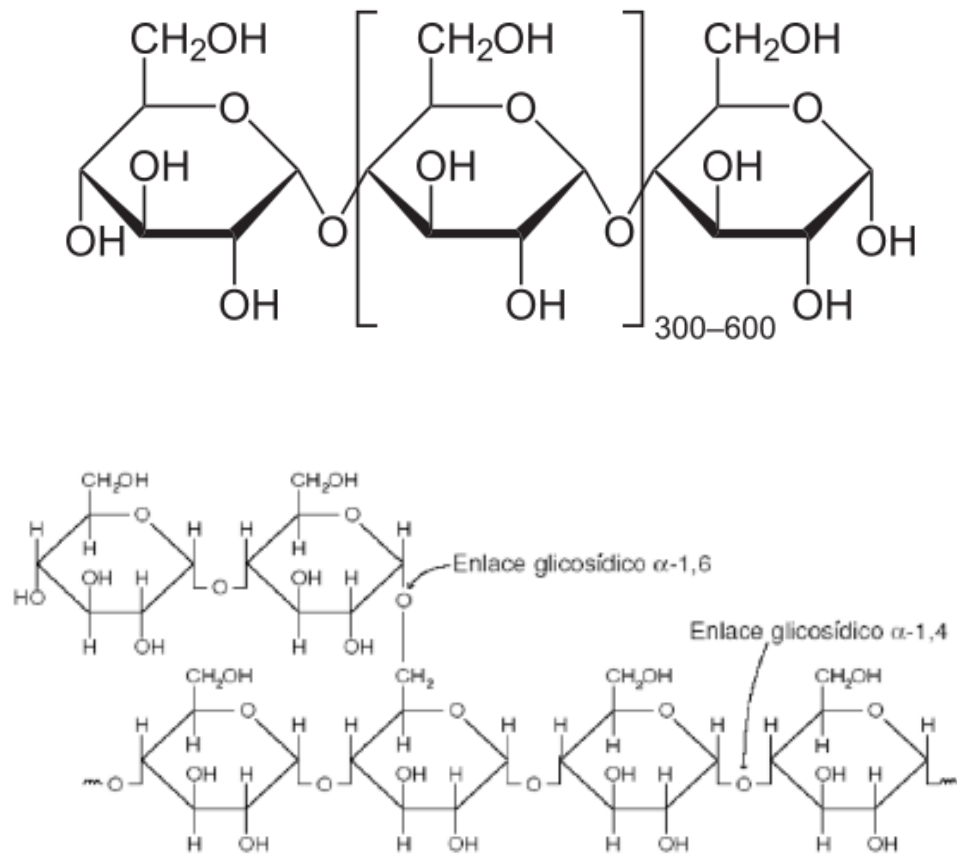


Figura 5. Estructura Química de la amilosa y la amilopectina

Fuente: Serna Saldívar, 1996.

Lípidos

El contenido de lípidos o triglicéridos en la harina de trigo es de aproximadamente un 2%, los cuales incluyen diferentes tipos de ácidos grasos como el ácido mirístico, palmítico, palmitoleico, esteárico, oleico, linoleico y linolénico. La composición de los lípidos es altamente heterogénea. Los lípidos de la harina, en pequeñas cantidades producen una disminución en el volumen, e incrementan la firmeza del pan, esto debido a la interacción de los lípidos con la proteína, afectando ambos parámetros (Salazar García, 2004).

Agua

El agua al mezclarse con la harina por medio de un movimiento mecánico, desarrolla la formación del gluten, el cual forma la estructura deseable durante la panificación. La harina de trigo tiene una absorción de agua de aproximadamente 60 a 61%. La distribución del agua en la masa es tal que generalmente un 31% interactúa con las proteínas (gliadinas y gluteninas), el 46% con el almidón y un 23% se liga con las pentosanas (Serna Saldívar, 1996).

Aspectos Reológicos

Conceptos Básicos

La reología es la ciencia que estudia el flujo o la deformación de los materiales cuando una fuerza o conjunto de fuerzas externas actúan sobre ellos. Con el objetivo de lograrlo, los reólogos estudian el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales bajo condiciones experimentales controladas. Los conceptos básicos fundamentales para una caracterización reológica son los de esfuerzo, deformación relativa y velocidad de deformación relativa.

La respuesta reológica de un material puede ser expresada de manera física a través de esfuerzos, que a su vez pueden ser expresados matemáticamente a través de funciones ya sea de la deformación y la velocidad de deformación o bien de la deformación y el tiempo (Goodwin y Hughes, 2000).

El *esfuerzo* se define como la fuerza dividida por el área donde se aplica. Existen dos tipos de esfuerzos: los que actúan en una dirección paralela a la superficie del material que deforman, llamados *esfuerzos cortantes*, y los que actúan en una dirección perpendicular a ésta, llamados *esfuerzos normales*. La ventaja de utilizar esfuerzos en lugar de fuerzas es que al utilizar los primeros se puede caracterizar un material independientemente del tamaño o la forma de la muestra (Rao,1999 ; Goodwin y Hughes, 2000).

La *deformación relativa* es una medida del desplazamiento relativo entre las partículas de un material y se define siempre como la relación entre dos cantidades con unidades de longitud; por lo tanto, es una cantidad adimensional. Otro concepto de interés reológico es la velocidad a la cual ocurre la deformación, esto es, la *velocidad de deformación relativa*, que tiene unidades de $(\text{tiempo})^{-1}$ y es la derivada de la deformación relativa con respecto al tiempo (Rao,1999; Goodwin y Hughes, 2000).

Propiedades Reológicas

Definir los procesos de flujo y deformación de materiales en términos de esfuerzos y deformaciones relativas, tiene diversos beneficios ya que de esta manera es posible determinar las propiedades reológicas experimentalmente. Dos propiedades experimentales útiles son:

$$\text{Viscosidad} = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Velocidad de Deformación Relativa}} \quad \text{Ec.(1)}$$

$$\text{Módulo} = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación Relativa}} \quad \text{Ec.(2)}$$

varios tipos de viscosidades y módulos, cuyo empleo depende de la cinemática del experimento en cuestión. La *viscosidad* es una propiedad importante de los fluidos, y se manifiesta cuando el fluido opone resistencia a la deformación. En la literatura es reportada con mayor frecuencia la *viscosidad de corte*, la cual proporciona una medida de la dificultad de hacer fluir un material bajo esfuerzos de cortantes. La *viscosidad extensional biaxial* es una medida de la dificultad de hacer fluir a los materiales bajo esfuerzos de extensión, en donde el flujo producirá un esfuerzo de tensión radial, debido a la compresión del material entre dos platos paralelos (Menjívar, 1990). Por otro lado, también existen diferentes tipos de materiales o fluidos que son clasificados como *Newtonianos* o *No-Newtonianos*. Dentro del primer grupo se encuentran los gases y a la mayoría de los líquidos, los cuales se basan en la ley de Newton de la viscosidad. Por otro lado, los fluidos No-Newtonianos se caracterizan por que su viscosidad puede aumentar o disminuir cuando se le aplica una acción de corte constante (Darby,1976).

Ecuaciones de Estado Reológicas

Comportamiento Ideal

Es de gran utilidad expresar en valores numéricos la información reológica, ya que de esta manera se facilita el desarrollo de una ecuación de estado reológica. Dichas ecuaciones reúnen la información reológica de un material de tal manera

que su comportamiento pueda predecirse bajo condiciones específicas de flujo y deformación.

Las ecuaciones se expresan como funciones que relacionan el esfuerzo con la deformación relativa y el tiempo o con la velocidad de deformación relativa. Las ecuaciones de estado reológicas más conocidas se muestran a continuación:

Ley de Hooke (Sólido completamente elástico):

$$\sigma = G\gamma \quad \text{Ec.(4)}$$

Y la Ley de Newton de la viscosidad (Fluido completamente viscoso):

$$\sigma = \mu\dot{\gamma} \quad \text{Ec.(5)}$$

Dónde:

$$\sigma = \text{Esfuerzo} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

γ = Deformación Relativa (adimensional)

μ = Viscosidad Newtoniana (Pa · s)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de Deformación Relativa $\left(\frac{1}{\text{s}} \right)$

Para un fluido newtoniano, la energía que se le aplica al hacerlo fluir se disipa en forma de calor, mientras que en el caso de un sólido se utiliza la Ley de Hooke, la energía aplicada al deformarlo se almacena como energía potencial, la cual es recuperable (Goodwin y Hughes, 2000)

Desviaciones con respecto al comportamiento ideal

Las desviaciones que se muestran con mayor frecuencia en los alimentos son la disminución de la viscosidad al incrementar la velocidad de deformación relativa (comportamiento pseudoplástico) y la presencia de un esfuerzo inicial aparente, es decir, un esfuerzo mínimo necesario para hacer fluir el material (plástico de Bingham); ambas desviaciones pueden observarse en el comportamiento de las masas (Rao,1999).

Los modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los fluidos No-Newtonianos son dos: el modelo de Bingham y la Ley de la Potencia, cuya ecuación es la siguiente:

$$\tau = m (\dot{\gamma})^n \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

τ = Esfuerzo cortante (Pa)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte (s^{-1})

m = Índice de Consistencia ($Pa \cdot s^n$)

n = Índice de comportamiento de flujo (Adimensional)

El modelo de la Ley de la Potencia a su vez está regido por dos parámetros que son el índice de comportamiento de flujo (n) y el índice de consistencia (m). Dependiendo del valor obtenido para cada parámetro, se determinará qué tipo de fluido es; esto es, si $n=1$ es un flujo Newtoniano (donde $m = \mu$), si $n > 1$ el flujo es dilatante, y si la $n < 1$ el fluido será pseudoplástico, como se muestra en la Figura 6 (Darby,1976).

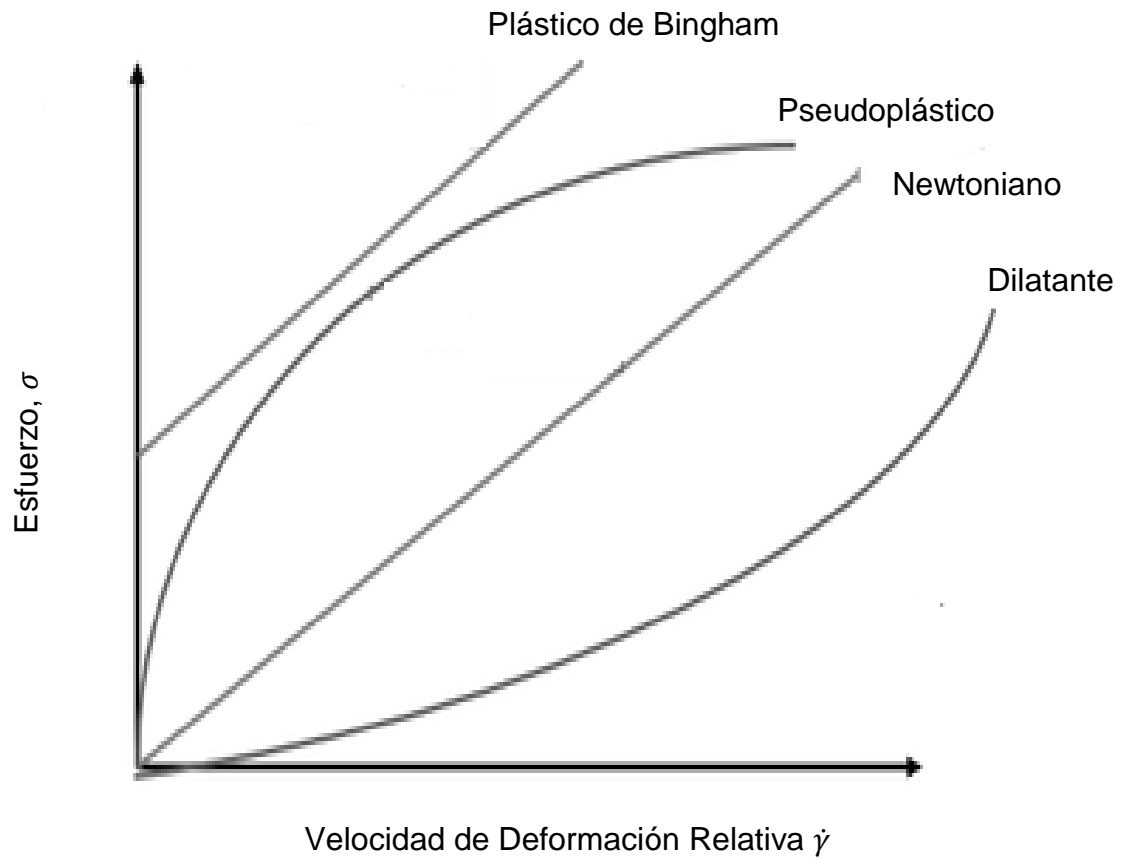


Figura 6. Desviaciones del Comportamiento Ideal en Fluidos
Fuente: Goodwin y Hughes, 2000.

Materiales Viscoelásticos

Las masas de harina de trigo, además de otros materiales macromoleculares y coloidales, muestran un comportamiento tanto elástico como viscoso; por lo tanto, toman el nombre de materiales viscoelásticos (Menjívar, 1990). Este tipo de materiales tienen la capacidad de utilizar la energía aplicada en ambos procesos: generación de calor (proceso viscoso) y almacenamiento de energía (proceso elástico). Esto debido a que, para dichos materiales, el esfuerzo no es función únicamente de la deformación o de la velocidad de deformación, sino una combinación de ambas (Faubion y Hosney, 1990).

El comportamiento viscoelástico de las masas de harina de trigo no es lineal. Las relaciones esfuerzo/deformación (módulo aparente) y esfuerzo/velocidad de deformación (viscosidad aparente) no son constantes, sino funciones del esfuerzo.

Sin embargo, la viscoelasticidad de las masas muestra un comportamiento lineal a deformaciones muy bajas, por lo que un análisis adecuado de sus propiedades debe llevarse a cabo mediante pruebas realizadas a este nivel de deformación (Salazar García, 2004).

Estudios Reológicos en Masas

Métodos Empíricos

La industria de la panificación ha utilizado principalmente métodos empíricos e imitativos para caracterizar la reología en masas (Menjívar,1990). En la **Tabla 2** se muestran algunos ejemplos. Sin embargo, las principales limitaciones de estos métodos son: (1) los resultados no pueden describirse en propiedades reológicas y (2) los resultados únicamente representan un punto en el espectro de las numerosas propiedades reológicas importantes de las masas.

Métodos Fundamentales

A fin de realizar mediciones fundamentales de las propiedades reológicas de materiales cuyo comportamiento no es lineal, tales como las masas de trigo, es indispensable utilizar formas de muestras y patrones de carga que ocasionen deformaciones relativas tan constantes y homogéneas como sea posible. Los resultados producidos por muchos instrumentos utilizados para realizar pruebas reológicas a masas no pueden ser expresados en términos físicos fundamentales. Esto se debe, entre otras causas, a que la geometría de las muestras bajo análisis no está controlada y es impredecible, por consecuencia, las deformaciones relativas impuestas a la muestra son complejas y no pueden ser consideradas uniforme (Faubion y Hosenev, 1990). Los patrones de carga o deformación apropiados para el uso en la medición de las propiedades viscoelásticas de las masas se pueden caracterizar como transientes y dinámicos.

Tabla 2. Ejemplos de Métodos Empíricos e Imitativos

Tipo	Método	Propiedad Reológica Evaluada	Características Generales
Empíricos	Consistómetro Bostwick	Consistencia	Parámetros útiles, pero no bien definidos
	Viscosímetro	Consistencia	Relativamente Económico
	Extensígrafo	Resistencia, Extensibilidad	Rápidos, Resistentes
Imitativos	Farinógrafo	Tiempo de Mezclado	Parámetros empíricos medidos bajo condiciones que simulan la aplicación
	Alveógrafo	Resistencia, Extensibilidad	Utilidad basada en la experiencia

Fuente: Menjívar, 1990

En todos los casos la razón para conocer estos patrones es la capacidad de relacionar el esfuerzo con la deformación relativa y el tiempo (Faubion y Hosney, 1990).

Prueba de Compresión Uniaxial

La *Compresión Uniaxial* (siendo la fuerza aplicada en una sola dirección) se basa en la compresión de un material fluido entre dos platos paralelos. De acuerdo a Campanella y Peleg (1987), hay cuatro tipos de arreglos geométricos, cuyo objetivo es simplificar ambas técnicas y una interpolación reológica apropiada de los resultados. Tales arreglos pueden ser basados sobre un área constante o un volumen constante o alternativamente basado en cargas constantes o rangos constantes de deformación. El flujo de compresión se utiliza para polímeros fundidos, asfalto y otros materiales muy viscosos. El análisis matemático del flujo de compresión con o sin lubricación ha sido revisado extensivamente en la literatura sobre reología y polímeros. Campanella y Peleg (1987) recomendaron la ecuación para fluidos de la Ley de la Potencia en orden para aplicarlos a fluidos bajo ambos rangos de deformación constante y carga constante. Chatrei y col (1981) realizaron un análisis teórico para la viscosidad extensional biaxial de un líquido polimérico de alta viscosidad entre platos paralelos lubricados.

Reología de la Masa de Harina de Trigo

Las masas de trigo son materiales viscoelásticos que muestran simultáneamente atributos de sólido-elástico y líquido viscoso. Las propiedades reológicas de las masas describen como se lleva a cabo su deformación, flujo y ruptura, y también proporcionan información importante sobre la "calidad de los materiales,

propiedades mecánicas de la masa y de las características del producto terminado” (Faridi, 1985). El reconocimiento de la importancia del comportamiento de la viscosidad, la elasticidad y la ruptura, en caracterización de masas llevan a desarrollar algunos equipos industriales para pruebas de masas (Bagley y Christianson, 1986).

Métodos para Evaluar Propiedades Reológicas de la Masa de Harina de Trigo

Compresión Uniaxial con Lubricación

Éste método emplea un texturómetro que proporciona resultados que pueden ser interpretados en términos de viscosidad extensional biaxial (Chatrei y col, 1981). Para llevar a cabo lo anteriormente descrito, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: a) ausencia del efecto de la pared, b) trabajar con fluidos incompresibles, c) efectos de gravedad despreciables, d) dirección de flujo radial y e) deformación homogénea, lo cual implica un perfecto desplazamiento entre la muestra y la pared. El desarrollo matemático que se sigue para la evaluación de la viscosidad extensional es sugerido por Chatrei y col (1981) y modificado posteriormente por Campanella y Peleg (1987).

Para la obtención de lo mencionado anteriormente se utiliza un texturómetro a una velocidad de cabezal constante, es decir, desplazamiento constante. Los componentes de la velocidad física para un sistema de coordenadas son los siguientes:

$$V_z = \dot{\epsilon}_t H \quad \text{Ec. (7)}$$

$$V_r = \dot{\epsilon}_t r/2 \quad \text{Ec. (8)}$$

$$V_e = 0 \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:

V_z, V_r y V_e = Componentes normal (vertical), radial y angular $\left(\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right)$

H = Altura de la muestra como ésta va cambiando con el tiempo (cm)

R = Distancia radial (cm)

$\dot{\epsilon}_t$ = Velocidad de deformación momentánea $\left(\frac{1}{s}\right)$ a velocidad de deformación momentánea, la cual se define de la siguiente manera:

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{1}{H} \frac{dH}{dt} \quad \text{Ec. (10)}$$

El texturómetro operado a velocidad de desplazamiento constante:

$$V_z = -\frac{dH}{dt} \quad \text{Ec. (11)}$$

Los valores de V_z y H se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$H = H_0 - V_z t \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

H_0 = Altura inicial de la muestra sin deformar (cm)

T = Tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba (s)

H = Altura instantánea de la muestra al tiempo x (cm)

Sustituyendo las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (10), la velocidad de deformación instantánea está dada por:

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{V_z}{H_0 - V_z t} \quad \text{Ec. (13)}$$

La diferencia de esfuerzos normales es obtenida dividiendo la fuerza entre el área de la sección transversal o la parte deformada de la muestra, en este caso, esta área constante.

$$\tau_{ZZ} - \tau_{RR} = \frac{F}{\pi R^2} \quad \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

F = Fuerza de compresión momentánea (N)

R = Radio del plato (cm)

De acuerdo a Campanella y Peley (1987), el flujo extensional es regulado por la función del material conocida como viscosidad extensional η_b , que puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\eta_b = \frac{\tau_{ZZ} - \tau_{RR}}{\dot{\epsilon}_r} \quad \text{Ec. (15)}$$

Dónde:

$\dot{\epsilon}_r$ = Velocidad de deformación extensional biaxial la cual es definida por la siguiente ecuación:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_t \quad \text{Ec. (16)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (13), (14) y (16), se obtiene la siguiente:

$$\eta_b = \frac{2FH}{\pi R^2 V_z} \quad \text{Ec. (17)}$$

Se observa que el cálculo de la viscosidad extensional es sencillo si se conoce la altura inicial de la muestra y la fuerza aplicada a las distintas alturas en los diferentes tiempos, obtenidos de la curva fuerza – deformación (Ramírez Wong,1996).

Tratamientos utilizados para Mejorar la Funcionalidad de las Fibras

Modificaciones Enzimáticas

Los tratamientos enzimáticos conducen a incrementos en el contenido de la fibra soluble. Las fuentes de fibra modificadas enzimáticamente muestran menor capacidad de retención de agua, lo cual puede ser ventajoso con fines tecnológicos. Además, este tipo de fibra tiene una textura más suave, lo cual facilita su uso en la formulación de productos (Reyes Pérez, 2013).

Modificaciones Mecánicas (Extrusión)

La cocción por extrusión es una técnica que se introdujo en 1930 en las industrias de cereales. Hoy en día este proceso se utiliza ampliamente, debido a la naturaleza que presenta dicha técnica, con la participación de altas temperaturas durante cortos períodos de tiempo, en donde el alimento es sometido a una combinación de presión, temperatura y rompimiento mecánico, resultando en reacciones químicas y transformaciones a nivel molecular, como la gelatinización de las moléculas de almidón, entrecruzamiento de proteínas y la producción de sabor que puede ser inducidos por la reacción de Maillard (Havck y Huber,1989; Richardson, 2001).

Tanto el mantenimiento como el incremento de la calidad nutricional de los alimentos durante el procesamiento al que se someten es siempre un área potencial importante para investigación. El deterioro de la calidad nutricional, debido a altas temperaturas, es un problema desafiante en los métodos de cocción más tradicionales (Sing et.al.,2006).

Beneficios de la Extrusión

Este proceso posee varias características positivas en comparación con otros procesos, debido a que el material es sometido a un rompimiento mecánico. Es capaz de romper los enlaces covalentes en los biopolímeros y facilitar la modificación de las propiedades funcionales de los ingredientes alimenticios y/o texturizarlos (Asp & Bjorck, 1989).

Por otro lado, desnaturaliza enzimas indeseables, inactiva algunos factores anti nutricionales (inhibidores de tripsina, taninos y fitatos), esteriliza el producto final y retiene los colores y sabores naturales de los alimentos. Muchos alimentos populares a base de cereales (bocadillos, cereales listos para comer y pastas) son producidas por el proceso de extrusión. Los extrudidos tienen características físicas y químicas diferentes a las del alimento original.

Reacciones Químicas durante la Extrusión

Almidón

El Almidón es un polisacárido formado por unidades de glucosa entrelazadas entre sí para formar largas cadenas. Existen dos tipos de moléculas de almidón: la amilosa y la amilopectina. La amilosa forma alrededor de 20 – 30 % de la cantidad total de almidón en los almidones nativos. Hay algunos almidones, tales como fécula de maíz, la cual contiene solamente amilopectina; otros sólo contienen amilosa. Estas diferentes proporciones de los dos tipos de almidón que se encuentran dentro de los granos de almidón de la planta le dan a cada almidón sus propiedades características en la cocción y formación de gel. En la extrusión, la amilosa y la amilopectina contribuyen a la formación de gel y viscosidad de la pasta cocida respectivamente (Sing et.al., 2006).

La extrusión también reduce el peso molecular de las moléculas de pectina y hemicelulosa, resultando en una solubilidad incrementada de agua (Ralet et al., 1990). La degradación térmica es el principal factor que contribuye a la pérdida de β – *carotenos* durante el proceso de extrusión.

En el caso de las vitaminas, su retención en la cocción por extrusión disminuye cuando aumenta la temperatura, la velocidad del tornillo y una entrada específica de energía.

Ingeniería de un Extrusor de Alimentos

Desde el punto de vista de ingeniería, un extrusor es una **bomba**. Existen extrusores de un solo tornillo y extrusores de doble tornillo, éstos últimos pueden ser mejores en comparación con un arrastre de la bomba. Los siguientes aspectos hacen a los extrusores particularmente interesantes para el procesamiento de productos alimenticios:

- a) El extrusor es un **intercambiador de calor**

- b) Los perfiles de presión y temperatura de transformación de la materia al pasar por el extrusor pueden (dentro de ciertos límites) ser elegidos por la variación del diseño del tornillo y las condiciones de funcionamiento.

- c) El grado de mezcla y corte impuesto en el material son parámetros que pueden ser influenciados por la combinación apropiada del diseño del tornillo, de matrices y los parámetros de funcionamiento.

- d) Debido a la acumulación de presión en el extrusor, la formación del producto final es relativamente fácil (Mercier et al., 1989).

Entre algunos atributos por los cuales la extrusión es muy utilizada, se encuentran los siguientes:

- 1) Su versatilidad, al combinar los ingredientes y las condiciones de operación del extrusor es posible procesar una amplia variedad de productos.
- 2) Costos reducidos, debido a los requerimientos de espacio por unidad de producción.
- 3) Elevada productividad, al presentarse como un sistema de procesamiento continuo su capacidad de producción incrementa.

- 4) Productos de alta calidad microbiológica y nutricional, al emplear temperaturas altas en periodos cortos de tiempo (HTST por sus siglas en inglés), se minimiza el peligro microbiológico, así como también la degradación de algunos nutrientes y se mejora la digestibilidad (por la pre gelatinización del almidón y desnaturalización de las proteínas).
- 5) Se pueden obtener diferentes formas y figuras del producto al utilizar distintos dados.

Funcionamiento Básico del Extrusor de un Solo Tornillo

Todo proceso de extrusión incluye una pre mezcla de los ingredientes, los cuales son alimentados por medio de un sistema horizontal o vertical, generalmente integrado a un sistema de pre mezcla o pre acondicionador. El material alimentado, una vez dentro de la boca del extrusor, fluye a través del tornillo que gira dentro del cañón.

El cañón esta generalmente provisto de varias secciones capaces de ser calentadas o enfriadas con vapor, bandas eléctricas, agua, aire y/o refrigerantes. La pared interna del cañón puede ser lisa, rayada en forma de espiral. La parte fundamental del extrusor es el tornillo (s), el cual tiene la función de hacer fluir el material de alimentación y sobretodo de propiciar los cambios deseados mediante el esfuerzo mecánico y fricción (Ananthan et al., 1996).

El sistema de dado o matriz tiene como función primordial formar el material plástico o cocido que corre a través del extrusor. Finalmente, el material formado que fluye del extrusor, es cortado por medio de un sistema de navajas simples o múltiples, las cuales giran a ciertas revoluciones a varios milímetros de la salida del dado (Mercier et al., 1989).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

En el presente estudio se utilizó harina de trigo y salvado de trigo (donados por el Molino la Fama, S.A. de C.V.) y grano de cebada Alina de la Central de Malta en Puebla. Los demás ingredientes fueron Manteca vegetal (marca INCA), azúcar (marca Zulka), levadura (marca Nevada) y sal (marca mar de Cortés) obtenidos en una tienda local de Hermosillo, Sonora. Se seleccionó el salvado de trigo y se separó en 2 diferentes fracciones:

Fracción Gruesa. Para esta fracción se utilizó la malla #8 de 930 μm para remover partículas grandes de salvado no aptas para el estudio, mientras que lo que pasó por la malla # 8 y lo que se retuvo por la malla #20 fue lo que consideró fracción gruesa, la cual tenía un rango de tamaño de partícula de 930 μm a 850 μm .

Fracción Fina. Para esta fracción se utilizó la malla #40 de 425 μm . Se consideró fracción fina a lo que pasó la malla #20 y se retuvo en la malla #40, con un rango de tamaño de partícula de 425 μm a 240 μm . También se consideró como parte de dicha fracción lo que pasó por la malla #40 y se retuvo en la malla #60, con un rango de tamaño de partícula de 240 μm a 200 μm , resultando en un rango final de entre 425 μm a 200 μm . La fracción fina fue la que se consideró y a su vez se utilizó para la experimentación.

Acondicionamiento

Al salvado de trigo se le adicionó agua destilada y se homogenizó mezclándolo por 20 min en un equipo acondicionador marca Chopin (Modelo París, Francia) hasta obtener un contenido total de humedad de 31 %.

El salvado de trigo se colocó en bolsas de polietileno, se refrigeró durante 12 horas y posteriormente a temperatura ambiente (antes de ser extrudido). Se acondiciona la muestra debido a que durante el proceso de extrusión se aplicará un conjunto de temperatura y presión, y la humedad amortiguará el aumento de dichas condiciones, ya que el agua ayuda a lubricar el paso de la muestra a través del tornillo en el extrusor.

Decorticación de Cebada

Se utilizó un decortificador (marca Strong-Scott, Modelo 17810) para obtener salvado a dos tiempos de decorticación (18 y 66 s respectivamente), en ambos casos con un tamaño de partícula menor a 0.28 mm, los cuales se utilizaron como parte de las mezclas de harina. El proceso de decorticación se utiliza para remover las capas externas del grano, como son la gluma, el pericarpio y capas intermedias. Al final del proceso es posible recolectar el grano perlado (sin las capas externas) y la harina de perlado (capas externas del grano).

Proceso de Extrusión

El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de un solo tornillo, mostrado en la **Figura 7** (marca Brabender, Modelo E 19/25 D, Inc. NJ USA). Bajo las siguientes condiciones: un perfil de temperatura de 60, 80, 100 y 120 °C, y un contenido de humedad de 31 %, la velocidad del tornillo permaneció constante (100 rpm), con una velocidad de alimentación de 50 rpm, la longitud al diámetro con una proporción de 25:1, una razón de compresión nominal 2:1 y una apertura del dado de 3 mm . Los parámetros del proceso de extrusión se seleccionaron en base a trabajos previos (Reyes Pérez, 2013). Lotes de 0.5 kg de salvado de trigo acondicionados se depositaron en la tolva de alimentación del extrusor.



Figura 7. Extrusor (marca Brabender, Modelo E 19/25 D, Inc. NJ USA).

Se ajustó el número de tornillo (no. 2), las temperaturas de las cuatro zonas del extrusor, velocidad del tornillo y velocidad de alimentación con los parámetros anteriormente mencionados.

Posteriormente al proceso de extrusión, los extrudidos se colectaron en charolas de aluminio y subsecuentemente el material se sometió a un proceso de secado en un horno de convección de aire a 60°C durante 1 hora.

Finalmente, todos los extrudidos se sometieron a una molienda y tamizado teniendo una fracción fina (>0.28 mm) utilizando una malla de 0.8 mm y un molino (marca Armfield, modelo 2666, tipo GW511P, Ipswich, Inglaterra). Cada una de las muestras extrudidas y molidas se almacenó en doble bolsa de plástico a una temperatura de 5°C hasta ser analizadas.

Mezclas de Harina

Se elaboraron 5 mezclas diferentes: Mezcla Control (100% de Harina de Trigo Blanca); 70% de Harina de Trigo Blanca más 30% de Salvado de Trigo sin Extrudir; 70% de Harina de Trigo Blanca más 30% de Salvado de Trigo Extrudido; 70% de Harina de Trigo Blanca más 30% Salvado de Cebada (tiempo de decorticación 18 segundos) y 70% de Harina de Trigo Blanca más 30% de Salvado de Cebada (tiempo de decorticación 66 segundos).

Una vez elaboradas las mezclas se procedió a homogenizarlas utilizando una mezcladora (Kitchen Aid Modelo MK 4555 WH St. Joseph Michigan USA). Las mezclas de harinas se colocaron en bolsas de polietileno y se refrigeraron a 4 °C hasta su utilización.

Prueba de Panificación

La prueba de panificación se llevó a cabo utilizando el **método 10-10B de la AACC (2001)**. La cantidad de agua a utilizar en la elaboración de la masa fue previamente determinada por la absorción obtenida en el farinógrafo para cada mezcla. Los ingredientes utilizados para la elaboración de pan fueron 300 g de Harina (dependiendo de la mezcla utilizada), 9 g de manteca vegetal, 22.5 g de azúcar, 5.1 g de levadura y 4.5 g de sal. Se elaboraron 5 panes control con las mezclas respectivas. Cada pan se elaboró por triplicado, resultando en total 15 panes para el estudio.

Posterior al horneado del pan a una temperatura de 250°C por 10 minutos, se dejó enfriar una hora y se procedió a evaluar. El peso del pan se determinó por medio de una balanza analítica. El volumen por desplazamiento de semilla de nabo en un medidor de volumen (marca National MFC Co, Lincoln, NE, EUA). El volumen específico se determinó con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen Específico} = \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}} \quad (20)$$

Análisis Químico

Se llevaron a cabo las siguientes determinaciones para la materia prima y de las harinas de perlado mediante los métodos oficiales de la AACC (2001): contenido de humedad (método 44-40 AACC, 2001), contenido de proteína (método 46-13, Micro Kejeldahl) y contenido de ceniza (método 08-03).

Análisis Reológico

Se determinó absorción de agua y tiempo de desarrollo de las diferentes mezclas elaboradas utilizando un Farinógrafo (marca Brabender, OHG, Duisburg, Alemania) mediante el método oficial de la AACC (método 54-21 AACC, 2001)

Determinación de Textura

La firmeza se define como la fuerza o esfuerzo que se requiere para comprimir un producto a una distancia preestablecida, la cual se determinó a las muestras de pan obtenidas por el método 74-09 de la AACC (2001), mediante un Texturómetro (marca Instron, Modelo 4465, Instron CO, Canton, MA ,EUA) bajo las siguientes condiciones: a) velocidad del cabezal de 100 mm/min, b) un cilindro de 70 mm de diámetro, c) celda de carga de 500 kg-f.

Evaluación de la Viscosidad Extensional Biaxial de las Masas

Método de Compresión Uniaxial con Lubricación

Éste método emplea un Texturómetro que proporciona resultados que pueden ser interpretados en términos de viscosidad extensional biaxial (Chatraei y col, 1981). Para llevar a cabo la determinación, se deben tomar las siguientes consideraciones: a) ausencia del efecto de pared, b) trabajar con fluidos incompresibles, c) efectos de gravedad despreciables, d) dirección de flujo radial y e) deformación homogénea; lo cual implica un desplazamiento entre la muestra y la pared. Las ecuaciones utilizadas para la evaluación de la viscosidad extensional son las sugeridas por Chatrei y col (1981) y modificado posteriormente por Campanella y Peleg (1987).

1) Preparación de las masas

Para preparar las masas utilizadas en la determinación se utilizaron 50 g de harina (en base a un 14% de humedad) a velocidad 2 en la amasadora de un Farinógrafo (marca Brabender, OHG, Duisburg, Alemania). La cantidad de agua añadida y el tiempo de mezclado óptimos se obtuvieron de los farinogramas de las muestras de harina previamente obtenidos.

2) Moldeo de las masas

Para evitar cualquier problema de deformación de la masa obtenida y como consecuencia, variaciones en la altura de la muestra, se utilizó un aro de acero inoxidable de 6.9 cm de diámetro interior y 2.65 cm de altura, mostrados en la **Figura 8**. El aro se colocó sobre el plato inferior, donde se realizó la prueba de compresión biaxial, mostrado en la **Figura 9**. El plato inferior se lubricó previamente para evitar la fricción. Después, se colocó la muestra sobre el plato inferior lubricado con el molde de hierro mostrado en la **Figura 9B**. Posteriormente se colocó un peso de 5 kg sobre la masa contenida en el aro durante medio minuto, esto a fin de obtener un disco de masa de 6.9 cm de diámetro y 7 mm de altura mostrado en la **Figura 9C**.

3) Prueba de Compresión Uniaxial con Lubricación

Una vez obtenido el disco de masa, se procedió a realizar la prueba de Compresión Uniaxial con lubricación. El plato con la muestra se colocó en la parte inferior de un Texturómetro (marca Instron, Modelo 4465, Instron CO, Canton, MA, EUA). Por otro lado, el plato superior (lubricado con vaselina previamente) se conectó al cabezal del Texturómetro y se desplazó hacia abajo sobre la muestra a una velocidad establecida de 1 mm/min.

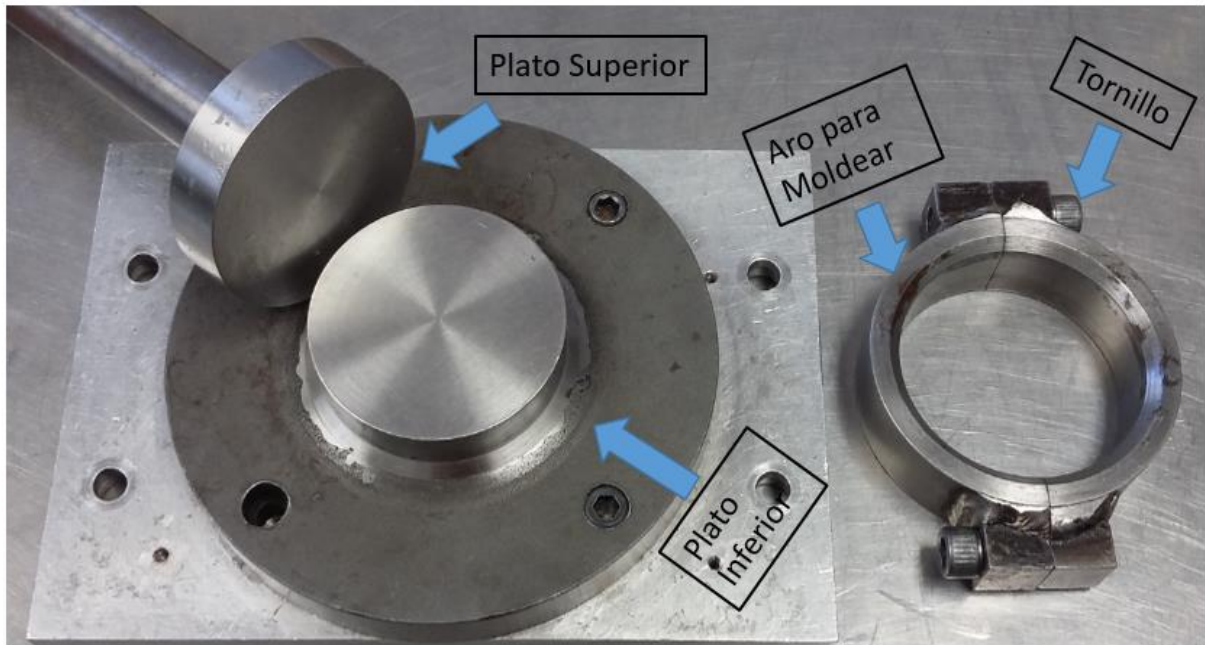


Figura 8. Platos utilizados en la prueba de compresión y aro de hierro para moldear la masa.

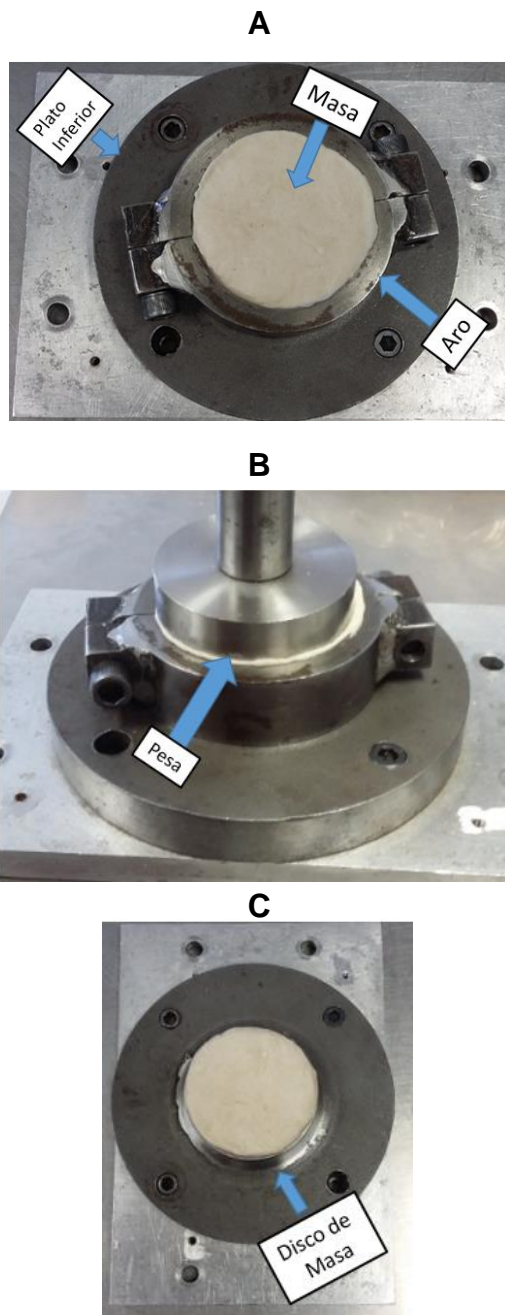


Figura 9. Etapas del Proceso de Moldeo de la Masa: (A) Colocación de la masa dentro del aro; (B) La pesa se coloca en el aro para moldear; (C) Se obtiene el disco de masa sobre el plato inferior.

Cuando se alcanzó una separación de 3 mm entre los platos del cabezal se detuvo, obteniéndose así una curva de fuerza vs deformación para cada prueba. Durante cada corrida se mantuvo la velocidad del cabezal constante ($V_z = \text{constante}$). De cada curva de fuerza - deformación se obtuvieron valores de fuerza para cada muestra de masa.

4) Cálculo de la Viscosidad Extensional Biaxial

La viscosidad extensional de las diferentes masas se calculó utilizando las ecuaciones desarrolladas por Chatrei (1981) y modificadas posteriormente por Campanella (1987). Dichos autores desarrollaron las ecuaciones para obtener la viscosidad biaxial extensional a una determinada velocidad de extensión biaxial radial en un sistema de coordenadas cilíndricas. Para obtener la viscosidad extensional se utiliza la **Ecuación 18**:

$$\eta_b = \frac{2 F(t) \times H(t)}{\pi R^2 V_z} \quad \text{Ec.(18)}$$

Dónde:

η_b = Viscosidad Extensional [=] $Pa \cdot s$

$F(t)$ = Fuerza de Compresión momentánea [=] N

$H(T)$ = Cambio de altura de la muestra con respecto al tiempo [=] cm

R = Radio de los platos [=] cm

V_z = Velocidad Normal en el sistema de coordenadas cilíndricas [=] $\frac{cm}{s}$

Para el cálculo de la velocidad de deformación extensional biaxial radial se utilizó la **Ecuación 19**:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{V_z}{2H(t)} \quad \text{Ec.(19)}$$

Dónde:

$\dot{\epsilon}_r$ = Velocidad Extensional Biaxial [=] $\frac{1}{s}$

V_z = Componente normal vertical

$h(t)$ = Altura Instantánea de la muestra variable con el tiempo

Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico

Para llevar a cabo la investigación se utilizó un diseño de experimentos completamente al azar, estableciendo como variable independiente la formulación de harina y como variables dependientes los distintos parámetros a analizar. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un grado de confiabilidad del 95%. Para observar la diferencia entre los distintos tratamientos se realizó la prueba de Tukey. El ANOVA se llevó a cabo utilizando el programa JMP, versión 5.0.1 (SAS Institute, Cary , NC,EUA 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proceso de Extrusión

Previo a la extrusión se ajustaron los parámetros de temperatura y presión, siendo el perfil de temperatura deseado de 60, 80, 100 y 120 °C, y un contenido de humedad de 31 %. La velocidad del tornillo permaneció constante (100 rpm), con una velocidad de alimentación de 50 rpm, la longitud al diámetro con una proporción de 25:1, una razón de compresión nominal 2:1 y una apertura del dado de 3 mm . Los extrudidos obtenidos se muestran en la **Figura 10**.

Análisis Químico de las Materias Primas

En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis químico de las materias primas utilizadas. En el caso de la humedad para la harina blanca de trigo se observa que el porcentaje obtenido es más alto, comparado con el de Reyes-Pérez (2013), que es de alrededor 11.27 %. Para el salvado de trigo sin extrudir se obtuvo un valor ligeramente diferente al reportado por Gómez (2011), mientras que para el salvado extrudido se obtuvo un valor significativamente diferente, esto puede deberse a diversos factores, entre ellos el acondicionamiento dado a la muestra antes de la molienda y al proceso de extrusión. Si el porcentaje de agua añadido es bajo el pericarpio conserva la humedad del grano, resultando así en una harina con un contenido de humedad adecuado pero salvado de baja humedad, como se da en este caso.



Figura 10. Extrudidos Obtenidos

Tabla 3. Análisis Químico de las Materias Primas¹

Muestra	Humedad %	Cenizas %	Proteína %
Harina de Trigo Blanca (Control)	16.14 ^a ± 0.55	0.75 ^c ± 0.74	12.46 ^c ± 0.07
Salvado de Trigo Sin Extrudir	11.48 ^b ± 0.55	6.87 ^a ± 0.20	15.87 ^a ± 0.10
Salvado de Trigo Extrudido	12.43 ^b ± 0.48	6.16 ^a ± 0.20	18.51 ^a ± 0.10
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Sin Extrudir	13.72 ^b ± 0.55	2.44 ^b ± 0.74	13.18 ^b ± 0.07
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	11.35 ^b ± 0.55	2.45 ^b ± 0.74	13.35 ^b ± 0.07
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	12.67 ^b ± 0.55	3.08 ^b ± 0.74	13.22 ^c ± 0.07
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	12.22 ^b ± 0.55	2.60 ^b ± 0.74	12.44 ^c ± 0.01

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de tres determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes (p<0.05)

Para el caso de las mezclas elaboradas (70% Harina de trigo blanca + 30% salvados de cebada y de trigo) se obtuvieron valores similares, dado que la mezcla en su mayoría es de harina de trigo blanca. De acuerdo a la prueba de Tukey, la mezcla control mostró una diferencia significativa en comparación con las otras mezclas, las cuales no tuvieron diferencia entre sí.

Por otra parte, el contenido de cenizas obtenido es similar al reportado por Yan (2015) de 5.5 % en el caso del salvado de trigo sin extrudir y de 4.92 % para el salvado de trigo extrudido. La diferencia en el porcentaje de cenizas entre el salvado de trigo y la harina de trigo blanca se puede deber a que el grano presenta en su corteza una gran cantidad de vitaminas y minerales, la cual está formada por el pericarpio y al ser removida durante el proceso de molienda la harina queda con bajo porcentaje de estos componentes y el salvado o pericarpio con valores más elevados (Hemery y col., 2007). Lo mismo sucede en el caso del salvado de cebada a dos tiempos de decorticación, donde las fracciones, que son las capas más externas del grano presentan mayor contenido de cenizas con respecto a la harina utilizada, en este caso harina comercial. De acuerdo a la prueba de Tukey, tanto la mezcla control como los salvados de trigo (extrudido y sin extrudir) tuvieron diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos.

Para el caso del contenido de proteínas, el valor obtenido para la harina de trigo blanca es similar al reportado por Reyes (2013), mientras que en el caso de las mezclas de harina con salvado de trigo sin extrudir y extrudido presentaron diferencias significativas al resto, siendo el salvado de trigo extrudido el que obtuvo el valor más alto, similar al reportado por Sudha et al., (2005).

Por otro lado, la diferencia en el contenido de proteína en las harinas de trigo con salvado de cebada se puede deber al nivel de decorticación, presentando el salvado de cebada de 66 segundos de decorticación menor porcentaje que el salvado de 18 segundos de decorticación, ya que el primero se decortico 3.6 veces más que el segundo, lo que provoca mayor remoción del endospermo y por consiguiente un decremento en el porcentaje de proteína. De acuerdo a la prueba de Tukey, el valor más alto y con más significancia fue el del salvado de trigo extrudido; tanto la mezcla con salvado de trigo sin extrudir como la mezcla con salvado de trigo extrudido tuvieron diferencias significativa con respecto a las mezclas con salvado de cebada (tiempo de decorticación 18 s y 66 s).

Evaluación Reológica

Se llevaron a cabo farinogramas de las diferentes mezclas utilizadas para determinar la absorción de agua y el tiempo de desarrollo o tiempo óptimo de amasado (tiempo en que la masa alcanza su máxima consistencia).

En el caso de la mezcla con salvado de trigo extrudido, el tiempo de desarrollo se incrementó considerablemente, así como la tenacidad, en comparación con la mezcla de salvado de trigo sin extrudir. Dicho incremento se puede atribuir a la interacción fibra-gluten que evita o previene la hidratación de la proteína, por lo que tarda más tiempo en alcanzar su consistencia óptima. De acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey, la mezcla con salvado de trigo extrudido obtuvo el valor más significativo en comparación de los otros tratamientos, de los cuáles la mezcla con salvado de trigo sin extrudir y con salvado de cebada tiempo de decorticación 18 s no tuvieron diferencias significativas entre sí, mientras que la mezcla control y la mezcla con salvado de cebada tiempo de decorticación 66 s mostraron diferencias significativas.

En general, se observó un incremento importante en la absorción de agua de las masas cuando el salvado (de cebada y de trigo, en este caso) fue añadido, en el caso del salvado de trigo extrudido el incremento fue bastante notorio en comparación a la mezcla control, como se muestra en la **Tabla 4** y en la **Figura 11**. Dichas observaciones son consistentes con las reportadas por Sanz Panella et al. (2008) tras la adición de diferentes tipos de salvado.

Éste efecto puede ser debido al alto contenido de fibra del salvado, específicamente de pentosanos, los cuales tienen una alta capacidad de absorción (Hoseney, 1991), similar al efecto que produce la adición de fibra a la absorción de agua.

Este fenómeno se basa parcialmente en que la estructura de la fibra contiene un gran número de grupos hidroxilo, los cuales interactúan con los enlaces de hidrógeno del agua (Rosell et.al., 2001). También se notó que al incrementarse el tiempo de decorticación de la cebada, aumentó la absorción del agua pero disminuyó el tiempo de desarrollo, como se muestra en la **Figura 12**. De acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey, el valor más significativo fue el de la mezcla con salvado de trigo extrudido, en comparación a la mezcla con salvado de trigo sin extrudir y la mezcla con salvado de cebada de tiempo de decorticación de 66 s, las cuales tuvieron diferencias significativas con la mezcla control y la mezcla con salvado de cebada tiempo de decorticación 18 s.

Tabla 4. Absorción de Agua y Tiempo de Desarrollo obtenidos con el Farinógrafo¹

Muestra	Absorción de Agua (%)	Tiempo de Desarrollo (min)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Trigo Extrudido	74.6 ^a ± 0.47	7.5 ^a ± 0.05
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Trigo sin Extrudir	68.8 ^b ± 0.47	5 ^b ± 0.05
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	63 ^c ± 0.47	5 ^b ± 0.05
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	67.2 ^b ± 0.47	3.5 ^d ± 0.05
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	60.2 ^c ± 0.47	4 ^c ± 0.05

¹Los valores están expresados en base seca

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes (p<0.05).

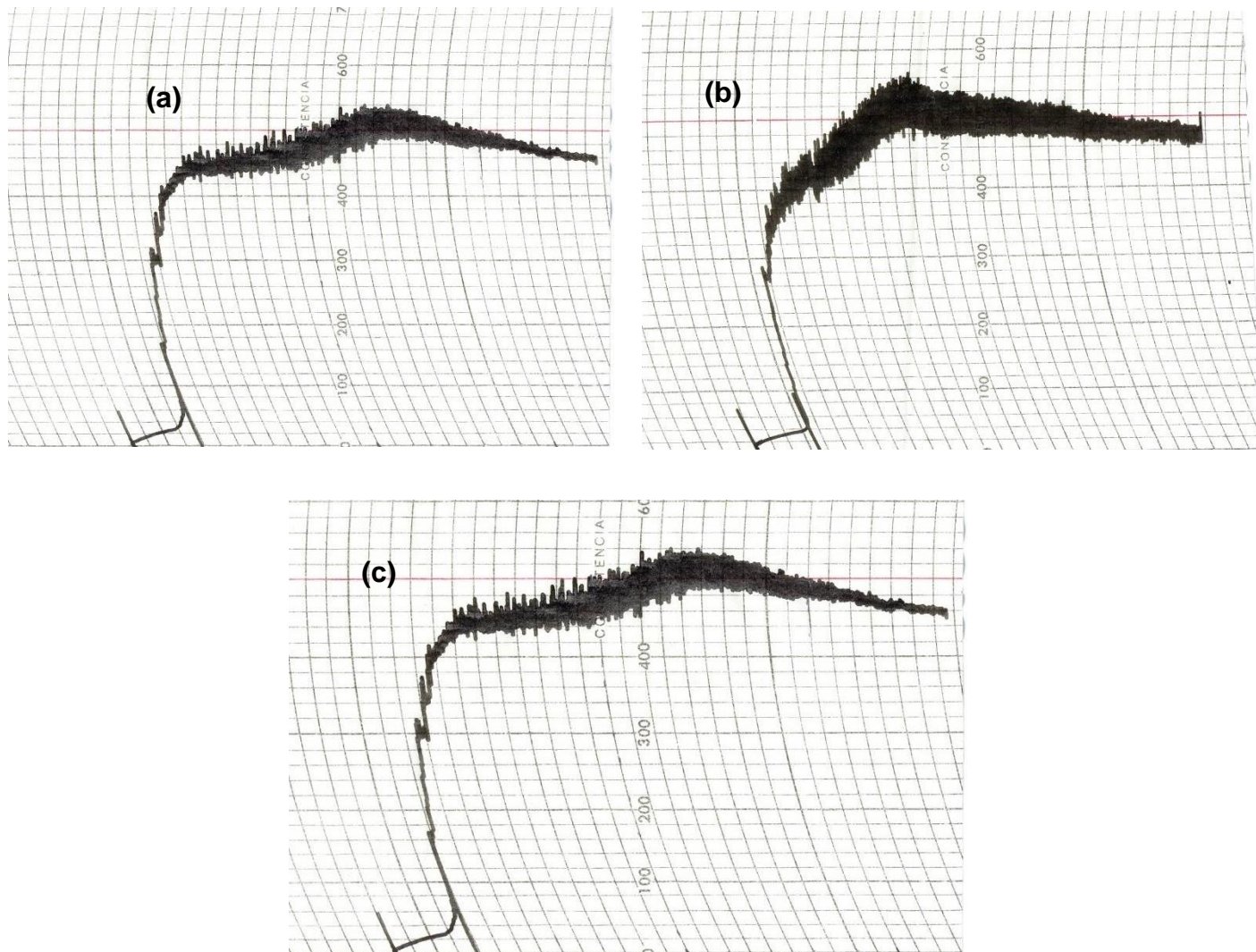


Figura 11. Comparación entre la absorción de agua entre la Harina de Trigo Blanca (a), la Mezcla de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir (b) y la Mezcla de Harina Blanca + Salvado de Trigo Extrudido (c)

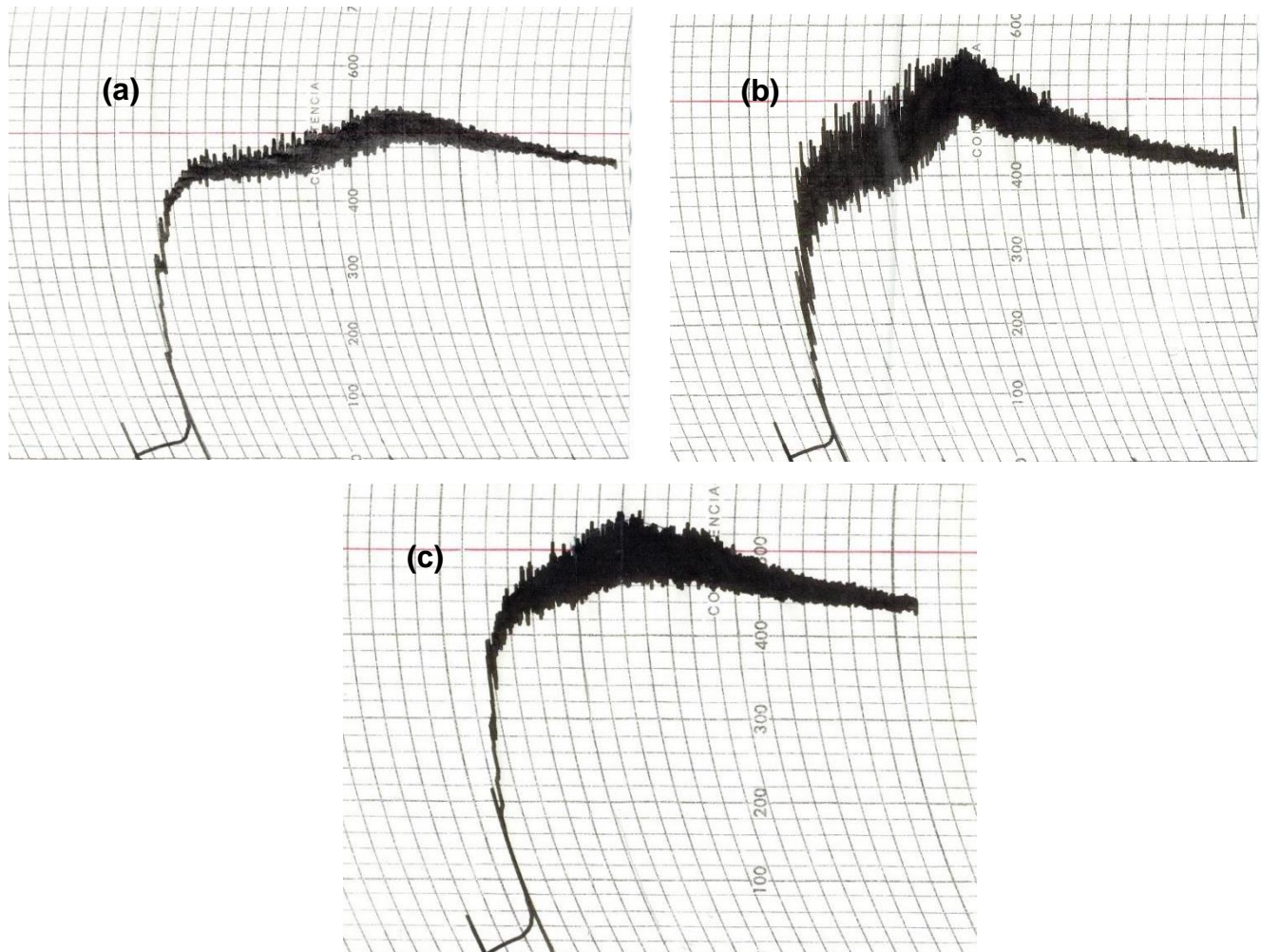


Figura 12. Comparación entre la absorción de agua entre la Harina de Trigo Blanca (a), la Mezcla de Harina De Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s (b) y la Mezcla de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s (c)

Evaluación de la Textura del Pan

En la **Tabla 5** se muestran los valores obtenidos para la fuerza al 25% de deformación, donde se observa que la fuerza requerida para comprimir el pan es mayor con la mezcla de harina de trigo blanca y el salvado de cebada tiempo de decorticación menor (18 segundos) en comparación a la del tiempo de decorticación de 66 segundos y en comparación al resto de las mezclas analizadas, de las cuáles la mezcla control de harina de trigo mostró el valor más pequeño. De acuerdo a la prueba de Tukey, la mezcla de harina de trigo blanca con salvado de trigo sin extrudir y la mezcla control son significativamente diferentes en comparación a la mezcla de harina de trigo blanca con salvado de trigo extrudido y las mezclas con salvado de cebada (tiempo de decorticación 18 s y 66 s).

Con el tiempo de decorticación menor se removi6 sólo el 10% del peso del grano aproximadamente, lo que corresponde a casi toda la gluma o cáscara (la gluma conforma el 13% del peso del grano, de acuerdo con Newman y Newman, (2010), al adicionar tanto la fracción como la harina de cebada en la mezcla, el valor de textura será mayor. Se ha reportado que el tipo de fibra que se encuentra contenida en la cebada provoca una disminución en el volumen del pan debido a que causa un rompimiento en la red del gluten, con lo que la retención del CO₂ dentro de la masa será menor y la red tiende a colapsar, teniendo como resultado un pan con menor volumen, con miga menos porosa, menos suave y más densa, es por ello que se necesita más fuerza para comprimirlo (García Villa, 2013).

Tabla 5. Valores de la fuerza medida al 25% de deformación por gramo de muestra¹

Muestra	Fuerza al 25% de deformación (N)
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	14.1068 ^b ± 4.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Trigo sin Extrudir	33.468 ^b ± 4.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Trigo Extrudido	66.6656 ^a ± 4.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	64.033 ^a ± 4.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	51.0455 ^a ± 4.33

¹Los valores están expresados en base seca

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes (p<0.05).

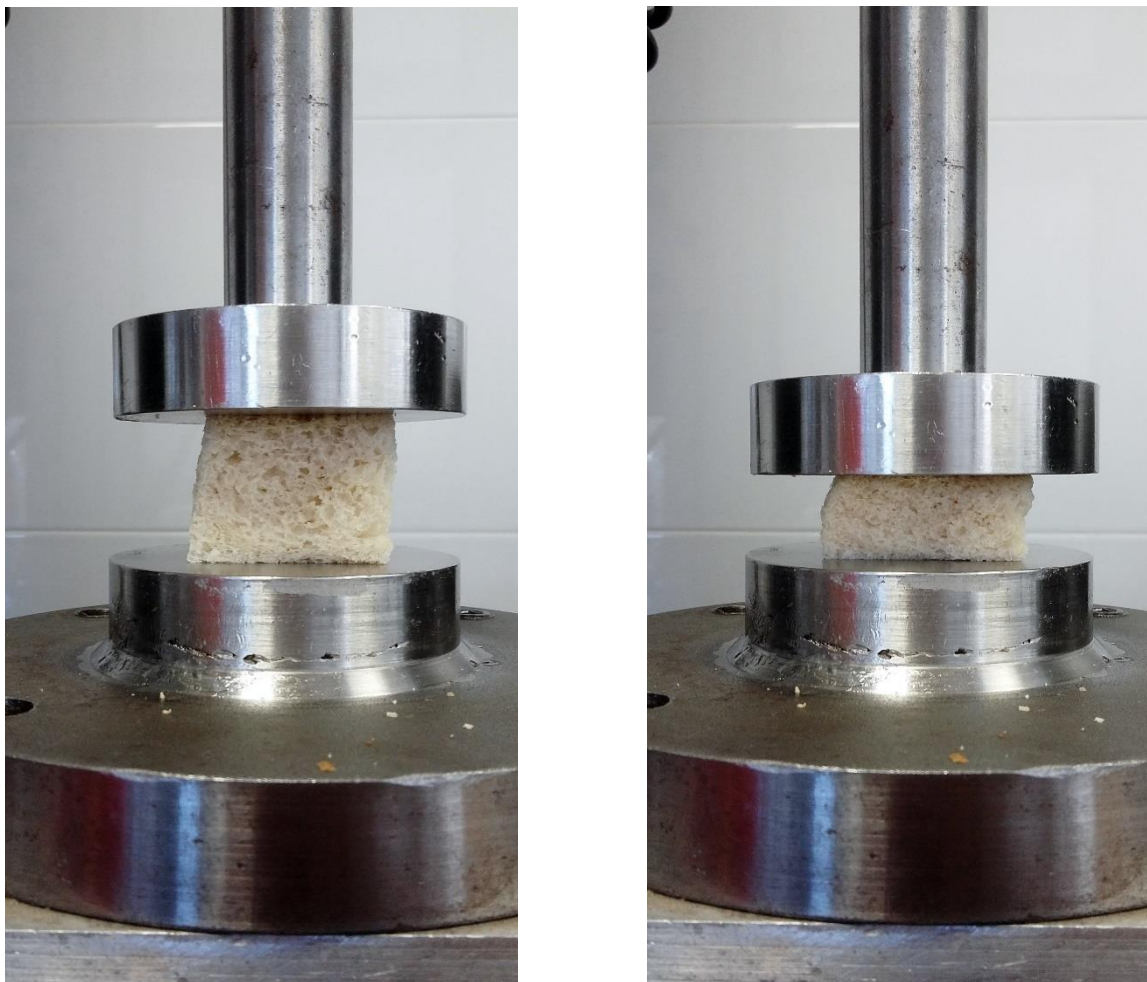


Figura 13. Antes y después de la realización de la prueba de compresión en el Texturómetro (marca INSTRON, modelo 4465, Instron CO. Canton, MA, EUA).

Por otro lado, se observa que al adicionar el salvado de trigo extrudido también se obtiene un valor alto en comparación a la mezcla que contiene al salvado sin extrudir, debido a que la miga del pan resultante es más compacta, es decir, más porosa y más densa, como previamente se mencionó en el caso del salvado de cebada. En la **Figura 13** se muestra una de las corridas experimentales.

Viscosidad Extensional Biaxial

En la **Figura 14**, se muestra la viscosidad extensional biaxial de 3 harinas (Harina de Trigo Blanca, Harina de Trigo + Salvado de Trigo Sin Extrudir y Harina de Trigo + Salvado de Trigo Extrudido, en la cual se muestra el error estándar que existe al interpolar al inicio, sin embargo, se observa que la harina de trigo blanca presenta una menor viscosidad en comparación a las harinas que contienen salvado de trigo (extrudido y sin extrudir), dentro de las cuáles se muestra que la harina con salvado de trigo extrudido presenta la mayor viscosidad. Por otro lado, también se puede observar que las tres formulaciones presentan al inicio el comportamiento de un fluido no newtoniano, observándose un aumento en la viscosidad, para posteriormente mostrar el comportamiento de un fluido newtoniano, en el que la viscosidad permanece constante.

Como se muestra en la **Figura 15**, se muestra la viscosidad extensional biaxial de 3 harinas (Harina de Trigo Blanca, Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s y Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s), de las cuales la mezcla de Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s presentó la mayor viscosidad, mientras que la Harina de Trigo Blanca mostró el valor más pequeño. La viscosidad disminuyó al aumentar el tiempo de decorticación. Se observa que al inicio, similar al caso de las

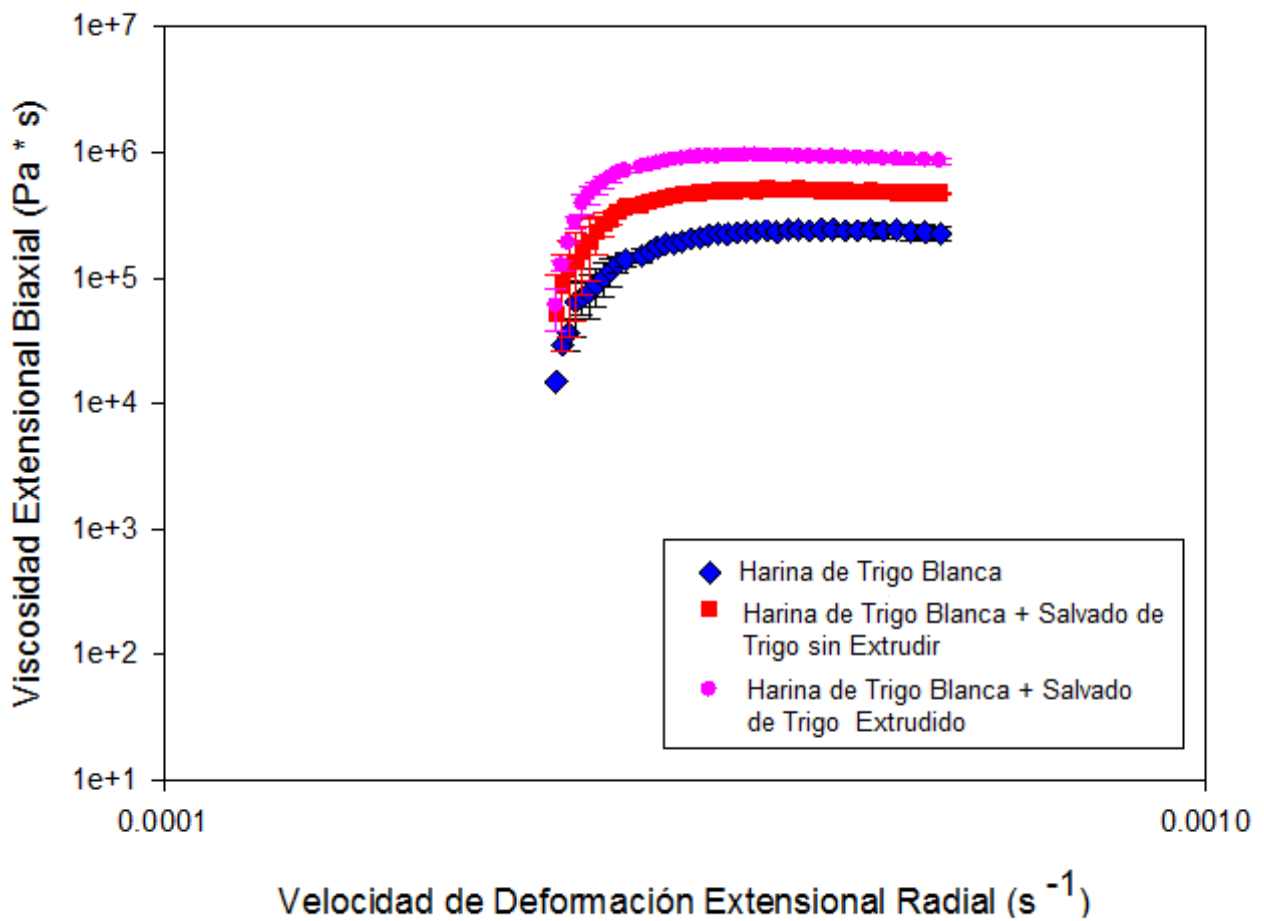


Figura 14. Viscosidad Extensional Biaxial de Harina de Trigo Blanca , Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Exprimir y Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Exprimido.

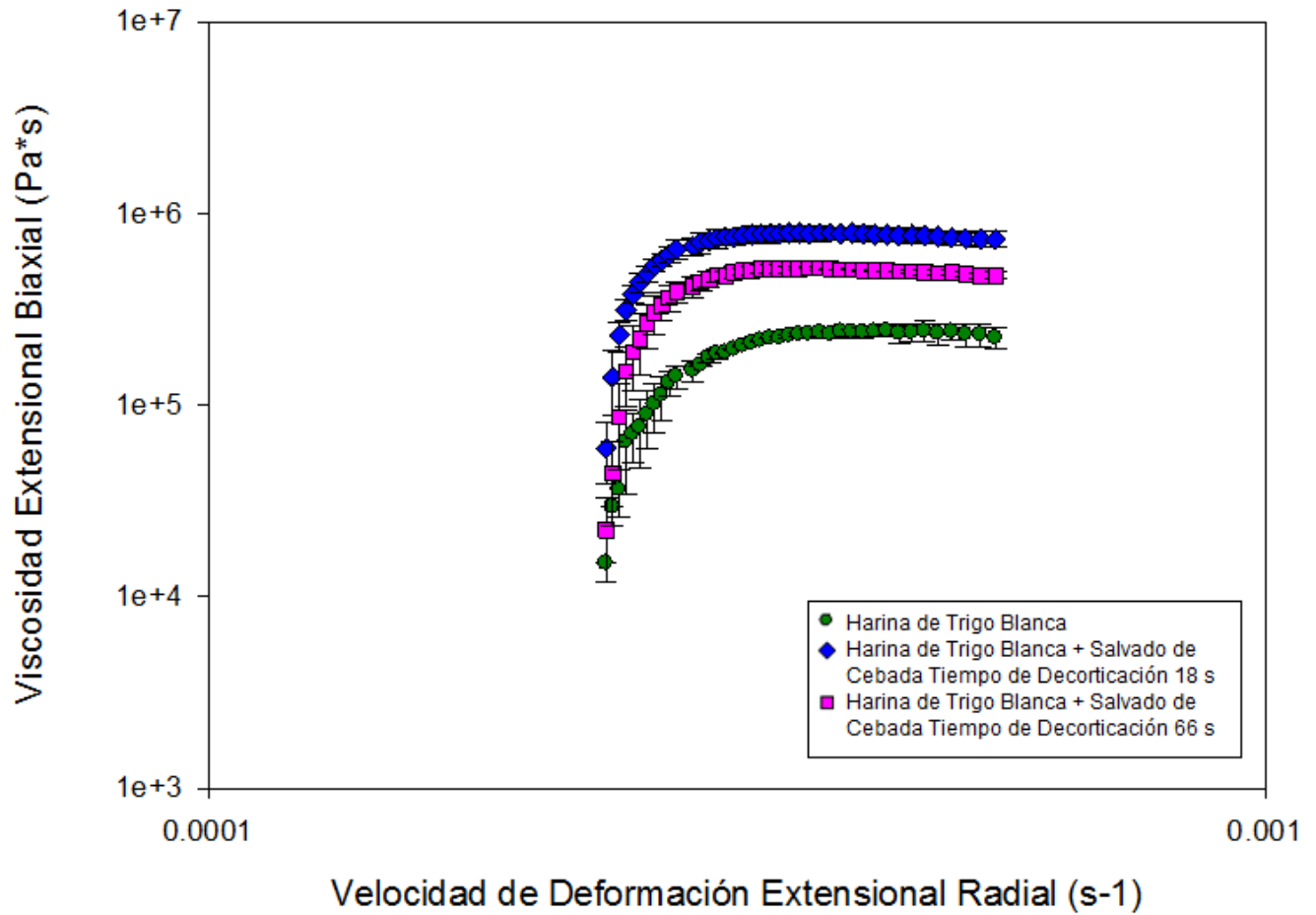


Figura 15. Viscosidad Extensional Biaxial de Harina de Trigo Blanca, Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s y Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s .

formulaciones con salvado de trigo, se da el comportamiento de un fluido un no newtoniano para luego pasar a mostrar el comportamiento de un fluido newtoniano. De acuerdo a la prueba de Tukey, todos los tratamientos tuvieron diferencias significativas entre sí.

Prueba de Panificación

Con las 5 mezclas se elaboraron 15 panes a analizar, a los cuáles se les determinó el peso, el volumen, la altura, el volumen específico y la textura. Empezando con la mezcla de harina de trigo blanca, como se muestra en las **Figuras 16 y 17**, el pan resultante fue el que tuvo mayor valor en los diferentes parámetros analizados, especialmente el volumen, debido a que la distribución e hinchamiento (swelling) de las partículas de la harina posterior al mezclado, favorecen la formación de una matriz de proteína que retiene al almidón, por ende, aumentando el volumen (Campos et.al.,1997). De acuerdo a la prueba de Tukey, para el peso del pan, la mezcla control, la mezcla con salvado extrudido y la mezcla con salvado sin extrudir tuvieron diferencias significativas, mientras que los tratamientos con salvado de cebada (tiempo de decorticación 18 s y 66 s) no tuvieron diferencias significativas entre sí.

El pan elaborado con salvado de trigo extrudido, mostrado en la **Figura 17**, mostró diferencias notorias en comparación al elaborado con el salvado de trigo sin extrudir, principalmente en el volumen, esto debido a que, durante el proceso de extrusión, el almidón se somete a un calentamiento y éste produce su gelatinización, la cual causa una expansión del gránulo y por ende un aumento en el volumen, así como una disminución en la densidad.



Figura 16. Comparación entre las diferentes formulaciones de pan.

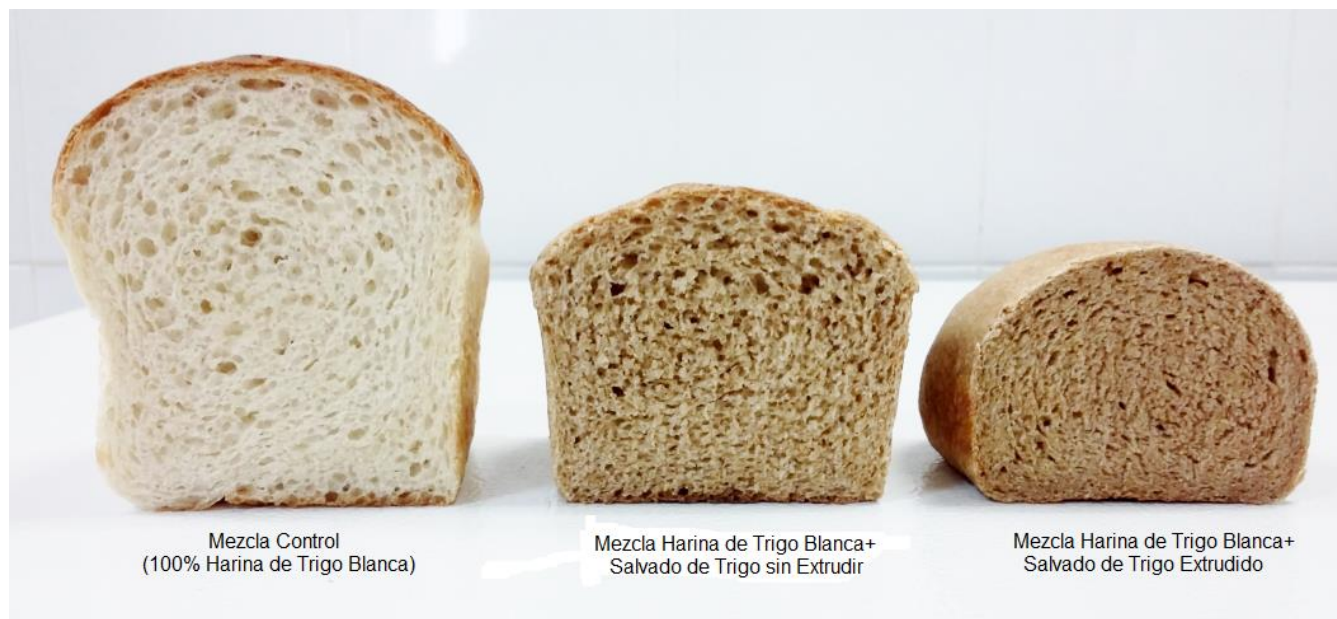


Figura 17. Comparación entre Mezcla de Harina de Trigo Blanca con las Mezclas de Harina + Salvado de Trigo (Extrudido y Sin Extrudir)



Mezcla Control
(100% Harina de Trigo Blanca)

Mezcla Harina de Trigo
Blanca + Salvado de Cebada
Tiempo de Decorticación 18 s

Mezcla Harina de Trigo
Blanca + Salvado de Cebada
Tiempo de Decorticación 66 s

Figura 19. Comparación entre Mezcla de Harina de Trigo Blanca con las Mezclas de Harina + Salvado de Cebada (Tiempo de Decorticación 18 s y 66 s)

Por otro lado, el pan elaborado con salvado de cebada (Tiempo de Decorticación de 18 y 66 segundos) presentó un volumen mucho más reducido en comparación con la mezcla control de harina blanca, como se muestra en la **Figura 19**. Wang, Rosell, y De Barber (2002) reportaron que, aunque la cebada tiene un gran valor nutricional debido a su alto contenido de β - *glucanos*, su falta de gluten limita su aplicación, ya que al complementar la harina de trigo con otras harinas que no posean gluten (en este caso el salvado de cebada) se reduce el potencial de la mezcla para la panificación. Se aprecia también que el volumen es muy similar en los dos tiempos de decorticación, pero siendo el de 18 segundos un poco mayor al de 66 segundos, es decir, el volumen disminuyó al aumentar el tiempo de decorticación. De acuerdo a la prueba de Tukey, para el volumen del pan, las mezclas con salvado de trigo extrudido, salvado sin extrudir y mezcla control tuvieron diferencias significativas entre sí. Para el caso del volumen específico, la mezcla control y la mezcla con salvado de trigo extrudido tuvieron diferencias significativas entre sí.

Otro punto a resaltar es que se observa una diferencia notoria en la uniformidad de la miga de las diferentes mezclas, siendo el pan elaborado con harina de trigo blanca, el que presentó una estructura de miga más porosa en comparación del resto, en el cual se observó una miga más compacta.

Tabla 6. Peso obtenido (g)¹

Muestra	Peso (g)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	165 ^a ± 0.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir	158 ^b ± 0.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	154 ^c ± 0.33
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	154 ^c ± 0.33
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	150 ^d ± 0.33

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de tres determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

Tabla 7. Evaluación del Volumen del Pan de los diferentes Tratamientos¹

Muestra	Volumen (cm^3)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	333.3 ^d ± 4.28
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir	425 ^b ± 4.28
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	268 ^c ± 4.28
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	388.3 ^c ± 4.28
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	608.3 ^a ± 4.28

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de tres determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Tabla 8. Evaluación de la Altura del Pan de los Diferentes Tratamientos¹

Muestra	Altura (cm)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	4.6 ^a ± 0.47
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir	5.6 ^b ± 0.47
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	4.76 ^c ± 0.47
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	4.5 ^b ± 0.47
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	7.8 ^c ± 0.47

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de tres determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Tabla 9. Evaluación del Volumen Específico del Pan de los Diferentes Tratamientos¹

Muestra	Volumen Específico ($\frac{cm^3}{g}$)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	2.018 ^c ± 0.03
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir	2.689 ^b ± 0.03
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	2.601 ^b ± 0.03
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	2.518 ^b ± 0.03
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	4.044 ^a ± 0.03

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de tres determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Tabla 10. Peso Cubos de Pan para el Análisis de Textura¹

Muestra	Peso (g)
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo Extrudido	20.612 ^a ± 0.42
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Trigo sin Extrudir	15.734 ^b ± 0.84
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 18 s	17.689 ^b ± 0.98
Mezcla Harina de Trigo Blanca + Salvado de Cebada Tiempo de Decorticación 66 s	16.537 ^b ± 1.21
Mezcla Control (100% Harina de Trigo Blanca)	10.222 ^c ± 0.651

¹Los valores están expresados en base seca y son promedio de seis determinaciones.

²Se presentan los valores del error estándar.

³Los valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

CONCLUSIONES

- 1) La incorporación de salvado de cebada con dos tiempos de decorticación a la harina de trigo blanca afecta de manera importante las características físicoquímicas del pan, especialmente tanto el volumen como en la estructura de la miga, y en las propiedades reológicas de la masa, principalmente en la viscosidad extensional biaxial al añadir salvado de trigo extrudido.
- 2) El proceso de extrusión tuvo un gran impacto en las propiedades reológicas y en los parámetros farinográficos del salvado de trigo, particularmente en la absorción del agua, y mostrándose al final una gran diferencia entre las propiedades físicas entre el pan elaborado con el salvado extrudido y el salvado sin extrudir.
- 3) El tiempo de decorticación del salvado de cebada tuvo efecto sobre el valor de la viscosidad extensional biaxial, ya que al incrementar el tiempo de decorticación se disminuyó la viscosidad. También influyó de manera importante en los parámetros físicos del pan.
- 4) El pan elaborado con la mezcla de harina de trigo blanca y salvado de trigo extrudido, obtuvo la mayor fuerza requerida para comprimirlo, resultando un pan con volumen bajo, miga menos porosa y más densa, mientras que el pan elaborado con la mezcla control (100% harina de trigo blanca) obtuvo los parámetros físicos más altos.

RECOMENDACIONES

1. Realizar modificaciones en las diferentes formulaciones para la elaboración de pan utilizadas en este trabajo con el objetivo de observar el efecto que se produciría en las propiedades fisicoquímicas y reológicas, así como de buscar un pan que sea de aceptación para los consumidores.
2. Llevar a cabo determinación tanto de Índice glucémico como contenido de fibra dietaria del pan elaborado con el fin de conocer cómo influye la adición de salvado de cebada y salvado de trigo extrudido sobre los mismos.
3. Llevar a cabo estudios que relacionen las propiedades reológicas de las masas con características micro estructurales, utilizando otras variedades de cereales.
4. Llevar a cabo una prueba sensorial para determinar la aceptación de la gente por el producto final.

REFERENCIAS

Ananthan, N. K., Avtar, S.S. y Milford, A. H. (1996). Physical and molecular properties of re-extruded starches as affected by extruder screw configuration. *J. of Food. Sci.* 91(8):596-600.

Anderson, N. E. y Clydesdale, F. M. (1980). analysis of the dietary fiber content of a standard wheat bran. *Journal of Food Sci.* 45:336.

Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeife, F.F. y Griffin, J.E.L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion-cooking. *Cereal Science.*14:4-7, 11-12.

Anderson, J.W., Baird, P., Davis Jr, R. H., Ferreri S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V. y Williams, C.L. (2015). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67, 188-205.

Antoine, C., Peyron, S., Mabilie, F., Lapierre, C., Bouchet, B., Abecassis, J.L. y Rouau, X. (2003). Individual contribution of grain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran. *J. Agric. Food Chem.* 51:2026-2033.

Akerberg, A., Liljeberg, H. y Bjorck, I. (1998). Effects of amylose/amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices. *Journal of Cereal Science.* Vol. 28.71-80.

Apprich, S., Tirpanalan, € O., Hell, J. et al. (2013). Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT-Food Science and Technology*, 56, 222–231.

Asp, N.G., Björck, I. y Nyman, M. (1986) Dietary fibres.. Eds. Amado, R. y Schweizer, T. Academic Press, London. Pp: 177-179.

Awika, J.M. (2011). major cereal grains production and use around the world. in: advances in cereal science: Implications to food processing and health promotion (Editors: J.M. Awika, V. Piironen, S. Bean. 1089:1-13.

Bagley, E.B. y Christianson, D.D. (1986). Fundamentals of dough rheology. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, EUA. 27-36.

Bhatty, R.S. (1993). Physicochemical properties of roller-milled barley bran and flour. *Cereal Chemistry*, 70, 397-402.

Blanshard J.M.V., Frazier P.J., y Galliard, T. (1986) Chemistry and physics of baking. 1st Edition. The Royal Society of Chemistry. 170-177.

Bushuk, W. (1985). Rheology: Theory and application to wheat flour doughs. rheology of wheat products. St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemists. Cap. 1.

Campos, D. T., Steffe, J. F. y Ng, P. K. W. (1997). Rheological behavior of undeveloped and developed wheat dough. *Cereal Chem.* 74:489-494.

Campanella, O.H. y Peleg, M. (1987). Squeezing flow viscometry of peanut butter. *Journal of Food Science.* 52. 180-184.

Castells, M., Marin, S., Sanchis, V. y Ramos, A.J. (2005). Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: A Review. *Food additives and contamination*. 22, 150–157.

Chatrei, S.H., Macosko, C.W. y Winter, H.H. (1981). A new biaxial extensional rheometer. *Journal of Rheology*.52, 433-443.

Chung, Y.S., Han, H.S., Lee, W.S. y Rhee, C. (2010). Physicochemical and bread-making properties of air flow pulverized wheat and corn flours. *Food Science Biotechnology*. 19(6): 1529-1535.

Codex Alimentarius (2009b). Codex Committee On Nutrition And Foods For Special Dietary Uses. Thirty First Session, Dusseldorf, Germany, 2-6 November 2009 Commission Directive (2008) 90/496/EEC On Nutrition Labeling For Foodstuffs As Regards Recommended Daily Allowances, Energy Conversions Factors And Definitions. List Of Methods For Dietary Fibre At Step 7, Agenda Paper, CX/NFSDU 09/ 31/3-Rev, July 2009.

Curti, E., Carini, E., Bonacini, G., Tribuzio, G. y Vittadini, E. (2013). Effect of the addition of bran fractions on bread properties. *Journal of Cereal Science*, 57, 325–332.

Darby, R. (1976). *Viscoelastic fluid: An introduction to their properties and behavior. chemical processing and engineering*. Marcel Dekker Inc. New York, NY, EUA.51-394.

Faridi,H. (1985). *Rheology of wheat products*. American Association of Cereal Chemists. St Paul, MN,EUA . 1-273.

Faubion, J. M., y Hosenev, R.C. (1990). The viscoelastic properties of wheat flour dough. dough rheology and baked product texture. Edited by Faridi, H. and Faubion, J.M. 42-62. New York.

Frédéric, R., Schuchmann, H.P. y Palzer, S.(2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Food Science and Technology*, 28, 23-32.

Gajula, H., Alavi, S., Adhikari, K. y Herald, T. (2008). Precooked bran-enriched wheat flour using extrusion: Dietary fiber profile and sensory characteristics. *Journal of Food Science*. 73:173-179.

García Villa, A.L., (2013). Formulación y Evaluación del Uso Potencial de una Harina Compuesta en la Elaboración de Pan y Estimación de su Índice Glucémico. (Tesis Inédita de Maestría en Ciencias) Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos.

Gómez, M., Jiménez, S., Ruiz, E. y Oliete, B. . (2011). Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality. *Food Science and Technology*, 44, 2231-2237.

Goñi, I., García Alonso, A, Saura, C.F.(1997) A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutr Res*. Vol 17. 427-437.

Goodwin, J.W., y Hughes, R.W. (2000). *Rheology for chemists: An introduction*. Cambridge. The Royal Society of Chemistry.

Havck, B.W. y Huber, G.R. (1989). Single screw vs twin screw extrusion. *The American Association of Cereal Chemists*, 34, 930–939.

Hemery, Y., Rouau, X., Lulliw Pellerin, V., Barron, C. y Abecassis, J. (2007). Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science*. 46: 327-347.

Hoseney, R. C. (1991). *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*. Editorial ACRIBIA, S. A. Zaragoza, España.

Janssen, A.M., Van Vliet, T., y Vereijken, J.M. (1996). Rheological behavior of wheat glutes at small and large deformations: Effect of gluten composition. *Journal of Cereal Science*. 23. 33-42.

Kahlon, T.S., Berrios, J. de J., Smith, G.E. y Pan, J.L. (2006). Extrusion conditions modify hypocholesterolemic properties of wheat bran fed to hamsters. *Cereal Chem*. 83(2): 152-156.

Magaletta, R.L., DiCataldo, S.N., Liu, D., Li, H.L., Borwankar, R. y Martini, M.C. (2010). In vitro method predicting glycemic index of foods using simulated digestion and an artificial neural network. *Cereal Chemistry*. 87(4):363-369.

Larrea, M.A., Martínez-Bustos, F. y Chang, K.Y. (2010). The effect of extruded orange pulp on enzymatic hydrolysis of starch and glucose retardation index. *Food Bioprocess Technology*. 3:684-692.

Márquez- Berber, S.R., Almaguer- Vargas, G., Schwentesius Rindermann, R. y Ayala-Garay, A.V. (2014). *Trigo en sonora y su contexto nacional e internacional*. México: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.

Mataix, V. J. (2010). Tratado de nutrición y alimentación. Vol. II situaciones fisiológicas y patológicas. (2 ed.) Madrid, España: Ed. Editorial OCEANO/ergon.

Menjívar, J.A.(1990). Fundamental aspects of dough rheology : Dough rheology and baked product texture. Edited by H. Faridi and J.M. Faubion. 1-14. Nueva York. Van Nostrand Reinhold.

Mercier, C., Linko, P. y Harper, J.M. (1989). Extrusion cooking. American Association of Cereal Chemists, INC. St. Paul, Minnesota, USA.

McKevith, Brigid. (2004). Nutritional Aspects of Cereals. British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin, 29, 111-142.

Newman, R K., Newman, W. (2010). Barley for food and health: Science, technology, and products. United States of America: Wiley.

Nilsson, A.C., Ostman, E.M, Hoist, J.J. y Bjorck, I.M.E. (2008) Including indigestible carbohydrates in the evening meal of healthy subjects improves glucose tolerance, lowers inflammatory markers and increases satiety after a subsequent standardized breakfast. Journal of Nutrition. Vol. 138. 732-739.

Oluwatoyin O. Onipe, Afam I. O. Jideani y Daniso, B. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. Food Science and Technology, 50, 2509–2518.

Pavlovich Abril, A. (2007). Evaluación de las Propiedades Reológicas de la Masa para Pan Blanco Elaborada con una Mezcla de Estearina de Palma y Aceite de Canola Libre de Isómeros Trans. (Tesis inédita de Maestría en Ciencias) Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos.

Pavlovich Abril A., Rouzaud Sández O., Torres, P. y Robles-Sánchez R. M. (2012). Cereal bran and wholegrain as a source of dietary fibre: Technological and health aspects. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(7), 882–892.

Petrofsky, K.E. y Hosney, R.C.. (1995). Rheological Properties of Dough made with starch and gluten from several cereal sources. *Cereal Chemistry*, 72, 53-58.

Pomeranz, W. y Williams, P.C. (1990). Wheat hardness: Its genetic, structural and biochemical background. *Advances in Cereal Science and Technology*. X . 471-548.

Puppo M. C., Calvelo, A. y Añón, M. C.. (2005). Physicochemical and rheological characterization of wheat flour dough. *Cereal Chemistry*, 82, 173-181.

Pruckler, M., Siebenhandl Ehn, S., Apprich, S. et al. (2014). Wheat bran based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *Food Science and Technology*, 56, 211 – 221.

Quaglia, G. (1991). *Ciencia y Tecnología de la Panificación*. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 23-61.

Rao, M.A. (1999). Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications. Gaithersburh, Maryland. Aspen.100-109.

Ralet, M.-C., Thibault, J.F. y Della Valle, G. (1990). Influence of extrusion-cooking on the physicochemical properties of wheat bran. *Journal of Cereal Science*, 11, 249-259.

Ramírez Wong, B. Sweat, V.E., Torres, P.I. y Rooney, L.W. (1996). Evaluation of the rheological properties of fresh corn masa using squeezing flow viscometry: Biaxial extensional viscosity. *Journal Texture Estudios*. 27. 185- 198.

Reyes-Pérez, F. (2013). Efecto de la Incorporación de Salvado de Trigo extrudido a la Formulación para Elaborar Galletas y su Impacto en las Características Fisicoquímicas e Índice Glucémico In vitro. (Tesis inédita de Maestría en Ciencias) Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos.

Richardson, P. (2001). Thermal technologies in food processing. CRC Press. Woodhead Publishing Limited Cambridge England.

Robin, F., Dautremont C. y Chanvrier, H., Nestlé Product Technology Center. (2014). Winning consumer preference via extrusion cooking of nutritious cereals. *New Food Magazine*, 10, 1-3.

Robin, F., Schuchmannb, H.P. y Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 28, 23-32.

Rosell, C. M., Rojas, J. A. y Benedito de Barber, C. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 15, 75-81.

Ruíz Bernal, J.A. (2008). Obtención y Caracterización Física y Química de un Producto a Base de Salvado de Trigo por el Proceso de Extrusión. (Tesis inédita de Licenciatura). Departamento de Ciencias Químico Biológicas. Hermosillo, Sonora, México.

Salazar García, M.G., Torres, P.I., Reyes Moreno, C., Ramírez Wong, B. (2003). Extensional flow studies on wheat flour doughs with different protein content. *Journal of Texture Studies* , 34, 449-464.

Salazar García, M.G. (2004). Utilización de Métodos Fundamentales para Evaluar Parámetros Reológicos de Masas de Harinas de Trigos (*Triticum Aestivum*) Panaderos. Tesis Inédita de Doctorado. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Sinaloa, México.

Sanz Panella, J. M., Collar, C. y Haros, M. (2008). Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *Journal of Cereal Science*.48.715-721.

Sanz Panella, J. M., Laparra, J.M., Haros, M. (2014) Impact of α -amylase during breadmaking on in vitro kinetics of starch hidrolisis and glycaemic index of enriched bread with bran. *Plant Foods for Human Nutrition*. Vol. 69. 216-221.

Sarwar, M. H, Sarwar, M. F., Sarwar, M., Qadri, N. A. y Moghal, S. (2013). The importance of cereals nutrition in human health: A review. *Academic Journals*, 4, 32-35.

Serna-Saldívar, R. O. (1996). *Química, almacenamiento e industrialización de los Cereales*. AGT Editor, S. A. México, D. F.

Shakib, M.C. y Gabriel, S.G.F. (2010). Post-prandial responses to different bread products based on wheat, barley and fenugreek or ginger or both in healthy volunteers and their effect on the glycemic index of such products. *Journal of American Science*, 10, 89-96.

Sing, S., Gamlath, S. y Wakeling, L. (2006). Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 42. 916 – 929.

Sudha, M. L., Vetrmani, R. y Leelavathi K. (2005). Influence of fibre from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food. Chem.* 2007:1365-1370.

Van Vliet, T., Janssen, A.M., Bloksma, H.H., y Walstra, P. (1992). Strain hardening of dough as a requirement for gas retention. *Journal of Texture Studies*. 23. 439-460.

Van Hung, P., Maeda, T., Morita, N. (2006). Dough and bread qualities of flours with whole waxy wheat flour substitution. *Food Research International*. 40. 273-279.

Verdú, J.M. (2009). Tratado de nutrición y alimentación, nutrientes y alimentos. Tomo I. Ed. Océano. España.

Wang, W.M., Klopffestein, C.F. y Ponte, J.G. (1993). Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of fiber dietary and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry*. 70(6):707-711.

Wrigley, C.W. (2009). Wheat: Chemistry and technology. Chapter I Wheat: A unique grain for the world. Editors: Khan, K. y Shewry, P.R. Fourth edition. Food Science Australia and Wheat CRC, North Ryde (Sydney), NSW, Australia. 1-17.

Yan, X., Ye, R. y Chen, Y. (2015). Blasting extrusion processing: the increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry*, 180, 106-115.

Yeung, Judy Sze-Mun. (2001) Extrusion cooking of barley flour with and without thermostable α -amylase. Department of Agricultural, Food and Nutritional Science. Alberta, Canada.

