



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Efecto del Tiempo de Germinación en las Características  
Reológicas de la Masa de Pan con Harina de Arroz Variedad  
INIAP XV”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

(PROYECTO DE GRADUACIÓN)

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIEROS DE ALIMENTOS**

Presentado por:

Diana Carolina Guerrero Segura

Carlos Alberto Llerena Carrera

GUAYAQUIL-ECUADOR

2015

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios en primer lugar, por darme la sabiduría y fortaleza para culminar esta meta, a mi querida familia, en especial a mis padres Javier y Damaris por su apoyo incondicional durante mi etapa de estudios universitarios, a mis amigos, a mi equipo de trabajo, a la MSc. Fabiola Cornejo y al LEMAT- ESPOL; quienes gracias a su confianza y apoyo hicieron posible la conclusión de este proyecto de graduación.

***Diana Carolina Guerrero Segura***

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios y a mi querida familia en especial a mis padres que han sido el apoyo incondicional en mi carrera universitaria; en segundo lugar a mi esposa quien gracias a su confianza y apoyo hicieron posible la culminación de proyecto. Por último a nuestra directora de proyecto de graduación MSc. Fabiola Cornejo y al LEMAT, quienes nos ayudaron en todo momento.

***Carlos Alberto Llerena Carrera***

## DEDICATORIA

A Dios y a mi querida familia, en especial a mis padres que son inspiración y apoyo en todo momento.

***Diana Carolina Guerrero Segura***

## DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres Carlos y Gloria, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, no hubiese podido alcanzar lo que hasta ahora. Su perseverancia y valentía han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir, no solo para mí, sino para mis hermanos. También dedico este proyecto a mi esposa, compañera paciente y comprensiva de cada jornada. Ella representó gran lucha y motivación en momentos de decline y cansancio. A ellos les dedico todo mi empeño de este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

***Carlos Alberto Llerena Carrera***

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

MSc. Fabiola Cornejo Z.  
DIRECTORA DE TFG

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

**Diana Carolina Guerrero Segura**

---

**Carlos Alberto Llerena Carrera**

## RESUMEN

Ecuador es un país en donde los productos de panificación forman parte fundamental de la dieta diaria de sus habitantes; sin embargo, existe una fracción de la población que se abstiene al consumo de estos productos, tradicionalmente elaborados de harina de trigo; debido a una condición médica conocida como enfermedad celíaca (EC), que radica en la reacción inmunológica adversa del organismo a la exposición de gluten, que es la proteína responsable de elasticidad de la masa y de la calidad final del pan.

Considerando que en el Ecuador el cultivo de arroz constituye una de las principales actividades agrícolas de la costa ecuatoriana, se ha propuesto utilizarlo como sustituto del trigo.

Debido a las diferencias en su composición química, el trigo representa mayores aportes nutricionales incluso que el arroz integral, por lo que el proceso de germinación de arroz integral y obtención de harina de este grano ha sido objeto de estudio como una alternativa para incrementar su valor nutricional

Mediante la germinación se desencadenan procesos enzimáticos que transforman la composición inicial del grano, lo que da como consecuencia la hidrólisis de proteínas y almidones en moléculas más sencillas. Durante la preparación de la masa para elaboración de pan, estos cambios generan



impactos tanto en las propiedades físico-químicas de la harina, como en el comportamiento reológico de la masa y las características organolépticas y nutricionales del pan. De la misma manera, el tiempo usado para germinación del grano tendrá un papel importante en las propiedades antes mencionadas.

Para llevar a cabo esta investigación se experimentó con harina de arroz integral de la variedad INIAP XV sin germinar y germinado a 12, 24 y 48 horas. Para caracterizar del material se ejecutaron pruebas oscilatorias, usando barridos de deformación y frecuencia para cada tratamiento aplicado. Los resultados obtenidos indicaron que todas las muestras son materiales viscoelásticos que se comportan como geles, predominando siempre el componente elástico. Se determinó que tanto la germinación, como el tiempo de germinación, afectan significativamente el comportamiento reológico de la masa, disminuyendo los valores tanto del módulo de almacenamiento  $G'$ , como del módulo de pérdida  $G''$  a medida que se incrementa el tiempo de germinación. Resultados que se atribuyen al efecto de la hidrólisis del almidón por parte de las enzimas  $\alpha$ -amilasas que se da lugar durante la germinación, reduciéndolo a azúcares más simples y como consecuencia las masas presentan menos viscosidad.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ABREVIATURAS.....	vi
SIMBOLOGÍA.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. PROBLEMA.....	4
1.1. Planteamiento del Problema .....	4
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO 2	
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1. Pan de Arroz .....	8
2.2. Reología y Reometría.....	16

2.3. Propiedades Reológicas de la masa de pan.....	36
2.4. Germinación de granos.....	39

### CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1. Materia Prima.....	48
3.2. Arroz con diferentes tiempos de germinación.....	49
3.3. Determinación de propiedades de las mezclas de la masa de pan.....	50
3.4. Análisis estadístico.....	54

### CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS.....	57
4.1. Efecto de la germinación en las características reológicas de la masa de pan con harina de arroz.....	57
4.2. Efecto del tiempo de germinación en las características reológicas de la masa de pan con harina de arroz.....	63

### CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
--	----

### APÉNDICES

### BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

AMD	Análisis Mecánico Dinámico
ANOVA	Analysis of variance (Análisis de varianza)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de ensayos metrológicos y de materiales
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
°C	Grados centígrados
Pa	Pascales
ATP	Adenosín trifosfato
TACC	Trigo, avena, centeno y cebada
EC	Enfermedad celíaca
HAI	Harina de arroz integral
HAI-0H	Harina de arroz integral con 0 horas de germinación
HAIG	Harina de arroz integral germinado
HAIG-12H	Harina de arroz integral con 12 horas de germinación
HAIG-24H	Harina de arroz integral con 24 horas de germinación
HAIG-48H	Harina de arroz integral con 48 horas de germinación
HPMC	Hidroxipropilmetilcelulosa
HSD	Honestly-significant-difference
GABA	Ácido gamma amino butírico
a	Aceleración
PSI	Libras sobre pulgadas cuadradas
A	Área

## SIMBOLOGÍA

$G'$	Módulo de Almacenamiento
$G''$	Módulos de Pérdida
$G^*$	Módulo Complejo
Tan $\delta$	Tangente del Ángulo de Fase
F	Fuerza
m	Masa
$m^2$	Metros al cuadrado
N	Newtons
kg	Kilogramo
$\frac{m}{s^2}$	Aceleración
$\frac{m}{s^2}$	Frecuencia angular
$\sigma$	Esfuerzo
$\gamma$	Deformación
Y	Dimensión original
$\Delta Y$	Cambio de dimensión por acción de estrés
$\mu$	Viscosidad
%	Porcentaje
g	Gramos
Kcal	Kilocalorías
mg	miligramos
$\mu g$	Microgramo
h	Altura
r	Radio
$\Omega$	Velocidad angular
$s^{-1}$	Velocidad de deformación
$O_2$	Oxígeno gaseoso
cm	Centímetro
$CO_2$	Dióxido de carbono
mm	Milímetro
Hz	Hertz

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1	Esfuerzo Normal .....20
Figura 2.2	Esfuerzo Cortante.....20
Figura 2.3	Deformación debida a esfuerzos de tensión y de compresión, respectivamente .....21
Figura 2.4	Comportamiento a) Elástico, b) Viscoso, c) Viscoelástico .....23
Figura 2.5	Reómetros comunes divididos en dos categorías principales: rotacionales y tubulares.....26
Figura 2.6	Diagrama esquemático de una geometría de cono y plato. ....28
Figura 2.7	Diagrama esquemático de una geometría de platos paralelos. .....29
Figura 2.8	Material viscoelástico: esfuerzo, deformación y desfase entre ambos. ....31
Figura 2.9	Representación del módulo complejo como combinación de dos vectores, que son los módulos elástico y viscoso..... 33
Figura 2.10	Comportamiento típico de un polímero al realizar un barrido de frecuencia. ....34
Figura 2.11	Diagrama de las fases de la imbibición de agua por un semilla, medida mediante el incremento en peso fresco durante el proceso de germinación. ....40
Figura 2.12	Evolución de la actividad respiratoria durante la germinación de las semillas. ....44
Figura 2.13	Variaciones en el contenido de almidón de los cotiledones en la germinación de semillas. [Figura modificada de Barcelo, J. et al. 1984 "Fisiología Vegetal". Ediciones pirámide, S.A].....46
Figura 3.1	Reómetro Kinexus Pro, marca Malvern, realizando el análisis de una muestra de masa de HAI-0H. ....52

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

		Pág.
Gráfico 4.1	Diagrama de medias para el módulo de almacenamiento $G'$ por tratamiento aplicado HAI-0H y HAIG-24H .....	59
Gráfico 4.2	Diagrama de medias para el módulo de pérdida $G''$ por tratamiento aplicado HAI-0H y HAIG-24H .....	61
Gráfico 4.3	Diagrama de medias para el módulo de almacenamiento $G'$ por tratamiento aplicado HAI-0H, HAIG -12H y HAIG-24H.....	65
Gráfico 4.4	Diagrama de medias para valores de $G'$ a diferentes tiempos de germinación. ....	66
Gráfico 4.5	Diagrama de medias para el módulo de pérdida $G''$ por tratamiento aplicado HAI-0H, HAIG -12H y HAIG-24H.....	68
Gráfico 4.6	Diagrama de medias para valores de $G''$ a diferentes tiempos de germinación. ....	69
Gráfico 4.7	Módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) en función de la deformación para masa de harina de arroz integral a una frecuencia constante de 1 Hz. ....	70
Gráfico 4.8	Regresión lineal del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) de HAI-0H para valores de deformación cercanos a 0.1%.....	71
Gráfico 4.9	Efecto del tiempo de germinación a temperatura de 25 °C sobre la viscosidad compleja por tratamiento aplicado HAI-0H, HAI-12H, HAI-24H Y HAI- 48H. ....	72
Gráfico 4.10	Comparación de los valores de $G'$ y $G''$ para tratamientos HAI-0H, HAI-12H y HAI-24H en función de la frecuencia angular ..	73
Gráfico 4.11	Módulo complejo $G^*$ VS Frecuencia angular de los tiempos de germinación aplicados. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Fracción Proteica de prolaminas contenidas en diferentes cereales.....	10
Tabla 2.2. Composición nutricional de la harina de arroz blanco, harina de arroz integral y harina de trigo.....	12
Tabla 2.3. Velocidades y tipo de deformación características de las masas para pan durante su procesamiento. ....	38
Tabla 3.1. Códigos de muestras por tratamientos del arroz integral usados para la elaboración de harina para masa de pan.....	55
Tabla 4.1. Prueba de múltiples rangos para $G'$ por tratamiento aplicado a HAI-0H y HAIG-24H.....	58
Tabla 4.2. Prueba de múltiples rangos para $G''$ por tratamiento aplicado a HAI- 0H Y HAIG-24H. ....	60
Tabla 4.3. Prueba de múltiples rangos para $G'$ por tratamiento aplicado a HAI-0H,HAIG-12H y HAIG-24H.....	64
Tabla 4.4. Prueba de múltiples rangos para $G''$ por tratamiento aplicado a HAI-0H, HAIG-12H y HAIG-24H.....	67



## INTRODUCCIÓN

El presente informe final de Proyecto de Graduación abarca principalmente los siguientes temas:

En el capítulo 1 se destaca que el pan de trigo es un alimento fundamental en la dieta de la población del país, reportándose un consumo per cápita de 37 kg por año aproximadamente hasta el 2012, del cual se proyecta un incremento del 8% hasta los próximos 2 años (21); no obstante, existe un grupo de personas que presenta un desorden digestivo conocido como enfermedad celíaca, causada por la reacción inmunológica del organismo a las proteínas del grupo de las prolaminas, que se encuentran en la composición de este cereal. La justificación y objetivos del proyecto son detallados en este capítulo, los mismos que consisten en el estudio del uso de harina de arroz germinado como sustituto del trigo para resolver la problemática planteada y el impacto del tiempo de la germinación en las propiedades reológicas de la masa.

En el capítulo 2 se revisan fundamentos teóricos, como la composición química del arroz y la transformación bioquímica que ocurre a los componentes del arroz durante el proceso de germinación, de la misma manera se revisan conceptos básicos de reología y reometría para poder

comprender la importancia del conocimiento de las propiedades reológicas de los productos en la industria alimentaria, los cuales permiten tomar decisiones sobre procesos industriales, como el dimensionamiento de equipos y tuberías, evaluación de la textura en relación con datos sensoriales, validación de métodos empíricos empleados para determinar propiedades reológicas, entre otros.

Uno de los principales retos durante el desarrollo de panes libres de gluten, es la optimización del valor nutricional para uso en dietas especiales. El uso de harina de arroz integral germinada en la elaboración de pan incrementa el valor nutricional del producto terminado y este se ve favorecido en la medida del incremento del tiempo de germinación; no obstante, este mismo factor afecta negativamente a las propiedades reológicas y tecnológicas de la harina y a la calidad final del pan.

Dados los beneficios nutricionales que representa el uso de harina de arroz germinado en la industria de la panadería, es necesaria la búsqueda de un equilibrio que permita obtener la mejor calidad posible con el máximo valor nutricional. Por lo tanto, debe conocerse el verdadero impacto del tiempo de germinación en todos los parámetros físico-químicos del pan.

Los resultados obtenidos mediante la experimentación del presente proyecto podrían ser útiles en el montaje industrial de una línea de producción de pan a base de harina de arroz integral germinada.

En el capítulo 3 se detallan los materiales y métodos de estudio reológico, así como los métodos de análisis estadístico usado durante la experimentación.

En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos del estudio de las propiedades reológicas realizado a las masas para pan a base de harina de arroz integral sin germinar y germinada a tres tiempos de germinación, mediante las cuales se ha caracterizado cada una de las muestras y se ha tratado de encontrar el porqué de la respuesta de la masa al proceso de germinación, valiéndose de estudios previos para su interpretación.

En el capítulo 5 se detallan las conclusiones del presente proyecto, así como recomendaciones para futuras experimentaciones con análisis reológicos.

# CAPÍTULO 1

## 1. PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador, el pan forma parte importante de la dieta diaria de la mayoría de la población, siendo lo más habitual el uso de harina de trigo para su elaboración. En la actualidad la enfermedad celíaca (EC) se ha difundido ampliamente en la población ecuatoriana, sin darle la debida importancia, aun considerando las complicaciones que puede acarrear la falta de tratamiento de la misma.

En los celíacos, el gluten presente en el trigo y sus derivados causa una modificación a la estructura de las vellosidades del intestino delgado como respuesta autoinmune a la presencia de la prolamina. Al acortarse la longitud de las vellosidades se reduce la absorción de nutrientes y la persona corre el riesgo de desnutrirse.

El tratamiento de esta enfermedad consiste únicamente en seguir una dieta libre de gluten, lo cual crea la necesidad de desarrollar alimentos con esta característica que reemplacen ciertos productos de la dieta habitual, así como estudiar mejoras en la calidad nutricional de los mismos.

En los últimos años se han realizado varios estudios sobre la obtención de harinas a base de diversos cereales y vegetales como sustitutos parciales o totales del trigo; no obstante, las investigaciones se han centrado en el estudio de la harina de arroz debido a su sabor suave, incoloro, su propiedad hipoalérgica, facilidad para digerirse y sus bajos niveles de proteína, sodio, grasa, y fibra.

Es conocido que el arroz integral posee mayor valor nutricional que el arroz blanco. Al momento de germinar el grano de arroz, ocurren cambios metabólicos que modifican la proporcionalidad de sus componentes e incrementan aún más su valor nutricional. Se conoce que el tiempo de germinación del grano influye significativamente en las propiedades de hidratación, gelatinización, reológicas y nutricionales de la harina de arroz integral germinado (HAIG). Por ejemplo, el incremento de su composición nutricional

es proporcional al tiempo de germinación del grano; lo cual convierte a la HAIG en una alternativa funcional adecuada para su uso en la elaboración de panes sin gluten.

Algunos estudios se han dedicado a la mejora de las propiedades reológicas de la masa para pan a base de harina de arroz, mediante la adición de diferentes emulsificantes, con el objetivo de imitar la función natural de las proteínas del gluten; sin embargo, uno de los grandes retos es el de mejorar sus características nutricionales, generando el menor impacto en las características viscoelásticas de la masa, para lo cual se ha establecido la necesidad de estudiar el impacto del tiempo de germinación de arroz en las propiedades reológicas de la masa de HAIG, de manera que pueda establecerse el proceso idóneo para la obtención de un producto de alto valor nutricional y de la mejor calidad final posible.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Analizar el efecto de la germinación del arroz a diferentes tiempos en las características reológicas de la masa de pan sin gluten.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Corroborar diferencias significativas entre las propiedades reológicas de la masa de pan a base de harina de arroz integral sin germinar y harina de arroz integral germinado.
- Evidenciar diferencias significativas del efecto de la germinación de la harina de arroz integral a los tiempos de 12 horas, 24 horas y 48 horas en las propiedades reológicas de la masa de pan.

# CAPÍTULO 2

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Pan de Arroz

El arroz ha sido tradicionalmente un alimento básico para millones de personas en el mundo. En muchos países como México, Nicaragua, entre otros; los esfuerzos esenciales de desarrollo para cubrir las necesidades alimentarias nacionales se centran en la producción y explotación del arroz.

Para quienes sufren de enfermedad celíaca (EC), se ha logrado desarrollar diversos productos a base de harina de arroz; tales como, productos de panadería y pastelería con 100% harina de arroz, fermentado con levadura (11).

El pan a base de harina de arroz es un producto que se adapta muy bien como sustituto del pan de trigo, no solo para celíacos, sino



también para dietas especiales. Esto se debe principalmente a su alto contenido de carbohidratos de fácil digestión, su carácter hip-alergénico, sabor insípido, bajo contenido en sodio y bajo contenido en prolaminas (16).

Las prolaminas son un grupo de proteínas vegetales con gran contenido del aminoácido prolina, las mismas que reciben diversos nombres de acuerdo al cereal en el que se encuentren: gliadinas en el trigo, hordeínas en la cebada, secalinas en el centeno, las aveninas en la avena y orzenina en el arroz (48). Las investigaciones han demostrado que las prolaminas de los diferentes cereales guardan relación entre la composición de aminoácidos y la toxicidad para los enfermos celíacos, la cual radica en la proporción contenida de glutaminas y prolina que presenten estas proteínas. Las prolaminas tóxicas del trigo, cebada y centeno, se caracterizan por un elevado contenido de glutamina y prolina; por el contrario, las prolaminas de los cereales no tóxicos como maíz, sorgo y arroz, poseen un bajo contenido de glutamina y prolina. En la tabla 2.1, se recoge la fracción proteica de prolaminas contenidas en diferentes tipos de cereales, tóxicos y no tóxicos (14).

**TABLA 2.1**  
**FRACCIÓN PROTEICA DE PROLAMINAS CONTENIDAS EN**  
**DIFERENTES CEREALES.**

<b>CEREAL</b>	<b>TIPO DE PROLAMINA</b>	<b>CONTENIDO (%)</b>
Trigo	Gliadina	69
Centeno	Secalina	30-50
Cebada	Hordeína	46-52
Avena	Avenina	16
Mijo	Panicina	40
Maíz	Zeína	55
Arroz	Orzenina	5
Sorgo	Kafirina	52

Fuente: Gil & Hernández (2010) (14).

A pesar de tener ciertos valores nutricionales reducidos en comparación a la harina de trigo, la harina de arroz constituye una gran alternativa para las personas celíacas. En términos generales la harina de arroz blanco aporta con menor proporción de proteínas, grasas totales, fibra dietética y azúcares que la harina de trigo, así como ciertas vitaminas y minerales; sin embargo, contiene mayor proporción de carbohidratos, por lo que aporta con mayor cantidad de energía que la harina de trigo. De la misma manera existen diferencias entre la composición nutricional de la harina de

arroz blanco y la harina de arroz integral, ya que durante el proceso de descascarillado y blanqueo del arroz existe una reducción significativa de grasas, fibra y cenizas (14).

En la tabla 2.2, que presenta la composición nutricional de los tres tipos de harinas mencionados anteriormente, pueden observarse las diferencias.

**TABLA 2.2**  
**COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LA HARINA DE ARROZ BLANCO,**  
**HARINA DE ARROZ INTEGRAL Y HARINA DE TRIGO.**

Nutriente	Unidad	Harina de Arroz blanco	Harina de Arroz integral	Harina de trigo
		Valores por 100 g		
<b>Proximales</b>				
Agua	g	11,89	11,97	10,74
Energía	kcal	366	363	340
Proteínas	g	5,95	7,23	13,21
Grasas totales	g	1,42	2,78	2,5
Carbohidratos	g	80,13	76,48	71,97
Fibra total	g	2,40	4,60	10,70
Azúcares totales	g	0,12	0,85	0,41
<b>Minerales</b>				
Calcio (Ca)	mg	10	11	34
Hierro (Fe)	mg	0,35	1,98	3,60
Magnesio (Mg)	mg	35	112	137
Fósforo (P)	mg	98	337	357
Potasio (K)	mg	76	289	363
Sodio (Na)	mg	0	8	2
Zinc (Zn)	mg	0,80	2,45	2,60
<b>Vitaminas</b>				
Tiamina	mg	0,138	0,443	0,502
Riboflavina	mg	0,021	0,080	0,165
Niacina	mg	2,590	6,340	4,957
Vitamina B6	mg	0,436	0,736	0,407
Folato (DFE)	µg	4	16	44
Vitamina A, IU	IU	0,00	0,00	9,00
Vitamina E	µg	0,11	1,20	0,71
Vitamina K	µg	0,00	0,00	1,90

Fuente: USDA, Nutrient Database for Standard Reference (2011) (52).

Adaptada por los autores: Guerrero & Llerena (2015)

En general el pan sin gluten, presenta importantes pérdidas de componentes nutricionales como fibra, vitaminas y minerales, por lo que diversos estudios se han dedicado a experimentar con procesos como la germinación del grano de arroz, comprobando que existen incrementos en los componentes nutricionales de las harinas debido a la intensa actividad metabólica durante la cual se llevan a cabo reacciones enzimáticas hidrolizando el almidón y produciendo cambios bioquímicos en la composición del grano (45). Además de elevar el contenido nutricional, a la germinación se le atribuye también el incremento de componentes bioactivos que tienen propiedades funcionales sobre la salud humana (8).

Otros ensayos han demostrado que el uso parcial o total del hidrocoloide  $\beta$ -glucano, extraído de avena (43) y del hongo *Pleurotus ostreatus* incrementan los niveles de fibra dietética en las fórmulas de pan sin gluten, sin afectar a sus características físicas ni deteriorar la calidad del pan (23); esto se ha visto asociado con la reducción del colesterol en el plasma sanguíneo y un mejor control de los niveles de glucosa en suero en los seres humanos y los animales (57).

En la elaboración de pan, la harina confiere a la masa la capacidad de absorción de agua y la propiedad de ganar volumen (41). Ésta se encuentra formada por almidones y proteínas, siendo el almidón el carbohidrato de mayor proporción en la composición de la harina de arroz, el cual provee azúcares necesarios para que se produzca la fermentación, que será el proceso responsable de la elevación de la masa mediante la producción de CO<sub>2</sub>. Durante la fermentación los gránulos de almidón absorben agua (27).

La harina de arroz no contiene gluten cuya función en las masas de harina de trigo, es formar una red proteica que soporta los gránulos de almidón durante la fermentación y cocción, por lo que su uso en procesos de panificación, se ha visto limitado ya que las proteínas del arroz son incapaces de retener el gas producido durante los procesos de fermentación (16), dando lugar a un producto de bajo volumen específico y una miga muy compacta que no se asemeja a la estructura abierta y suave del pan de trigo común.

Con el objetivo de imitar las propiedades del gluten, se ha recurrido al empleo de sustancias poliméricas que crean propiedades viscoelásticas similares, consiguiendo reforzar la estructura de los panes y retener los gases de fermentación (39). Diferentes estudios han demostrado que el derivado de celulosa, hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC); es el que confiere mejores

características reológicas a la masa de harina de arroz (49) y características organolépticas superiores al producto final (46).

La HPMC, es una celulosa con una estructura química que favorece su solubilidad en agua y que posee una alta capacidad de hidratación, incluso a cambios bruscos de temperatura que permite su uso como emulsificante y espesante (47). Tras ser sometida a calentamiento, forma un gel y a la vez se produce una liberación simultánea de agua, lo cual favorece la humedad de la miga. Durante la gelificación se cree que el HPMC forma enlaces hidrófobos fuertes con otras cadenas de HPMC dando lugar a redes más resistentes (18), que permiten retención de los gases de fermentación de la masa y consecuentemente mejore el volumen del pan en concentraciones del 2% (34).

Otros ingredientes fundamentales en la elaboración de pan son: el agua, que permite la disolución y mezcla homogénea de todos los ingredientes secos, se combina con las proteínas e hidrata los almidones determinando el comportamiento reológico de la masa y calidad del producto final, al cual proporciona suavidad y ternura de la corteza y miga de pan; la sal, que actúa como potenciador de sabor, regulador del proceso de fermentación mediante el control del consumo de azúcares favoreciendo el color de la corteza,

mientras aumenta la capacidad de hidratación de la harina; el azúcar que sirve de alimento a la levadura para la producción de gas durante el proceso de fermentación, favorece la absorción de humedad y retención de agua, proporcionando suavidad a la miga del pan, además proporciona sabor y color a la masa producto de las reacciones de Maillard durante el horneado del pan; y el aceite que actúa como lubricante, haciendo al pan crujiente y suave, beneficiando la extensibilidad de las celdas de la masa, contribuyendo a la estructura de una miga más fina y aumentando el volumen del pan, al repeler el agua disminuye la pérdida de humedad y ayuda a mantener la frescura del pan (2).

Una masa con poca agua daría un producto seco y quebradizo; la humedad del pan le da esta frescura característica, ya que la pérdida de agua desencadena la retrodegradación de los almidones y genera la sensación de envejecimiento del pan (2).

## **2.2 Reología y Reometría**

### **Reología**

La Reología es la ciencia que se dedica al estudio de la deformación y flujo de los materiales. Es el estudio de la manera en que cada material responde a cualquier esfuerzo o tensión externa



(50). Por lo tanto, el campo de la reología se extiende desde la mecánica de fluidos newtonianos, hasta la elasticidad de sólidos de Hooke. La región comprendida entre ambos extremos corresponde a la deformación y todos los tipos de materiales pastosos y suspensiones (40).

Todos los materiales tienen propiedades reológicas diferentes y su estudio es relevante para la determinación de especificaciones de proceso y condiciones de trabajo en ramas como: tecnología del concreto, mecánica de sólidos, composición de polímeros, bioingeniería, industria cosmética, industria alimenticia entre otros (50).

Los alimentos pueden ser clasificados en diferentes grupos respecto a sus características moleculares, de esta manera pueden ser sólidos, geles, líquidos homogéneos, sólidos en suspensión, líquidos y emulsiones (3); cada uno con diferentes comportamientos reológicos.

En la industria alimenticia, el estudio de las características reológicas de los alimentos es necesario en distintos campos, tales como: cálculos de dimensión de tuberías y bombas, determinación

de funcionalidad de ingredientes en desarrollo de productos, control de calidad de producto intermedio o producto final, evaluación de textura en correlación con la evaluación sensorial (50).

El estudio reológico de materiales se lo lleva a cabo mediante reómetros, que son equipos que permiten someter al material a varios tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos para determinar su comportamiento.

### **Fuerza**

Fuerza es todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los materiales. Al aplicar una fuerza sobre una masa, se obtiene una deformación de la misma; sin embargo, la fuerza no constituye un criterio reológico útil, puesto que es mejor considerar una relación de fuerza sobre área ( $F/A$ ), cociente al que se le denomina “esfuerzo” o “tracción” (40).

La unidad de fuerza es el Newton (N) que es una unidad derivada que se define como la fuerza necesaria para proporcionar una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  a un objeto de  $1 \text{ kg}$  de masa, mientras que la unidad de área es el metro cuadrado ( $\text{m}^2$ ). De ahí, que el esfuerzo se mide en  $\text{N/m}^2$  (40).

La fuerza que ejerce un cuerpo es igual al producto de su masa (m) y su aceleración (a), esta viene dada por la siguiente ecuación.

$$F = m * a \quad (\text{Ec1})$$

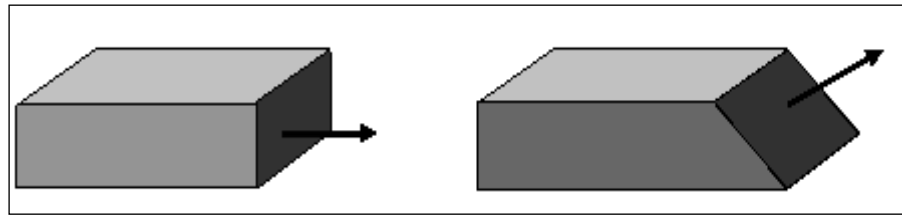
### **Esfuerzo**

La fuerza (F) por unidad de área (A) que se requiere para el movimiento de un fluido, se define como F/A y se denota como " $\sigma$ " (Tensión o esfuerzo de cizalla), tal como se representa en la ecuación Ec2 (40).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec2})$$

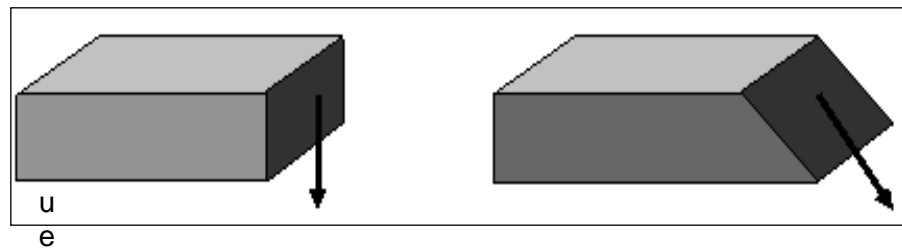
El esfuerzo se da normalmente en libras por pulgadas cuadradas (psi) o pascales (Pa), y se lo puede calcular mediante un estudio físico.

Dependiendo de que la fuerza interna actúe perpendicularmente o paralelamente al área del elemento considerado los esfuerzos pueden ser normales (fuerza perpendicular al área), cortantes (tangenciales o de cizalladura, debido a una fuerza paralela al área), como se muestra en las figuras 2.1 y 2.2 (44).



Fuente: Salazar, T. (2001) (44).

**FIGURA 2. 1 ESFUERZO NORMAL**



Fuente: Salazar, T. (2001) (44).

**FIGURA 2. 2 ESFUERZO CORTANTE**

Se debe tener en cuenta la diferencia entre la fuerza y el esfuerzo, debido a que pueden generar errores en la interpretación de resultados de medición. Por lo tanto, dada la fórmula del esfuerzo ( $\sigma = F/A$ ), debe tenerse claro que si se programa una prueba en fuerzas y las muestras no son exactamente del mismo tamaño, los resultados serán diferentes debido a que las tensiones son diferentes (32).

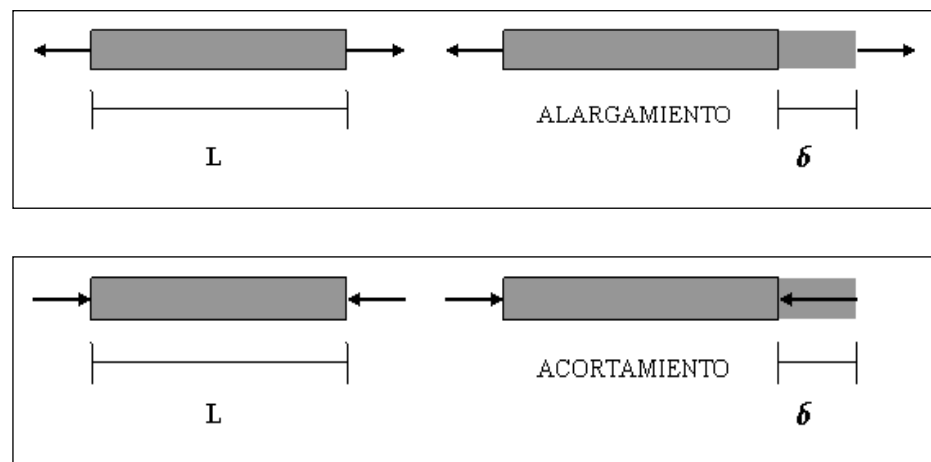
### **Deformación**

Si se aplica una fuerza a un cuerpo, se tendrá como resultado la deformación de dicho cuerpo, que consiste en el cambio del

tamaño o forma cuando es sometido a una tensión. La aplicación de un esfuerzo causa una deformación del material y esta es llamada tensión ( $\gamma$ ), la cual es calculada mediante Ec3 (40).

$$\text{Deformación} = \frac{\Delta Y}{Y} \quad (\text{Ec3})$$

Donde,  $Y$  es la dimensión original de la muestra, y  $\Delta Y$  es el cambio de dimensión por la acción de estrés. Esto usualmente es multiplicado por 100 y expresado en porcentaje de deformación. (32). La figura 2.3, representa de manera gráfica ejemplos típicos de deformación, como lo son la elongación por tensión y el acortamiento por compresión (40).



Fuente: Ramírez (2006) (40).

**FIGURA 2.3 DEFORMACIÓN DEBIDA A ESFUERZOS DE TENSIÓN Y DE COMPRESIÓN, RESPECTIVAMENTE**

En los experimentos de viscosidad solo se considera la magnitud de la deformación, mientras que en los de viscoelasticidad se determina la magnitud de la deformación dividida por el tiempo que esta tarda en producirse; es decir, la velocidad de deformación (40).

### **Fluido**

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte; por lo tanto, en ausencia de este no habrá deformación. Los fluidos pueden clasificarse de acuerdo con la relación del esfuerzo de corte aplicado y la relación de la deformación. La relación entre el esfuerzo cortante requerido para inducir una determinada velocidad de deformación en cizalla, caracteriza el comportamiento reológico de un fluido (40).

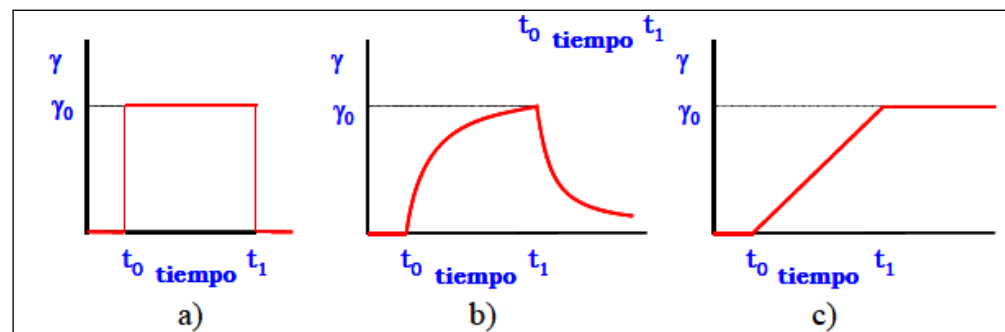
Existen tres tipos de fluidos: newtonianos, que presentan proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación; no newtonianos, que no presentan proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación; y viscolásticos, que se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos. La relación entre el esfuerzo

cortante aplicado y la velocidad viene dada por la ecuación Ec.4.  
(40).

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dt} = \mu \cdot \gamma \quad (\text{Ec.4})$$

### Viscoelasticidad

Si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico (figura 2.4 a), este se deforma hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial. Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso (figura 2.4 b), este se deforma pero no recupera su forma original, un comportamiento intermedio es el comportamiento viscoelástico (figura 2.4 c), donde el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada (50).



Fuente: García (2008) (13)

**FIGURA 2. 4 COMPORTAMIENTO a) ELÁSTICO, b)  
VISCOSO, c) VISCOELÁSTICO**

La *Viscoelasticidad lineal* se basa en el principio de que la respuesta (deformación) a cualquier tiempo es directamente proporcional a su fuerza impulsora (esfuerzo). De esta forma, si la deformación y la velocidad de deformación son infinitesimales y la relación esfuerzo-deformación puede ser descrita por ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes, se tiene un comportamiento viscoelástico lineal. La determinación de la viscoelasticidad lineal puede ser usada para definir la respuesta de los materiales que siguen este comportamiento en distintos tipos de experimentos en cizalla simple (50).

### **Reometría**

La reometría es la ciencia que describe tanto los métodos de medida, como los instrumentos que permiten obtener los datos reológicos de un material. Ésta determina las relaciones cuantitativas y cualitativas entre la deformación, así como la tensión mecánica y sus derivadas (40).

Entre los instrumentos que se usan para medir las características reológicas, se encuentran los reómetros, los cuales permiten someter al material en estudio a varios tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos (40).



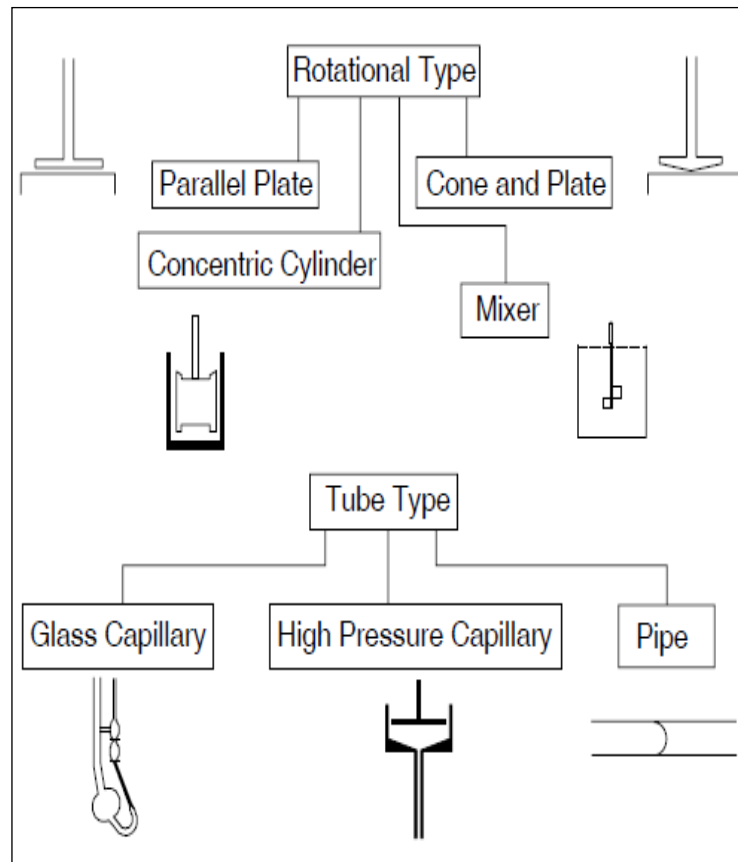
## **Reómetros**

El reómetro es un instrumento capaz de medir las propiedades reológicas fundamentales de un material o fluido. Mide tanto la historia del esfuerzo, como la deformación de un material del cual no se conoce su relación constitutiva (40).

Un reómetro se refiere a un dispositivo que pueda medir la viscosidad y la tensión de producción de un material (esfuerzo umbral) a diferentes velocidades de cizalla. El reómetro es capaz de generar diferentes velocidades de cizalla con el fin de generar un reograma (44).

### **Tipos de reómetros**

Los reómetros son capaces de medir las características de alimentos fluidos y semi-sólidos, pueden diferenciarse en dos categorías generales: rotacionales y tubulares, cada categoría a la vez puede subdividirse en otros tipos de reómetros basados en los principios generales, tal como se muestra en la figura 2.5 (50).



Fuente: Steffe, J.F. (1992) (50).

**FIGURA 2. 5 REÓMETROS COMUNES DIVIDIDOS EN DOS CATEGORÍAS PRINCIPALES: ROTACIONALES Y TUBULARES.**

El principio de un *reómetro de tubo capilar* se basa en la ecuación de Hagen-Poiseuille, la cual es válida para los líquidos newtonianos. Básicamente, con un viscosímetro capilar, se necesita medir la caída de presión y el caudal independientemente para medir la viscosidad. En un reómetro de tubo capilar, el líquido es

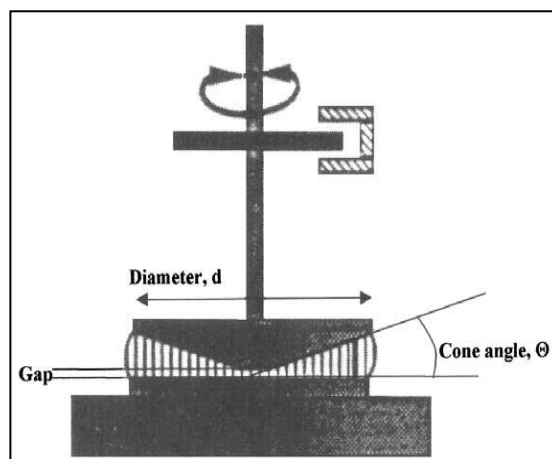
forzado a través de un tubo capilar cilíndrico con una superficie interna lisa.

*Los reómetros rotacionales* basan su funcionamiento en la resistencia a la torsión que ofrece un líquido al giro de un husillo de características conocidas, sumergido en el líquido en estudio. El cilindro o disco giratorio, está acoplado con un muelle al árbol motor que gira a velocidades determinadas (13).

Los instrumentos rotacionales pueden operar en modo de deformación constante o modo oscilatorio. Algunos funcionan en condiciones de tensión controlada, facilitando la recolección de datos, el análisis de materiales a velocidades de cizallamiento bajo y la investigación de límite elástico. Esta información es necesaria para entender la estructura interna de los materiales (3).

En la actualidad existe una amplia gama de reómetros de alta tecnología que permiten realizar todas las pruebas conocidas para la caracterización reológica de los materiales; proporcionando además la posibilidad de intercambiar los sistemas de geometrías usadas en función de la prueba a realizarse (3).

Durante el uso de una *geometría de cono y plato*, el vértice del cono se pone en estrecha proximidad de una placa horizontal (figura 2.6). El fluido llena el espacio entre el cono y la placa, el cono gira, y el torque es medido a diferentes velocidades de rotación (3).

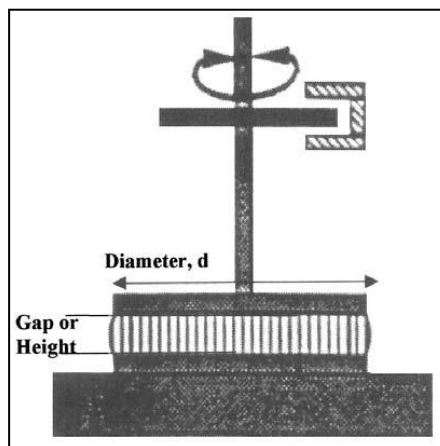


Fuente: Menard (1999) (32).

### FIGURA 2.6 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA GEOMETRÍA DE CONO Y PLATO.

Este sistema de geometrías se puede utilizar para obtener curvas de tipos de estrés de cizalla de corte y la tensión de cizallamiento en función del tiempo en las curvas de tipos de cizallamiento constante. Durante la carga de la muestra debe dejarse un tiempo razonable para la recuperación de la estructura de la muestra para evitar errores en las mediciones reológicas (3).

Las *geometrías de platos paralelos*, consisten en dos discos de radio  $r_0$  separados por una brecha  $h$  (figura 2.7). Asumiendo un fluido constante, laminar e isotérmico, el cálculo de la velocidad de cizallamiento puede calcularse a partir del cociente entre el producto de la velocidad angular  $\Omega$  por el radio del disco  $r_0$  y la altura  $h$  entre los discos (3).



Fuente: Menard (1999) (30).

### FIGURA 2. 7 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA GEOMETRÍA DE PLATOS PARALELOS.

Aunque el campo de cizallamiento es no homogénea, la geometría de discos o platos paralelos es útil en el manejo de dispersiones que contienen partículas relativamente grandes, tales como dispersiones de almidón gelatinizado. Yang & Rao (1998), utilizaron una geometría de disco paralelo para obtener datos

reológicos durante la gelatinización de una dispersión de almidón de maíz (59).

### **Propiedades reológicas**

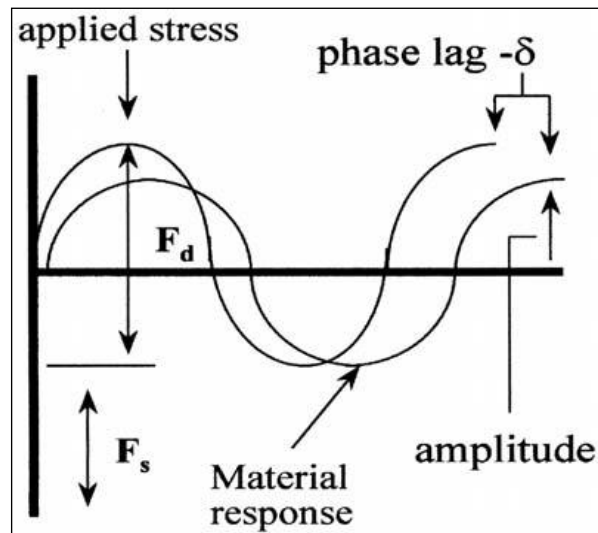
Existen tres maneras de deformar una sustancia: cizallamiento, extensión y compresión de la masa. Es posible llevar a cabo pruebas para la medición del comportamiento reológico de los materiales para todos los tipos de deformación, tanto en condiciones contantes como dinámicas; y comparar sus módulos (50). Debido a la naturaleza del fluido en estudio y las características del equipo usado para los experimentos, se centrará la investigación en la deformación de materiales viscoelásticos y su caracterización mediante pruebas oscilatorias.

Los experimentos más comunes empleados, basados en la viscoelasticidad lineal para la caracterización de materiales pueden ser: relajación de esfuerzos, ensayo de fluencia, recuperación elástica, experimentos dinámicos u oscilatorios.

### **Experimentos dinámicos u oscilatorios.**

El análisis mecánico dinámico (AMD) puede ser descrito como la aplicación de una fuerza oscilatoria a una muestra y el análisis de la respuesta de los materiales a esta fuerza. La fuerza aplicada se

llama esfuerzo ( $\sigma$ ). Cuando el material es sujeto a esfuerzo, este presentará una deformación ( $\gamma$ ). En este tipo de experimentos la deformación aplicada varía sinusoidalmente (figuras 2.8) (32).



Fuente: Menard (1999) (32).

**FIGURA 2. 8 MATERIAL VISCOELÁSTICO: ESFUERZO, DEFORMACIÓN Y DESFASE ENTRE AMBOS.**

El AMD suministra una fuerza oscilatoria, provocando una tensión sinusoidal que es transmitida a la muestra. Mediante la medición de la amplitud de la deformación entre el pico de la onda sinusoidal y el desfase entre la tensión y la deformación sinusoidal, pueden ser calculados los módulos, la viscosidad y la amortiguación. Muchos estudios han usado curvas en las que se muestra la relación esfuerzo-deformación. La pendiente de la línea obtenida de esta

relación, mide la rigidez de los materiales, que se definen como módulos. Los módulos dependen de la temperatura y la aplicación de esfuerzo (32).

### **Módulo de almacenamiento**

El módulo de almacenamiento ( $G'$ ) es la medición de cuan elástico es el material. Está asociado con la energía almacenada en el material. Así pues, el módulo de almacenamiento es el cociente entre el esfuerzo que está en desfase con la deformación (13).

### **Módulo de pérdida**

El módulo de pérdida ( $G''$ ), es la medida de cuan viscoso es el material, este es asociado con la energía disipada por el material. El módulo de pérdidas es el cociente entre el esfuerzo que está desfasado  $\pi/2$  con la deformación (13).

La tangente de pérdida ( $\text{tg } \delta$ ), representa un parámetro indicativo de la relación entre la energía disipada y la energía almacenada por el material, así como de la viscoelasticidad del mismo:

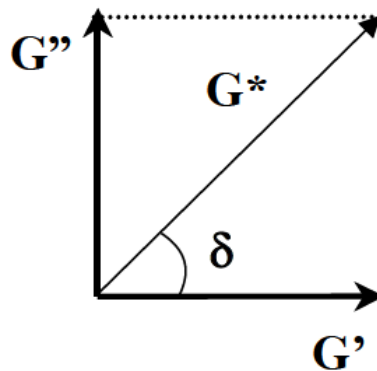
- Si es un material elástico, el esfuerzo y la deformación están en fase y  $\delta \approx 0^\circ$ .
- Si el material es viscoso, entonces el esfuerzo y la deformación están en desfase de máximo  $\delta \approx 90^\circ$ .



- Si es un material viscoelástico,  $\delta$  tendrá valores entre 0 y 90°.

### Módulo complejo

El módulo complejo ( $G^*$ ) es la representación matemática de un módulo considerado como la suma de la parte real y la imaginaria de los vectores de los módulos elástico y viscoso (13), como se muestra en la figura 2.9.



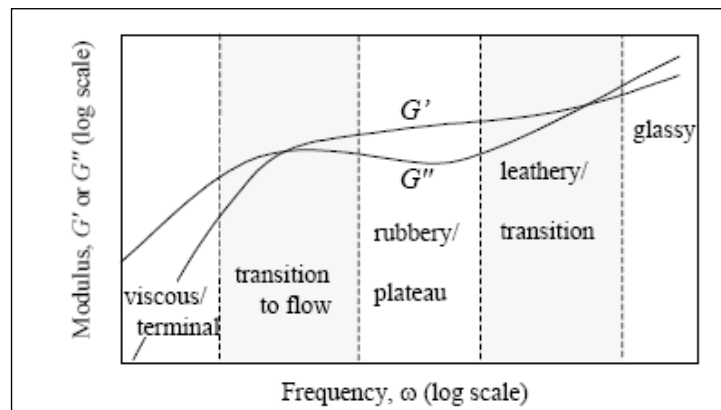
Fuente: García (2008) (13)

**FIGURA 2. 9. REPRESENTACIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO COMO COMBINACIÓN DE DOS VECTORES, QUE SON LOS MÓDULOS ELÁSTICO Y VISCOSO**

Atendiendo a la magnitud que se modifica, es posible distinguir entre barridos de frecuencia y barridos de temperatura.

Los *barridos de frecuencia* (temperatura constante) son normalmente empleados para la comparación de efectos de varios ingredientes en un mismo tipo de alimento, estos muestran como

los comportamientos elástico y viscoso de un material cambian con la velocidad de esfuerzo y deformación (50).



Fuente: Menard (1999) (30).

### FIGURA 2. 10 COMPORTAMIENTO TÍPICO DE UN POLÍMERO AL REALIZAR UN BARRIDO DE FRECUENCIA.

Como se observa en la figura 2.10 a muy altas frecuencias, el módulo elástico es mayor que el viscoso: el polímero se comporta como un típico polímero cristalino. Como consecuencia de una reducción en la frecuencia se produce una mayor movilidad en las cadenas poliméricas y tiene lugar una transición hasta alcanzar un estado de comportamiento "gomoso", en el que el módulo elástico sigue siendo mayor que el viscoso; la presencia de esta meseta o "plateau" es más patente en polímeros de alto peso molecular.

A menores frecuencias comienza el flujo del material y el módulo elástico disminuye hacia valores más próximos al viscoso. Entre la región cristalina y la zona gomosa existe una zona de transición en la que se observa una inversión en los valores de los módulos elástico y viscoso al mismo tiempo que se alcanza un valor máximo en el módulo viscoso, como consecuencia de la aportación de la energía necesaria para producir un aumento en la movilidad de las cadenas del polímero (13).

### **Determinación de la región lineal**

Para evaluar el comportamiento reológico de un material viscoelástico en un reómetro, se requiere estudiar ambos comportamientos: viscoso y elástico; siendo necesario que el material se comporte de manera lineal. La región lineal es donde el material en estudio tiene el mínimo de variación frente a esfuerzos y niveles de deformación variables, sin que se afecten los datos obtenidos de  $G'$ ,  $G''$  y  $\text{Tan}\delta$ ; ya que estos son independientes de estos parámetros.

Para encontrar la región lineal de los materiales, es necesario realizar barridos de frecuencia, deformación y/o tiempo; con el objetivo de establecer los parámetros de estudio aplicables al material de interés (26).

### 2.3 Propiedades reológicas de la masa de pan

Las propiedades reológicas de la masa de pan constituyen un buen indicador de la calidad final del producto terminado. Para la evaluación reológica de la harina de trigo usada en la elaboración de pan, la industria utiliza métodos empíricos, tales como el farinógrafo, amilógrafo y consistógrafo, los mismos permiten obtener datos para prever su eficiencia. Estos equipos determinan la fuerza necesaria para mezclar una masa a velocidad constante, calculando la cantidad de agua que la masa requiere absorber para alcanzar una determinada consistencia, puede obtenerse información sobre el tiempo de desarrollo de la masa en minutos y el grado de ablandamiento de la misma (27).

Las medidas dinámicas de los módulos de una geometría regular sometida a pequeñas amplitudes de deformación (<1%) (Pruebas oscilatorias), son una técnica deseable en la caracterización de la influencia de las masas, debido a que ofrece resultados más exactos y sensibles para la discriminación de las masas (1).

Debido a sus propiedades físicas, las masas para pan son consideradas como polímeros o materiales viscoelásticos; mostrando un comportamiento más complejo por el hecho de que sus propiedades varían en función del tiempo luego de su fase de

mezclado, atendiendo a procesos internos de la masa tales como pérdida de humedad, fermentación, etc. (33).

Los componentes moleculares de las harinas, principalmente las proteínas, determinan el comportamiento reológico y la calidad de las mismas. Cuando la harina y el agua se mezclan y son sometidas a un amasado, ocurre una desnaturalización de las proteínas del gluten, una masa sometida a fuerzas externas mantiene enlaces débiles que se pueden romper y reformar, seguidos del relajamiento de la masa, total o parcial bajo la aplicación de un esfuerzo (30).

Las propiedades reológicas de las masas elaboradas de harina de trigo, son análogas a las propiedades del gluten (28). La gluteína es la porción a la que se le atribuye la elasticidad y fuerza, mientras que las gliadinas actúan como adhesivos que mantienen unidas a las partículas de gluteína y son responsables de la viscosidad de la masa (54).

La tabla 2.3 muestra algunas operaciones comunes a las que se somete la masa de pan durante su operación mecánica, evidenciando que el rango de velocidades a la que está sometida

es sumamente amplio ( $10^{-4}$  a  $70 \text{ s}^{-1}$ ) y el tipo de deformación que sufre es diverso (10).

**TABLA 2.3**

**VELOCIDADES Y TIPO DE DEFORMACIÓN CARACTERÍSTICAS DE LAS MASAS PARA PAN DURANTE SU PROCESAMIENTO.**

<b>Proceso</b>	<b>Vel. Deformación (<math>\text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>Tipo de Deformación</b>
Mezclado	70	Cizalla
Prueba	$10^{-3}$ a $10^{-4}$	Extensión biaxial
Horneado	$10^{-2}$ a $10^{-3}$	Extensión biaxial

Fuente: Dobrasczczyk (1997)

Modificada por los autores: Guerrero & Llerena (2015)

Hayta & Schoefield (2005), encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre resultados de propiedades reológicas de masa de pan de harina de trigo, obtenidas mediante análisis dinámico y características físicas del producto terminado, pudiendo establecer una relación entre el valor de  $G'$  de la masa y el volumen del pan. Un valor alto del módulo de almacenamiento puede sugerir una fuerza mayor a la dada por las proteínas de la red de gluten; mientras que el módulo de pérdida se ve afectado por la cantidad y calidad proteica para el caso del pan de harina de trigo (19).

## 2.4 Germinación de granos

El grano o semilla es la unidad de reproducción sexual de todas las plantas, cuya función es la de multiplicar y perpetuar su especie. El grano o semilla debe transformarse en plántula, capaz de valerse por sí misma y, finalmente convertirse en una planta adulta.

Para que este proceso se lleve a cabo, es necesario que la semilla disponga de una serie de condiciones ambientales favorables, las cuales son: temperatura adecuada, un sustrato húmedo y disponibilidad de oxígeno (12).

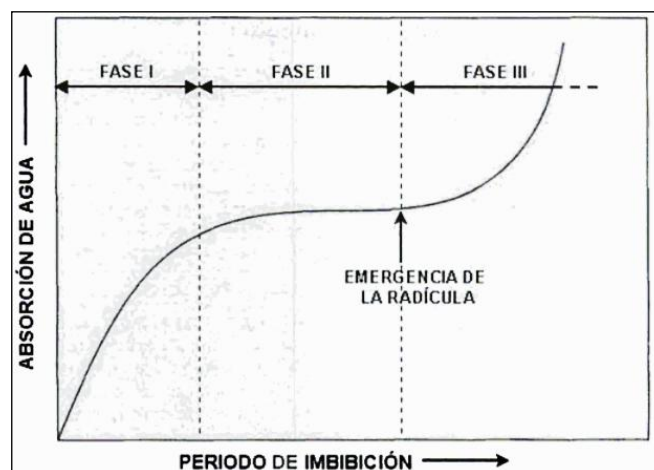
### Proceso de germinación

Cuando una semilla germina, la primera estructura que aparece en la mayoría de las especies es la radícula. En el proceso de germinación se pueden distinguir tres fases:

- a) **Efecto de la hidratación:** El primer paso de la germinación es la absorción del agua (imbibición). En esta fase se produce una intensa absorción de agua por parte de los distintos tejidos que forman la semilla. Las partículas coloidales de la semilla forman una red miscelar, medianamente rígida. Cuando el agua penetra en las semillas una fracción ocupa los espacios libres y la otra se une químicamente a las sustancias de las que está

compuesta la semilla. Existe un hinchamiento de la semilla y un aumento proporcional de la actividad respiratoria.

- b) **Fase de germinación:** Es el proceso más importante, es aquí donde se producen las transformaciones metabólicas necesarias para un adecuado desarrollo del embrión. En esta fase, la absorción del agua se reduce notablemente hasta llegar a detenerse.
- c) **Fase de crecimiento:** Es la última fase de la germinación y está asociada con la aparición de la radícula (crecimiento visible). Esta fase se caracteriza en el aumento tanto de la actividad respiratoria como de la absorción de agua, concluyendo el proceso germinativo.



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia. (2003) (53).

**FIGURA 2. 11 DIAGRAMA DE LAS FASES DE LA IMBIBICIÓN DE AGUA POR UN SEMILLA, MEDIDA MEDIANTE EL INCREMENTO EN PESO FRESCO DURANTE EL PROCESO DE GERMINACIÓN.**



Como se observa en la figura 2.11, en la fase I y II de la germinación los procesos son reversibles, a partir de la fase de crecimiento se entra en una situación fisiológica irreversible. El grano que haya pasado la fase de germinación tendrá que pasar a la fase de crecimiento y dar origen a una plántula, o de lo contrario morir (53).

### **Germinación de arroz**

Para germinar, el arroz necesita una temperatura mínima de 10°C, considerándose óptimo entre 30°C y 35°C, por encima de 40°C no se produce la germinación (20).

Durante la germinación, ocurren cambios metabólicos en la semilla debido a la intensa actividad enzimática, que modifican su composición química y mejoran sus características nutricionales. La germinación de la semilla de arroz integral, además de mejorar la digestibilidad de la proteína y del almidón, aumenta la disponibilidad de los minerales y el contenido en fibra alimentaria y favorece notablemente los compuestos bioactivos como el ácido  $\gamma$ -amino butírico (GABA), compuestos fenólicos y antioxidantes como componentes fenólicos,  $\gamma$ -oryzanol y vitaminas (7).

Estudios anteriores han determinado que factores como la variedad de arroz usada, el tiempo y temperatura de germinación, juegan un

papel importante en la composición y desempeño de los derivados del arroz germinado. Cáceres *et al.* (2014) estudió el efecto del uso de diferentes variedades de arroz germinado a distintas temperaturas, determinando que la mayor cantidad de GABA se obtuvo en la variedad GO germinada a 34°C durante 96 horas de germinación, mientras el contenido en polifenoles aumentó en todas las variedades estudiadas cuando la germinación se realizó a 28°C durante 96 horas. De las variedades estudiadas, las destacadas fueron la GO por su mayor actividad antioxidante e INIAP 15 por su contenido de GABA y compuestos fenólicos (7).

La germinación de arroz, también tiene efectos sobre el comportamiento de la harina y la calidad final de los productos terminados de panadería.

En varias investigaciones (Sánchez *et al.*, 2012; Arriciaga *et al.*, 2013; Cornejo & Rosell, 2015) se ha estudiado el impacto que provoca el tiempo de germinación en las propiedades físico-químicas de la harina de arroz integral germinado, tales como: temperatura de gelatinización, propiedades de hidratación, índice de absorción de aceite, número de caída, viscosidad y consistencia; encontrando diferencias significativas en los resultados obtenidos, siendo de mayor importancia los que conciernen a las propiedades

de hidratación que son los principales responsables de la calidad final del pan. En el apéndice A, se han recopilado los resultados de las propiedades físico-químicas de mayor impacto, de acuerdo a la experimentación de los mencionados autores.

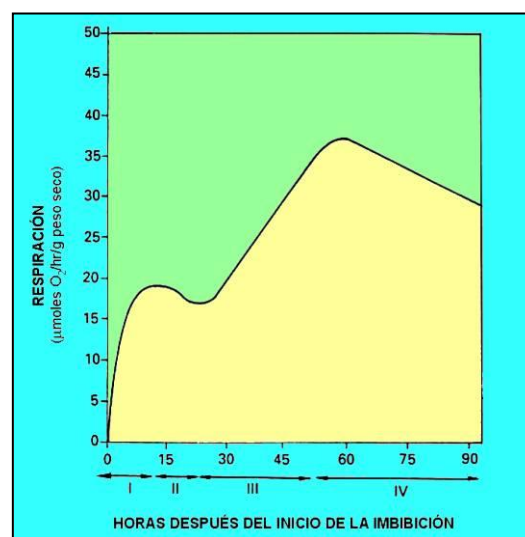
Cornejo & Rosell (2015), probaron que el comportamiento negativo de las harinas con más de 24 horas, puede ser atribuido al aumento de las actividades de la  $\alpha$ -amilasa que provoca la degradación excesiva del almidón, dando como resultado una miga húmeda y pegajosa de menor calidad debido a su efecto sobre la textura y propiedades de cohesividad. En el apéndice B, se muestran resultados de dichos ensayos (9).

Cornejo *et al.* (2014), determinaron que el tiempo de germinación tiene un efecto significativo sobre el valor nutricional en pan de arroz integral, concluyendo que 48 horas de germinación proveen al pan propiedades nutricionales superiores en cuanto al contenido de proteínas, lípidos y componentes bioactivos (GABA y polifenoles), aumentando la actividad antioxidante y reduciendo el contenido de ácido fítico e índice glucémico (8).

## Reacciones bioquímicas de la germinación de arroz

La absorción de agua por parte de semilla desencadena una secuencia de cambios metabólicos que incluyen: la respiración, la síntesis proteica y la movilización de reservas nutricionales.

La respiración tiene como objetivo la formación de ATP y pirimidín nucleótidos, necesarios para la actividad metabólica que se da durante la germinación. Ésta ocurre en cuatro fases diferenciables por el consumo de  $O_2$ , tal como se puede observar en la figura 2.12:



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2003) (53).

### FIGURA 2. 12 EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD RESPIRATORIA DURANTE LA GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS.

Durante la Fase I, el aumento de la actividad respiratoria es proporcional al incremento de la hidratación de los tejidos durante

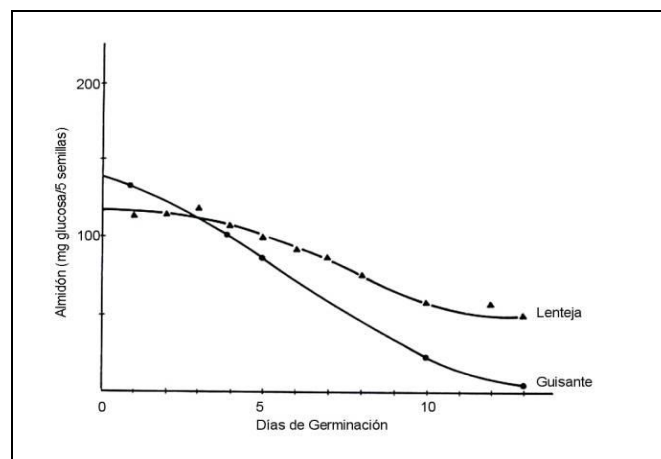
las primeras 12 horas, posiblemente el principal sustrato es la sacarosa. En la Fase II se evidencia estabilidad del consumo de  $O_2$  entre las 12 y 24 horas desde el inicio de la imbibición. En la Fase III se produce un segundo incremento de la actividad respiratoria asociado a la mayor disponibilidad de  $O_2$  como consecuencia de la ruptura de la testa producida por la emergencia de la radícula; mientras, en la última fase se da una considerable disminución de la respiración, que coincide con la desintegración de los cotiledones después de que han exportado las reservas almacenadas (53).

Las semillas contienen reservas alimenticias importantes que le permitirán alimentarse durante su crecimiento y desarrollo, estas reservas se encuentran principalmente formando cuerpos intracelulares que contienen lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos inorgánicos, las mismas que pueden estar almacenadas en el embrión (cotiledones) o en tejidos como el endospermo. En los cereales predominan los hidratos de carbono, en especial el almidón (53).

Al iniciarse la germinación de las semillas, cuando las células están suficientemente hidratadas, se produce la activación de la síntesis proteica y formación de enzimas hidrolíticas que son las que promueven la movilización de las sustancias de reserva. La

movilización de las sustancias de reserva, requiere de un proceso previo de hidrólisis para liberar compuestos de menor peso molecular que pueden ser utilizados durante el crecimiento inicial de la plántula (53).

Durante la germinación, los componentes del almidón (amilosa y amilopectina) son hidrolizados por la  $\alpha$ -amilasa y la  $\beta$ -amilasa transformándolo en glucosa. La degradación del almidón se incrementa progresivamente durante el proceso de germinación, es lenta al principio e incrementa su velocidad en el tiempo, hasta prácticamente la desaparición del polisacárido (53), de manera como se muestra en la figura 2.13.



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2003) (53).

**FIGURA 2. 13 VARIACIONES EN EL CONTENIDO DE ALMIDÓN DE LOS COTILEDONES EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS. [FIGURA modificada de Barceló, J. et al. 1984 "Fisiología Vegetal". Ediciones pirámide, S.A]**

Existe un considerable aumento en el contenido de azúcares reducidos luego del primer día de germinación medido en mg/g de materia seca, mientras se observa un incremento de la actividad de la amilasa, la misma que se mostró lineal durante los primeros 3 días (53). Mediante esta investigación observó que la reducción de azúcares no fue significativo hasta el primer día de germinación, luego del cual si varió significativamente. Los cambios en el contenido de azúcares reducidos pueden ser atribuidos a la hidrólisis del almidón por acción de la amilasa endógena producida durante la germinación (56).

Otros importantes efectos en la composición química del grano de arroz durante la germinación son: el incremento del contenido de aminoácidos libres, proteínas solubles y actividad proteolítica, así como el decremento de contenido proteico total. El contenido total de proteínas decrece significativamente con el incremento en la actividad de las proteasas alrededor del quinto día de germinación presentando aún una baja actividad (56). Durante la hidrólisis de las proteínas, éstas se transforman en péptidos y aminoácidos libres de bajo peso molecular (53).

# CAPÍTULO 3

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Materia Prima

#### **Harina de arroz integral**

Para la ejecución de este proyecto se utilizó harina de arroz integral germinado a diferentes tiempos, elaborada a partir de arroz paddy variedad INIAP 15, cuyo grano tiene una longitud aproximada de 7.5 cm.

La semilla variedad INIAP 15 usada para elaborar la harina fue adquirida directamente en el Instituto Nacional de Investigación Agrícola y Pecuaria (INIAP).

#### **Agua**

El agua usada para el presente estudio fue agua potable embotellada adquirida en un supermercado local.



**Sal**

La sal usada para este estudio es sal yodada de mesa, adquirida en un supermercado local.

**Azúcar**

El azúcar usado para el experimento es azúcar blanco de caña, adquirida en una cadena de supermercados local.

**Aceite de girasol**

El aceite usado para la elaboración de la masa, fue aceite de girasol refinado marca “La Favorita”, adquirido en un súper mercado local.

**Hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC)**

La hidroxipropilmetilcelulosa usada en la elaboración de masa para pan, proviene del proveedor Dow Chemical Company (Michigan,USA).

**3.2 Arroz con diferentes tiempos de germinación**

La harina de arroz germinado, fue realizada usando el método de germinación de semillas expuesto por Sánchez *et al.* (2012).

El método de germinación consiste en desinfectar el grano de arroz descascarillado con una solución de hipoclorito de sodio al 0,1% por 30 minutos, enjuagar y dejar remojar con agua destilada, en proporción 1:5 (arroz: solución), en una incubadora por 24 horas a  $28 \pm 1$  °C y humedad relativa del 100%, durante 12, 24 y 48 horas (45).

Para la obtención de la harina se dejó secar las semillas germinadas en una estufa a  $50 \pm 1$  °C por 24 horas, hasta una humedad de 10% aproximadamente. Una vez seco el grano, moler hasta que la harina atravesase un tamiz de 10 micras (45). Este proceso se llevó a cabo por cada tiempo de germinación.

### **3.3 Determinación de propiedades reológicas de las mezclas de la masa de pan**

#### **Preparación de Muestras**

Para preparar las muestras se tomó la formulación del estudio realizado por Marco & Rosell (2008), que consiste en tomar la mitad de la cantidad de agua y calentar a 95° C, luego mezclar durante 5 minutos con la mitad de la harina y dejar reposar 15 minutos para luego proceder a mezclar los demás ingredientes con el resto de agua a temperatura ambiente (29). Para efectos de este estudio, no se colocó levadura para evitar que las burbujas de aire formadas durante su metabolismo provoquen errores en la medición de las

características reológicas, según recomendaciones de Murgueitio *et al.* (2013) (36).

Este procedimiento se lo realizó para cada muestra con los diferentes tipos de harina.

### **Parámetros de pruebas reológicas**

Para determinar las propiedades reológicas de las masas en estudio, se usó el reómetro KINEXUS PRO, marca Malvern, propiedad del Laboratorio de ensayos metrológicos y de materiales (LEMAT) de la ESPOL (Figura 3.1), la metodología de uso fue la establecida por el manual del equipo.

Se llevaron a cabo dos tipos de análisis: a) barridos de deformación con dos diferentes condiciones para la determinación de la región viscoelástica lineal; y b) barrido de frecuencia de las muestras para el análisis del comportamiento de los módulos de almacenamiento y pérdida a un porcentaje de deformación constante de 0.1%.



**FIGURA 3. 1 REÓMETRO KINEXUS PRO, MARCA MALVERN, REALIZANDO EL ANÁLISIS DE UNA MUESTRA DE MASA DE HAI-0H.**

### **Barridos de deformación**

Se realizaron barridos de deformación usando diferentes parámetros:

- I) Geometría de platos paralelos con 20 mm de diámetro en la parte superior, 40mm en la parte de abajo, gap de 2 mm, frecuencia constante de 1 Hz, temperatura constante de 25 °C y rango de deformación de 0.01 a 100% (26), usada para determinar la región viscoelástica lineal, y que fue aplicada sólo a la muestra de HAI sin germinar. En ambos casos se usó la secuencia Toolkit \_O001 Amplitude Table (Strain Control).

II) Geometría de cono y plato, el primero con un diámetro de 40 mm y un ángulo de  $4^\circ$  y, el segundo con un diámetro de 40 mm, gap de 1mm, frecuencia constante de 1 Hz, temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$  y rango de deformación de 0.1 a 100%, el cual fue aplicado a las masas de HAI sin germinar y germinada por 12, 24 y 48 horas.

Para determinar el intervalo de deformación donde la masa obtuvo un comportamiento lineal, se identificó visualmente la porción de la curva que denotaba mayor linealidad, luego se aplicó una regresión lineal a dicho intervalo de deformación, corroborando mediante el valor obtenido de su factor de correlación  $r$ , su ajuste al modelo lineal.

### **Barridos de frecuencia**

Para el estudio de las propiedades reológicas de la masa, se realizaron pruebas oscilatorias con barrido de frecuencia cuyos parámetros fueron: frecuencia angular de 0,1-100 rad/s a temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$  y una deformación constante de 0,1%, determinado mediante el cálculo de la región viscoelástica lineal. La geometría usada fue platos paralelos al igual que en la determinación de la región lineal con un gap de 2mm, secuencia

"Oscillation frequency table". Esta prueba fue aplicada a las muestras de HAI sin germinar y germinada por 12, 24 y 48 horas.

### **3.4 Análisis estadístico**

#### **Diseño de Experimentos**

Para evaluar los efectos del uso de HAIG en la masa de pan, se realizó un diseño de experimentos de un sólo factor que es la germinación del arroz, con dos niveles que corresponden a los tipos de tratamientos comparados. El segundo experimento, fue también de un sólo factor, que fue el tiempo de germinación del arroz usado para la elaboración de la harina, con tres niveles que corresponden a la etapa de germinación (0, 12 y 24 horas). La nomenclatura usada para mencionar los tratamientos se detalla en la tabla 3.1. Ambos diseños de experimentos tienen como variables de respuesta los valores de  $G'$  y  $G''$  por separado. Cada muestra se analizó por triplicado.

**TABLA 3.1**  
**CÓDIGOS DE MUESTRAS POR TRATAMIENTOS DEL**  
**ARROZ INTEGRAL USADOS PARA LA ELABORACIÓN DE**  
**HARINA PARA MASA DE PAN.**

<b>CÓDIGO TRATAMIENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
HAI-0H	Harina a base de arroz integral sin germinar
HAIG- 12H	Harina a base de arroz integral de 12 horas de germinación
HAIG-24H	Harina a base de arroz integral de 24 horas de germinación
HAIG-48H	Harina a base de arroz integral de 48 horas de germinación

Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

### **Análisis de datos**

Se procedió a calcular la media de cada observación, con el objetivo de tener un grupo homogéneo de datos para cada tipo de tratamiento.

Previa selección del método estadístico a usar, se identificó la normalidad de la distribución de datos realizando el análisis de sesgo y la curtosis estandarizada. La comparación de muestras múltiples se lo realizó con el fin de evaluar las diferencias

significativas entre las muestras por medio de análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de múltiples rangos.

Para describir la diferencia entre pares de muestra con un 95% de confianza se utilizó el HSD de TUKEY.

Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo usando el programa Statgraphics Centurion 16 (Sthatical Corporation, UK).



# **CAPÍTULO 4**

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Efecto de la Germinación en las Características Reológicas de la Masa de Pan con Harina de Arroz.**

**Análisis estadístico de resultados de barrido de frecuencia de masas para pan de HAI-0H y HAIG-24 H, en función de  $G'$  y  $G''$ .**

**Resultados de comparación para el módulo de almacenamiento ( $G'$ ).**

Se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA), ya que estadísticamente se demostró que las muestras tienen una distribución normal, por lo que se planteó evaluar la hipótesis nula de que las medias de  $G'$  de las masas con HAI-0H y HAIG-24H son iguales, versus la hipótesis alterna de que las medias de  $G'$  no son iguales.

Los resultados del análisis de varianza, determinaron un valor de  $p=0$ , lo que indica que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna con un 95% de confianza. Se puede concluir que las muestras si presentan diferencia significativa.

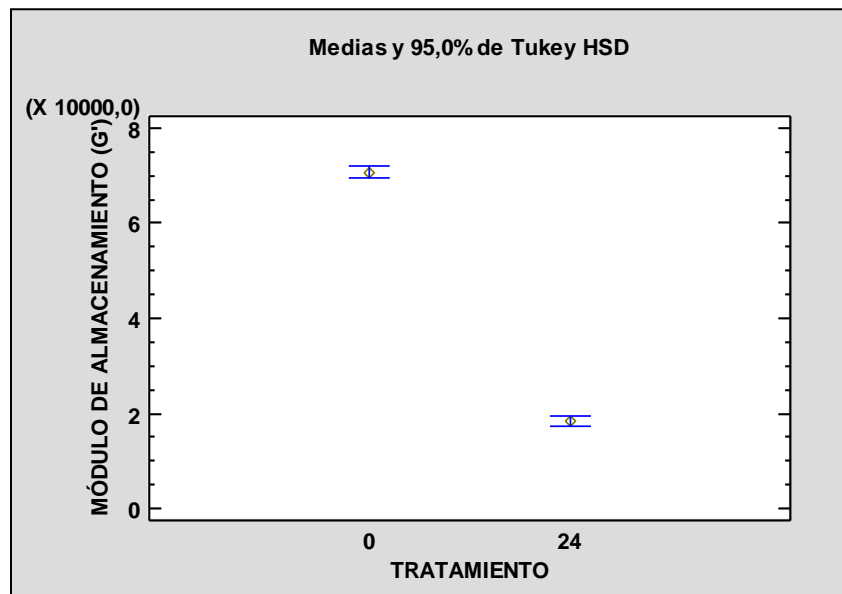
La tabla 4.1, presenta la prueba de múltiples rangos en la cual indican que los dos grupos no se distribuyen en una misma columna, comprobando la conclusión de la tabla ANOVA.

**TABLA 4.1**  
**PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA G' POR**  
**TRATAMIENTO APLICADO A HAI-0H Y HAIG-24H**

<b>CÓDIGO MUESTRA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (Pa)</b>	<b>Desviación Estándar (Pa)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
24	23	18386,5	1413,14	X
0	23	70717,3	5435,16	X

Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

El gráfico 4.1, diagrama de medias: muestra que si existe diferencia significativa entre las masas con HAI-0H y HAIG-24H con un 95,0% de confianza.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

**GRÁFICO 4.1. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA EL MÓDULO DE ALMACENAMIENTO G' POR TRATAMIENTO APLICADO HAI-0H Y HAIG-24H**

Mediante el diagrama de medias, se evidencia que el componente elástico  $G'$  tiene valores menores en la masa de arroz germinado con 24 horas de tiempo de germinación con respecto a la masa de arroz con harina de arroz integral sin germinar, esto puede indicar que con la aplicación del tratamiento de germinación al grano de arroz, el módulo elástico tiende a disminuir.

**Resultados de comparación para módulo pérdida ( $G''$ ).**

Se procedió a realizar el análisis de varianza ANOVA, ya que estadísticamente se corroboró que las muestras tienen una

distribución normal, por lo que se planteó evaluar la hipótesis nula donde las medias de  $G''$  de las masas con HAI-0H y HAIG-24H son iguales, versus la hipótesis alterna de que las medias de  $G''$  no son iguales.

Los resultados del análisis de varianza determinaron un valor de  $p=0$ , lo que indica que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna con un 95% de confianza. Por lo tanto se determina que las muestras si presentan diferencia significativa.

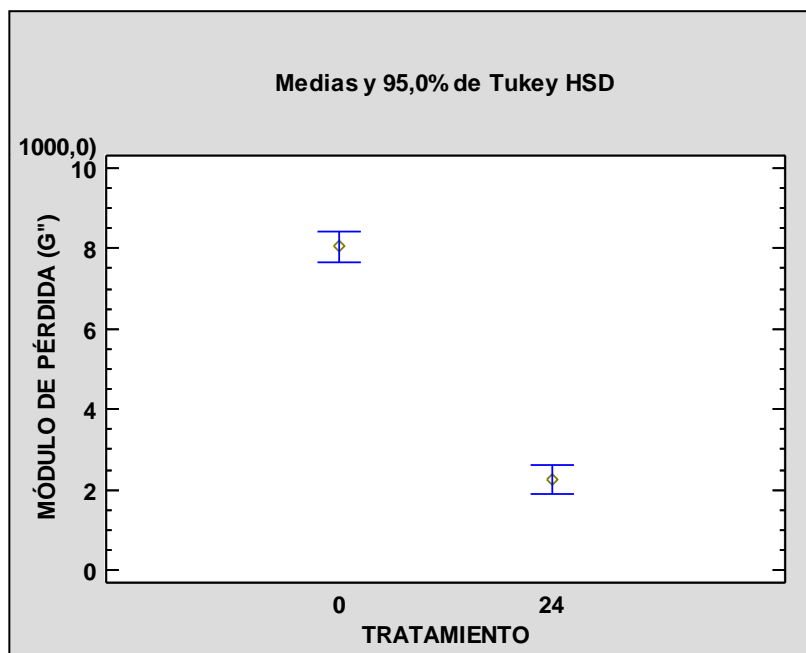
La tabla 4.2, presenta la prueba de múltiples rangos en la cual indican que los dos grupos no se distribuyen en una misma columna, comprobando la conclusión de la tabla ANOVA.

**TABLA 4.2**  
**PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA  $G''$  POR**  
**TRATAMIENTO APLICADO A HAI-0H Y HAIG-24H.**

<b>CÓDIGO MUESTRA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (Pa)</b>	<b>Desviación Estándar (Pa)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
24	23	2256,23	607,478	X
0	23	8052,7	1699,88	X

Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

El gráfico 4.2, diagrama de medias; muestra que si existe diferencia significativa entre las masas con HAI-0H y HAIG-24H con un 95,0% de confianza.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

**GRÁFICO 4.2. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA EL MÓDULO DE PÉRDIDA G'' POR TRATAMIENTO APLICADO HAI-0H Y HAIG-24H**

El diagrama de medias, muestra que el componente de pérdida G'' tiene valores menores en la masa de arroz germinado con 24 horas de tiempo de germinación con respecto a la masa de arroz con harina de arroz integral sin germinar, esto puede indicar que con la aplicación del tratamiento de germinación al grano de arroz, el módulo viscoso tiende a disminuir.

## Discusión de resultados

Entre los cambios más importantes que ocurren en la composición química de la semilla para efectos de este estudio, se encuentra la degradación del almidón. En capítulos anteriores, se mencionó que la germinación desencadena la producción de enzimas como la  $\alpha$ -amilasa y la  $\beta$ -amilasa, las mismas que hidrolizan las moléculas de almidón a azúcares más simples, reduciendo su habilidad para absorber agua y disminuyendo la viscosidad (37), lo cual puede explicar el decremento de los valores de los módulos al aplicar el tratamiento de germinación.

La disminución de la viscosidad en función del tiempo de germinación también puede explicar que los valores del módulo de pérdida ( $G''$ ) se presenten menores para el tratamiento HAIG-24H que los valores de HAI-0H.

Durante la preparación de la masa, parte de la harina es mezclada con agua a temperatura de ebullición, proceso durante el cual se da lugar a la gelatinización del almidón disponible. Mediante la gelatinización, el gránulo de almidón se hincha, sufre una ruptura brusca irreversible de orden molecular y simultáneamente se libera al exterior la amilosa que se encontraba dentro del mismo, formando una red de gel tridimensional, reforzada por interacciones fuertes entre las partículas hinchadas de almidón que se presentan

rígidas y los gránulos apretados que conforman la red, a lo cual se le atribuye el incremento en los valores de módulos  $G'$  (25). Al germinarse el arroz, la acción de la alfa amilasa reduce la cantidad de moléculas de almidón disponibles durante su hidrólisis (58), lo cual afectaría a la formación de la red tridimensional durante la gelatinización para las harinas de arroz germinado. Esto podría explicar la diferencia significativa existente entre los valores de  $G'$ , siendo superiores los valores resultantes para HAI-0H que no ha sido sometida a germinación.

#### **4.2. Efecto del tiempo de Germinación en las Características Reológicas de la Masa de Pan con Harina de Arroz.**

**Análisis estadístico de resultados de barrido de frecuencia de masas para pan de HAI-0H, HAIG-12-H y HAIG-24H en función  $G'$  y  $G''$ .**

**Resultados de comparación para el módulo de almacenamiento ( $G'$ ).**

Se procedió a realizar el análisis de varianza ANOVA, ya que estadísticamente se corroboró que las muestras tienen una distribución normal, por lo que se planteó evaluar la hipótesis nula de que las medias de  $G'$  de las masas con HAI-0H, HAIG-12H y

HAIG-24H son iguales, versus la hipótesis alterna de que las medias de G' no son iguales.

Los resultados del análisis de varianza, determinaron un valor de  $p=0$ , lo que indica que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna con un 95% de confianza, donde se determina que las muestras si presentan diferencia significativa.

La tabla 4.3, presenta la prueba de múltiples rangos en la cual indican que los dos grupos no se distribuyen en una misma columna, comprobando la conclusión del análisis ANOVA.

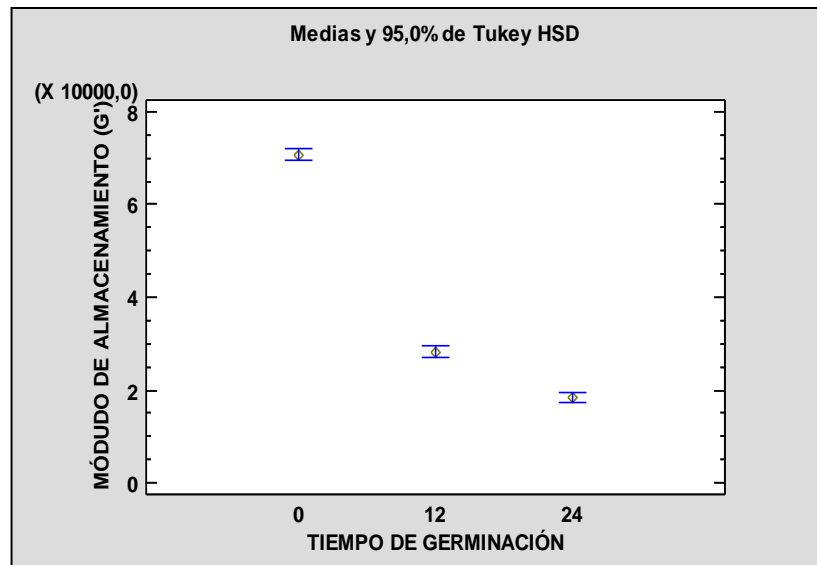
**TABLA 4.3. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA G' POR TRATAMIENTO APLICADO A HAI-0H, HAIG-12H Y HAIG-24H**

<b>CÓDIGO MUESTRA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (Pa)</b>	<b>Desviación Estándar (Pa)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
24	23	18386,5	1413,14	X
12	23	28286,9	2174,08	X
0	23	70717,3	5435,16	X

Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).



El gráfico 4.3, diagrama de medias, muestra que si existe diferencia significativa entre las masas con HAI-0H, HAIG-12H Y HAIG-24H con un 95,0% de confianza.

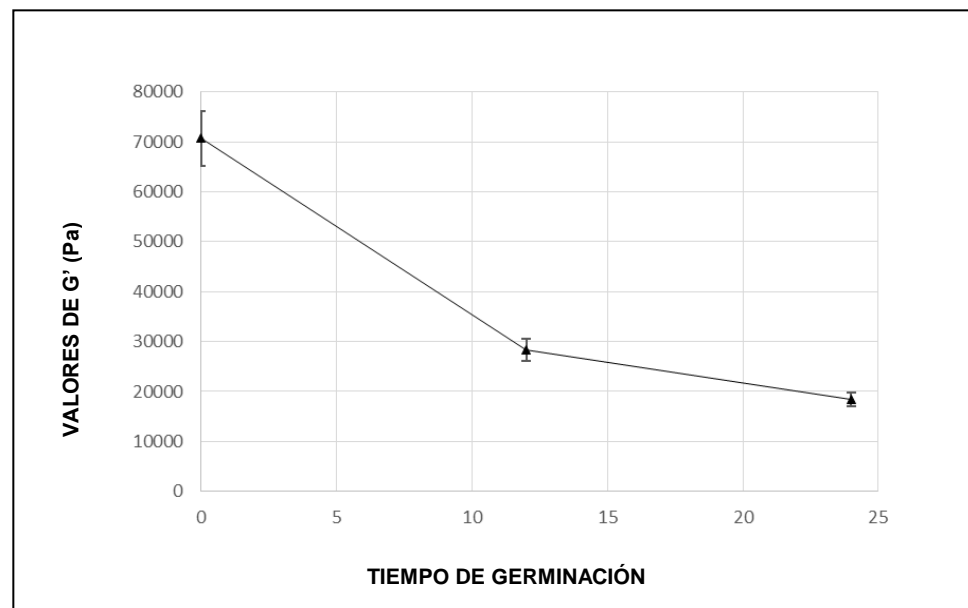


Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

**GRÁFICO 4.3. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA EL MÓDULO ELÁSTICO G' POR TRATAMIENTO APLICADO HAI-0H, HAIG-12H Y HAIG-24H.**

El diagrama de medias, muestra que el componente de pérdida G' tiene valores menores de la masa de arroz germinado con 12 y 24 horas de tiempo de germinación con respecto a la masa de arroz con harina de arroz integral sin germinar, esto puede indicar que con la aplicación del tratamiento de germinación al grano de arroz el módulo elástico tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo de germinación.

El gráfico 4.4, muestra la tendencia de los valores de la media de  $G'$  y como van disminuyendo a medida que se incrementa el tiempo de germinación.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

**GRÁFICO 4.4. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA VALORES DE  $G'$  A DIFERENTES TIEMPOS DE GERMINACIÓN.**

Existe una diferencia notable entre los valores de  $G'$  para HAI-0H y HAIG-12H, en contraste con lo que ocurren entre la muestra de HAIG-12H y HAIG-24H, donde la diferencia es menor a pesar de ser significativa.

**Resultados de comparación para módulo de pérdida ( $G''$ ).**

Se procedió a realizar un análisis de varianza ANOVA, ya que estadísticamente se corroboró que las muestras tienen una distribución normal, por lo que se planteó evaluar la hipótesis nula de que las medias de G" de las masas con HAI-0H, HAIG-12H y HAIG-24H son iguales, versus la hipótesis alterna de que las medias de G" no son iguales.

Los resultados del análisis de varianza, determinaron un valor de  $p=0$ , lo que indica que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna con un 95% de confianza, donde se determina que las muestras si presentan diferencia significativa.

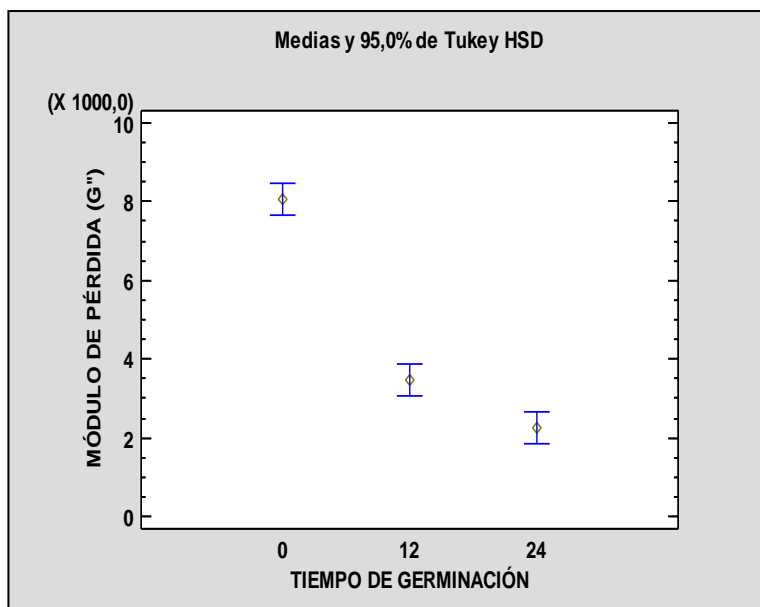
La tabla 4.4, presenta la prueba de múltiples rangos en la cual indican que los dos grupos no se distribuyen en una misma columna, comprobando la conclusión del análisis de varianza.

**TABLA 4.4 PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA G"  
POR TRATAMIENTO APLICADO A HAI-0H, HAIG-12H Y  
HAIG-24H**

<b>CÓDIGO MUESTRA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (Pa)</b>	<b>Desviación Estándar (Pa)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
24	23	2256,23	607,478	X
12	23	3471,12	934,583	X
0	23	8052,7	1699,88	X

Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

El gráfico 4.5, diagrama de medias; demuestra que si existe diferencia significativa entre las masas con HAI-0, HAIG-12H y HAIG-24H con un 95,0% de confianza.

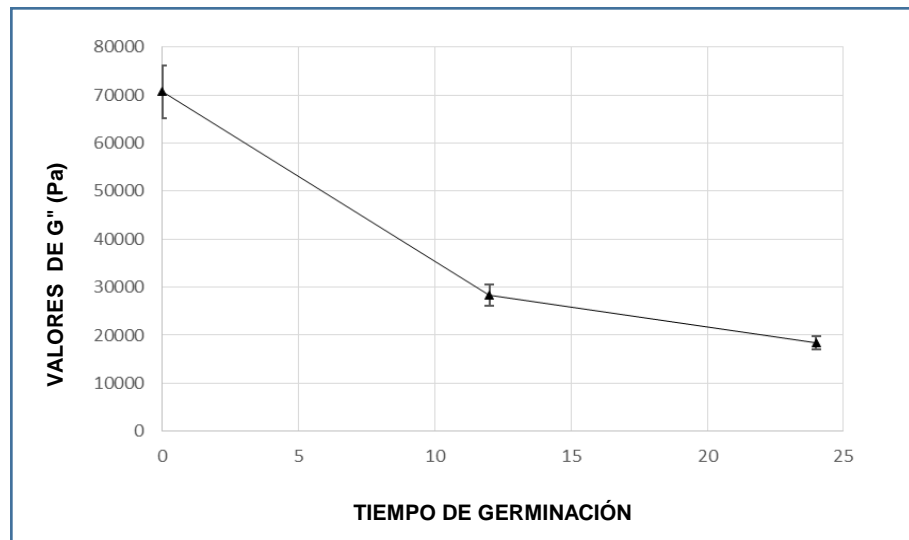


Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

**GRÁFICO 4.5. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA EL MÓDULO DE PÉRDIDA G'' POR TRATAMIENTO APLICADO HAI-0H, HAIG-12H Y HAIG-24H**

El diagrama de medias, muestra que el componente de pérdida G'' tiene valores menores de la masa de arroz germinado con 12 y 24 horas de tiempo de germinación con respecto a la masa de arroz con harina de arroz integral sin germinar, esto puede indicar que con la aplicación del tratamiento de germinación al grano de arroz, el módulo viscoso tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo de germinación.

El gráfico 4.6 muestra los valores de la media de  $G''$  a diferentes tiempos de germinación, cada uno representado con los valores de la desviación estándar.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

**GRÁFICO 4.6. DIAGRAMA DE MEDIAS PARA VALORES DE  $G''$  A DIFERENTES TIEMPOS DE GERMINACIÓN.**

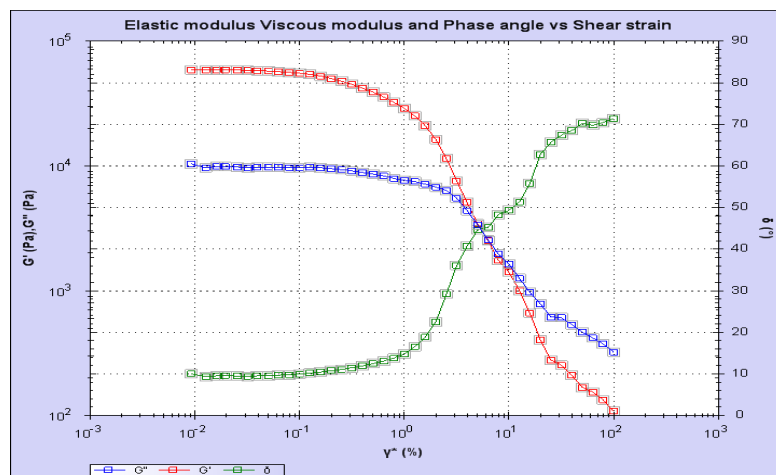
Al igual que lo evidenciado para los valores de  $G'$ , se puede observar que existe una diferencia drástica entre los valores de  $G''$  para HAI-0H y HAIG-12H, en contraste con lo que ocurren entre la muestra de HAIG-12H y HAIG-24H, donde la diferencia es menor a pesar de ser significativa. En ambos casos, esto puede ser consecuencia de la intensa actividad enzimática que se produce durante las primeras horas de germinación que disminuye

paulatinamente en función de la disponibilidad de almidón por efecto de la hidrólisis (9).

### **Análisis de resultados de Barridos de deformación usando geometrías de platos paralelos (I).**

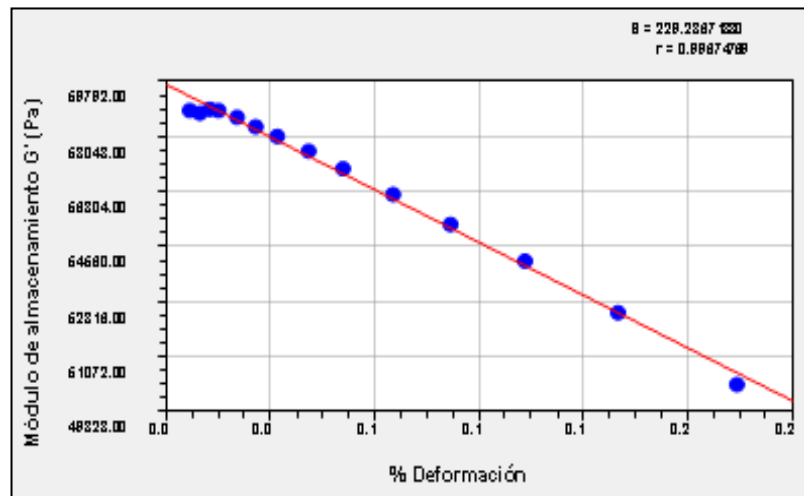
#### **Determinación de la región viscoelástica lineal de HAI-0H**

El gráfico 4.7 muestra el reograma obtenido mediante el barrido de deformación para la masa de harina de arroz integral, mientras que el gráfico 4.8 muestra la curva de regresión lineal en función de  $G'$  y su valor de  $r$ : 0.9967 para el mismo material, que al ser cercano a 1 indica que la curva se ajusta al modelo lineal.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

**GRÁFICO 4. 7. MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO ( $G'$ ) Y PÉRDIDA ( $G''$ ) EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PARA HAI-0H A UNA FRECUENCIA CONSTANTE DE 1 HZ.**



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

**GRÁFICO 4.8 REGRESIÓN LINEAL DEL MÓDULO DE ALMACENAMIENTO (G') DE HAI-0H PARA VALORES DE DEFORMACIÓN CERCANOS A 0.1%.**

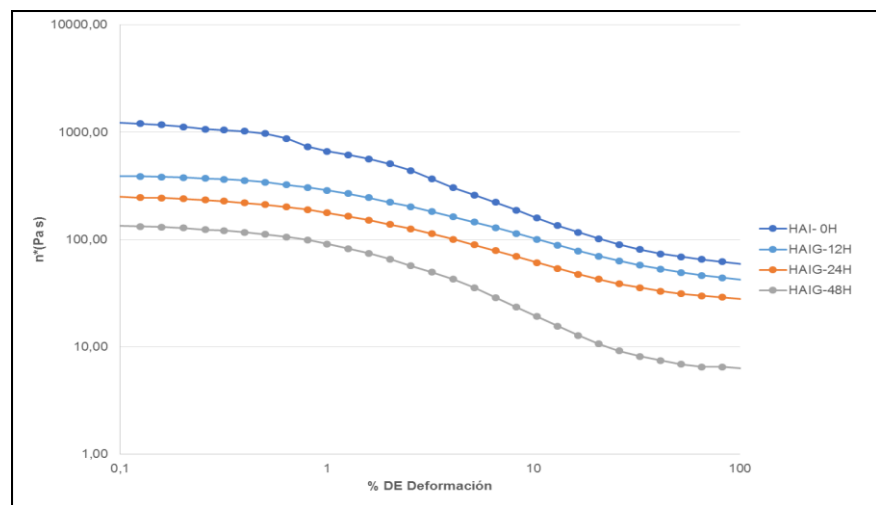
El análisis determinó que en un rango de deformación 0.01 a 0.1%, los valores de G' del material presentan un comportamiento lineal, el mismo que fue considerado para el análisis de las masas de HAIG -12H y HAIG- 24H.

**Análisis de resultados de barrido de deformación usando geometrías de cono y plato (II).**

**Análisis de la viscosidad compleja en función de la deformación.**

El gráfico 4.9, muestra el comportamiento de la viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) para cada tiempo de germinación aplicado, a una temperatura

constante de 25°C en función de la deformación. Se puede observar que la viscosidad compleja disminuye mientras se incrementa el tiempo de germinación para todos los valores de deformación estudiados a una frecuencia constante de 1 Hz.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

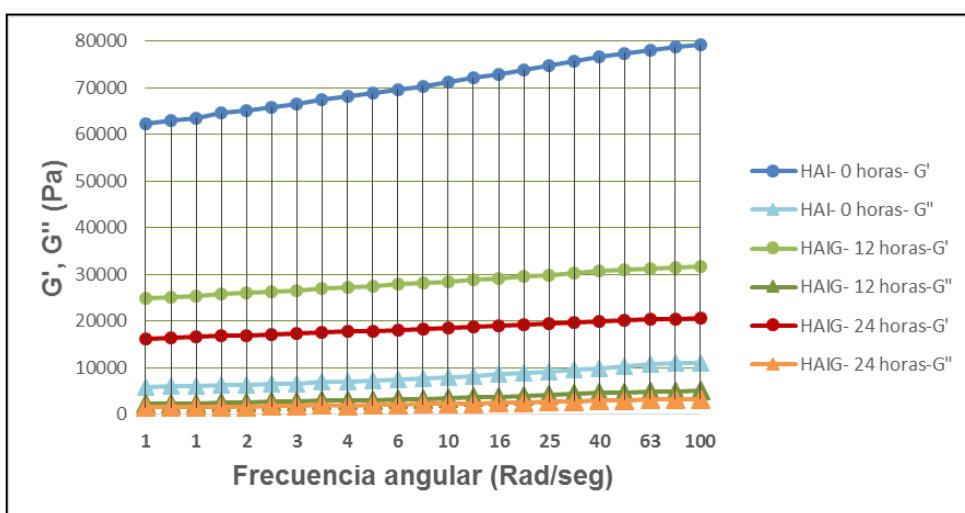
**GRÁFICO 4.9. EFECTO DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN A TEMPERATURA DE 25°C SOBRE LA VISCOSIDAD COMPLEJA POR TRATAMIENTO APLICADO HAI-0H, HAI-12H, HAI-24H Y HAI- 48H**

Este comportamiento puede atribuirse a la acción de la alfa-amilasa, que incrementa con el tiempo de germinación y que hidroliza los gránulos de almidón, convirtiéndolos en moléculas sencillas, mermando la capacidad de absorción de agua de los almidones, generando como resultado masas menos viscosas (9).



### Análisis de reogramas obtenido mediante barrido de frecuencia.

Los resultados obtenidos para los valores de los módulos de almacenamiento y pérdida durante el barrido de frecuencia realizado a los tres tiempos de germinación, se han plasmado en el gráfico 4.10, en el que se realiza una comparación de resultados.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015)

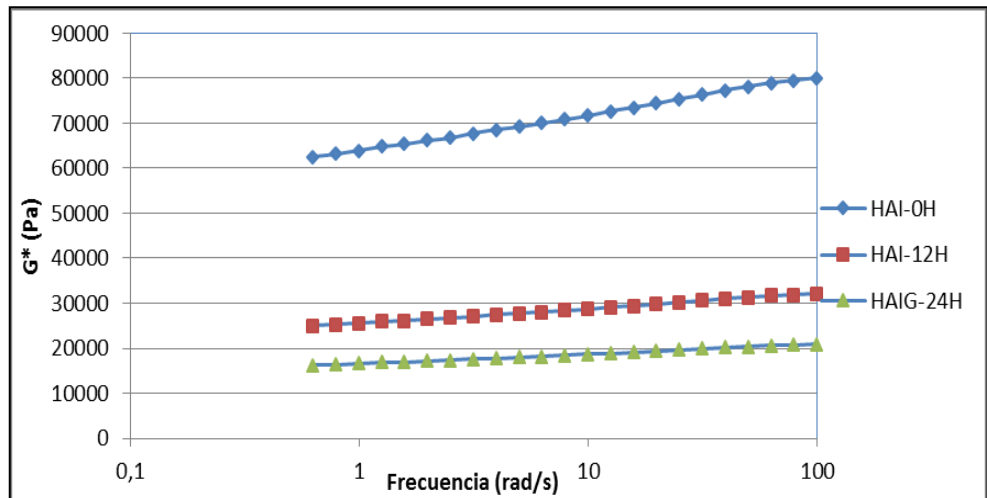
**GRÁFICO 4. 10. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE G' Y G'' PARA TRATAMIENTOS HAI-0H, HAIG-12H Y HAIG-24 H, EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA ANGULAR.**

El diagrama muestra valores de  $G'$  mayores que los de  $G''$ , indicando que las masas de harina de arroz presentan más características elásticas que viscosas, exhibiéndose el mismo

comportamiento para todas las muestras de diferentes tiempos de germinación a temperatura constante de 25°C. Estos resultados indican en términos de reología, que las masas se comportan como geles, predominando el componente elástico sobre el viscoso y mostrando un ángulo de fase independiente de la frecuencia. Los reogramas individuales por cada tratamiento, obtenidos mediante el experimento pueden observarse en el apéndice C.

Al aumentar el valor de la frecuencia, también incrementan los valores de  $G'$  y  $G''$  de los tres tratamientos; sin embargo, las magnitudes de ambos módulos, disminuyen con el incremento del tiempo de germinación, siendo HAI-0H el tratamiento que muestra valores significativamente más altos en comparación a HAIG-12H Y HAIG-24H.

Un parámetro interesante durante los estudios reológicos es el comportamiento del módulo complejo  $G^*$ , el mismo que representa la respuesta del material a la resistencia a la deformación a una fuerza aplicada (28). Los valores de  $G^*(Pa)$  obtenidos para cada uno de los tratamientos en función de la frecuencia angular, se muestran en el gráfico 4.11.



Elaborado por: Guerrero & Llerena (2015).

**GRÁFICO 4.11. MÓDULO COMPLEJO  $G^*$  VS FRECUENCIA ANGULAR DE LOS TIEMPOS DE GERMINACIÓN APLICADOS.**

Conforme se incrementa el tiempo de germinación, se muestra un decremento en el módulo  $G^*$ , lo cual indica que existe un decremento en la resistencia a deformación conforme se expone el grano de arroz a tiempo de germinación superiores.

### **Discusión de resultados**

#### **Barrido de deformación.**

Los barridos de deformación se realizan para medir la estabilidad de la suspensión y cuanta energía se requiere para romperla (28). En los alimentos viscoelásticos, es frecuente que solo ocurra una recuperación parcial de su estructura cuando se somete a

determinadas deformaciones, ya que la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión o compresión. Cuanto más completa y resistente sea esta red, más acusada será la elasticidad y cuanto más fácilmente se desintegre la red, mayor será el componente viscoso (35).

### **Barrido de frecuencia**

Todos los experimentos mostraron un comportamiento viscoelástico semi-sólido (gel), predominando el módulo elástico para todos los tiempos de germinación estudiados. Tanto los valores de  $G'$  como los valores de  $G''$ , sufrieron un decremento con el incremento del tiempo de germinación, siendo HAI-0H la muestra que presentó valores mayores para ambos módulos. Los resultados obtenidos pueden justificarse con los cambios en la composición química que sufre el grano durante la germinación y la respuesta a las propiedades físico-químicas que presenta la harina en función del tiempo de exposición a este tratamiento.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, durante la germinación la actividad enzimática como  $\alpha$ -amilasa aumenta, reduciendo moléculas de almidón a dextrinas y azúcares

fermentables. A la degradación del almidón se le atribuye la liberación del agua atrapada dentro de sus gránulos, causando un efecto más significativo a medida que avanza la hidrólisis del almidón; por lo que la germinación ampliada reduce las propiedades de hidratación de la harina, principalmente la capacidad de retención de agua, que es atribuida a la diferencia en la relación de amilosa-amilopectina (24). Sánchez *et al.* (2012), encontraron que la capacidad de retención de agua varía en función del tiempo de germinación (45), descendiendo a medida que el tiempo transcurre y por ende disminuyendo su viscosidad (37). La disminución en la capacidad de la estructura del almidón para retener agua y consecuente reducción de la viscosidad explicarían el comportamiento elástico predominante para todos los tiempos de germinación estudiados.

Arriciaga *et al.* (2012), determinaron que es recomendable el uso de la harina de arroz integral con 24 horas de germinación, frente a tiempos de germinación de 48 y 72 horas; debido a que, mientras mayor es el tiempo de germinación sus características de hidratación se ven afectadas negativamente (4).

Adicionalmente se ha mencionado que la respuesta del módulo elástico a la aplicación del tratamiento de germinación, se debe a la

formación de una red tridimensional de amilosa, formada durante el proceso de gelificación de una parte del almidón conforme al proceso de elaboración de la masa; de la misma manera, se ha hecho alusión a la cantidad de almidón disponible en la mezcla para la formación de dicha red (58). Es necesario señalar que a medida que transcurre el tiempo de germinación la cantidad de almidón disponible también disminuye por efecto del incremento de la actividad enzimática (53), resultando como consecuencia una masa de estructura más fluida a medida que incrementa el tiempo de germinación.

Cornejo & Rosell (2015) estudiaron las propiedades de cohesión mediante la medida de la viscosidad de las masas de HAIG a 12, 24 y 48 horas, encontrando una reducción progresiva de la viscosidad durante el calentamiento y enfriamiento rápido en función del tiempo de germinación y determinando que luego de 24 horas de germinación la viscosidad varía un poco respecto al patrón HAI; mientras, la muestra de 48 horas de germinación presentó una drástica caída de la viscosidad debido a la extensa degradación que han sufrido los gránulos de almidón, tal como se muestra en el apéndice D; esto podría explicar las diferencias significativas para el módulo de almacenamiento entre tratamientos

y que el valor de  $G'$  decrezca a medida que se incrementa el tiempo de germinación, siendo la muestra HAI-0H la que presenta valores más altos respecto a los demás tiempos de germinación estudiados (9).

Cornejo & Rosell (2015) estudiaron también los efectos de la germinación en las características del pan sin gluten, encontrando diferencias significativas principalmente en parámetros de textura de la miga. Durante la evaluación de textura de la miga, los parámetros de dureza, elasticidad y masticabilidad se mostraron más afectados por el tiempo de germinación (9). La germinación reduce la dureza de la miga y los valores de elasticidad, lo cual conlleva al incremento en fragilidad y tendencia a desmoronarse cuando es rebanado (31), de la misma manera los valores de resistencia y la masticabilidad disminuyen con el tiempo de germinación debido a la formación de proteínas y carbohidratos de bajo peso molecular que conceden a la mezcla baja consistencia y propiedades de cohesividad como ya se mencionó. Esta respuesta puede contribuir a la explicación dada a la disminución del módulo elástico a medida que incrementa el tiempo de germinación.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La germinación tiene un efecto significativo en las propiedades reológicas de la masa, disminuyendo los valores del módulo de almacenamiento y del módulo de pérdida; de esta manera la harina de arroz integral sin germinar, presentó valores más altos para  $G'$  y  $G''$  en comparación a la harina de arroz integral germinada por 24 horas que fue usada como patrón.
- El incremento del tiempo de germinación provoca el decremento en los valores de los módulos de almacenamiento  $G'$  y pérdida  $G''$ , el mismo que se mostró drástico entre las muestras de harina de arroz integral sin germinar y la germinada por 12 horas, mientras que tuvo menor impacto entre la harina germinada por 12 horas y la germinada por 24 horas, sin que este deje de ser significativo.



- La disminución de los valores de  $G'$  y  $G''$  a medida que aumenta el tiempo de germinación, puede atribuirse a la acción de la  $\alpha$ -amilasa que hidroliza las moléculas de almidón a azúcares más simples y como consecuencia las masas presentan menos viscosidad.
  
- La interpretación de las propiedades reológicas obtenidas mediante el barrido de frecuencia para las masas de pan, tanto de harina de arroz integral sin germinar, como las de harina de germinada a diferentes tiempos; demostró que todos los materiales en estudio son viscoelásticos que se comportan como geles, evidenciando siempre un predominio del componente elástico ( $G'$ ) sobre el viscoso ( $G''$ ) y mostrando un ángulo de fase independiente de la frecuencia.
  
- La tendencia a la disminución de la viscosidad compleja obtenida mediante barrido de deformación en función del incremento del tiempo de germinación, coincide con la tendencia a la disminución de las propiedades de cohesividad de la harina y las propiedades de dureza, elasticidad y masticabilidad de panes de harina de arroz germinado demostrados en estudios previos, siendo en

ambos casos la harina de arroz integral germinado por 48 horas la que presenta menores valores  $G^*$ .

### **Recomendaciones**

- Se recomienda complementar los estudios de las propiedades reológicas con barridos microscópicos, que permitan entender de mejor manera el cambio de la estructura molecular de los materiales; así como, la ejecución de pruebas sensoriales y fisicoquímicas de producto terminado con el objetivo de encontrar correlaciones entre las respuestas reológicas y las respuestas a los estudios mencionados.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A. EFECTOS DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE GELES Y HARINAS DE ARROZ INTEGRAL

EFECTOS DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE GELES Y HARINAS DE ARROZ INTEGRAL									
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	MÉTODO	UNIDAD	TIEMPO DE GERMINACIÓN HARINA DE ARROZ INTEGRAL (HORAS)				AUTOR	
				0H	12 H	24H	48H		
PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN DE GELES DE ARROZ	ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA)	Es la cantidad de agua necesaria, expresada en porcentaje del peso de la harina, para obtener una masa de consistencia adecuada. (59)	Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969	g gel / g muestra	6,31045a		6,31122a	5,70467a	Arriciaga et al. (2013) (4)
			Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969	g/g	11,6400a	9,8700b	9,9500b	5,6500c	Cornejo & Rosell (2015) (9)
			Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969 (Método modificado)	g gel / g muestra	0,7900		0,6500	0,6300	Sánchez et al. (2012) (45)
	ÍNDICE DE SOLUBILIDAD DE AGUA (ISA)	Los índices de solubilidad se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos. (59)	Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969	g sólidos disueltos / g muestra	0,0225a		0,0270a	0,0725b	Arriciaga et al. (2013) (4)
			Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969	g/100g	0,030c	0,0600b	0,050bc	0,1500c	Cornejo & Rosell (2015) (9)
			Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969 (Método modificado)	%	1,6300a		1,6400a	3,6100b	Sánchez et al. (2012) (45)
PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN DE HARINA DE ARROZ	VOLUMEN DE HINCHAMIENTO (VH)		Gularte y Rosell, 2011	ml muestra hinchada/ g de muestra en base seca	3,0996a		2,433b	2,4999b	Arriciaga et al. (2013) (4)
			Crosbie et al, 1991	G gel / g muestra	0,8000b		0,6600a	0,6400a	Sánchez et al. (2012) (45)
			Anderson, Conway, Pfeleter y Griffin, 1969 (Método modificado)	g/g	12,0220a	10,6300b	10,4600b	6,4600c	Cornejo & Rosell (2015) (9)
	CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA (CRA)	Propiedad definida como la cantidad de agua retenida por la muestra sin ser sometida a ningún estrés (Slade & Levine, 1994).	88.04 (AACC, 2012)	g agua retenida / g de sólidos	1,3808a		1,0403b	0,8315c	Arriciaga et al. (2013) (4)
			Slade & Levine (1994)	g agua retenida / g de sólidos	1,6800a	1,4300b	1,5500ab	0,8900c	Cornejo & Rosell (2015) (9)
	CAPACIDAD DE FLUJACIÓN DE AGUA (CFA)	Propiedad definida como la cantidad de agua retenida por la muestra bajo condiciones suaves de centrifugación.	38-12.02 (AACC1, 2012)	g agua retenida / g de sólidos	1,5207a		1,2636b	1,0196c	Arriciaga et al. (2013) (4)
38-12.02 (AACC1, 2012)			g/g	1,5200a	1,3500b	1,2600c	1,0200d	Cornejo & Rosell (2015) (9)	
PROPIEDADES FÍSICAS	TEMPERATURA INICIAL DE GELATINIZACIÓN	Es la transición de fase de un estado ordenado a un estado desordenado, el cual se lleva a cabo durante el calentamiento en exceso de agua. Esta transición siempre implica pérdida de cristalinidad, absorción de agua, hidratación del almidón y pérdida de orden anisotrópico o birrefringencia, la cual es una medida del ordenamiento del gránulo. (59)	Cañizares y col (1993)	°C	72b		70a	72b	Sánchez et al. (2012) (45)
	NÚMERO DE CAÍDA	Es una medida indirecta de la actividad enzimática ( contenido de alfa-amilasa) de la harina. Gelatinización rápida de una suspensión de harina y la medición subsiguiente de la licuefacción del almidón por acción de la alfa amilasa. El Valor óptimo de harinas de panadería: 250-400 seg, prefiriendo valores intermedios.	Equipo Falling Number (Modelo FN 1500 Fungal)	seg.	473,67a		243,00b	92,50c	Sánchez et al. (2012) (45)
	VISCOSIDAD		Viscosímetro de Brookfield (Modelo DV-II +Pro) Método ISI 2002	cP.	28,2800c		17,9300b	0,7300a	Sánchez et al. (2012) (45)
	CONSISTENCIA	Grado de deformación que presentan los fluidos cuando se les somete a un esfuerzo cortante. Es la distancia que un fluido recorre en un determinado tiempo.	Consistómetro de Bostwick (Método Norma Mexicana NMX-F-322-S-1978)	cm/10 seg.	10,4167a		18,5833b		Sánchez et al. (2012) (45)
PROPIEDADES DE COHESIVIDAD	VISCOSIDAD MÁXIMA	Es la máxima viscosidad alcanzada por la suspensión después de la cual la viscosidad empieza a descender (59).	Viscoanalyzer (RVA) (Newport Scientific Modelo 4-SA, Warriewood, Australia) Método No 162 (ICC 1996)	cP.	1926a	1833b	1409c	229d	Cornejo y Rosell, 2015 (37)
	PUNTO DE QUIEBRE	cP.		468c	697a	683b	200d		
	VISCOCIDAD FINAL	cP.		4222a	3522b	2560	172d		
	SETBACK	Diferencia entre la viscosidad final y la viscosidad máxima (59).		cP.	2995a	1689b	1151c	58d	

Elaborado por: Guerrero y Llerena

## APÉNDICE B.

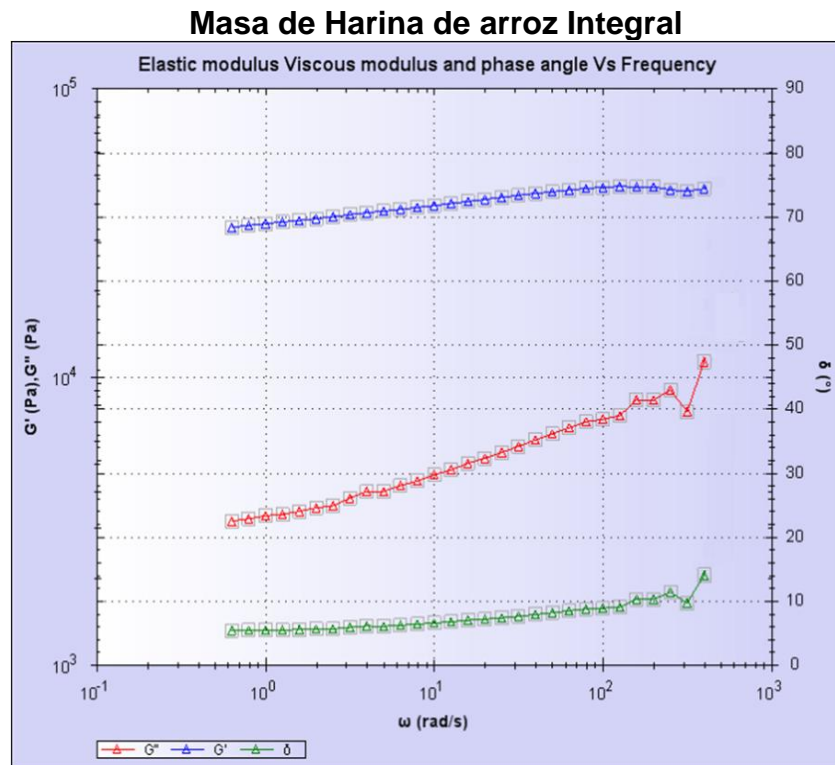
### EFECTOS DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CALIDAD FINAL DE PAN DE HARINA DE ARROZ INTEGRAL

EFECTOS DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CALIDAD FINAL DE PAN DE HARINA DE ARROZ INTEGRAL									
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	MÉTODO	UNIDAD	TIEMPO DE GERMINACIÓN HARINA DE				AUTOR	
				0H	12 H	24H	48H		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PAN	VOLUMEN ESPECÍFICO DEL PAN	Cálculo de ratio de el volumen desplazado (mL) para el peso del pan.	-	mL/g	1,52b	1,99a	2,14a	2,07a	Cornejo & Rosell (2015) (9)
	RATIO: LARGO/ANCHO DE REBANADAS	-	-	-	1,49a	1,42ab	1,49a	1,51a	Cornejo & Rosell (2015) (9)
ANÁLISIS DE LA TEXTURA DE LA MIGA DE PAN	DUREZA	Compresión de una rebanada de pan de un espesor establecido (1cm) hasta un 50% de su altura original a razon de 1mm/seg con un accesorio cilindrico (2,24cm diámetro)	Texture Analyzer CT3 (Brookfield, Middleboro, USA).	N	6,64b	5,37bc	4,42c	2,13d	Cornejo & Rosell (2015) (9)
	ELASTICIDAD			-	0,94a	0,67bc	0,72bc	0,56c	
	RESISTENCIA			-	0,29a	0,15c	0,17c	0,15c	
	MASTICABILIDAD			N	14,73a	5,25b	5,68b	2,77b	
COMPOSICIÓN PROXIMAL Y ENERGÍA	CALORÍAS	Componentes convertidos en energía mediante factores: carbohidratos y proteínas-4,0 Kcal/g / grasas- 9,0 Kcal/g	-	Kcal	214 b	210b	209b	230a	Cornejo et al. (2014) (8)
	CARBOHIDRATOS	Susteción de valores de proteínas, grasas y cenizas en base 100g	-	(g/100 g)	74,19a	72,45b	73,73ab	72,49b	
	PROTEÍNAS	-	920.87-AOAC (2005)	(g/100 g)	6,03c	8,14a	8,01ab	7,81b	
	GRASAS	-	922.06-AOAC (2005)	(g/100 g)	6,96b	6,50d	5,58e	7,72a	
	CENIZAS	-	923.03-AOAC (2005)	(g/100 g)	2,85b	2,65b	2,52c	2,35e	
COMPONENTES BIOACTIVOS	ÁCIDO FÍTICO	-	Reichwald & Hatzack, 2008. (Método modificado)	(g/100 g)	1,09c	0,82a	0,95b	0,81a	
	GLUCOSA LIBRE	-	-	(g/100 g)	0,29d	0,39c	0,52b	0,97a	
	DIGESTIBILIDAD DE PROTEÍNAS	-	Hsu, Vavak, Satterlee, and Miller,1977	%	72,54b	73,31a	71,04c	71,23c	

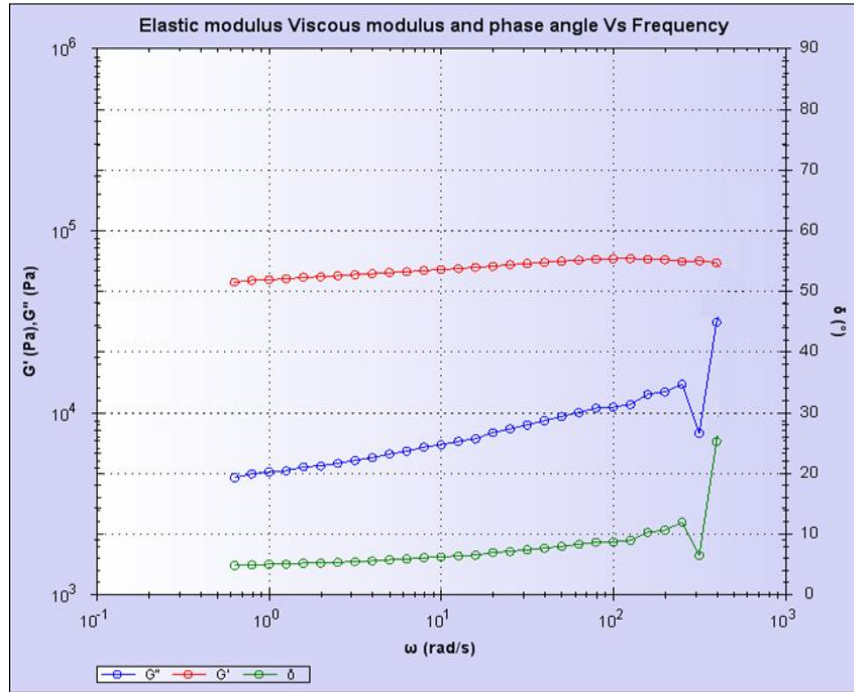
Elaborado por: Guerrero y Llerena

## APÉNDICE C.

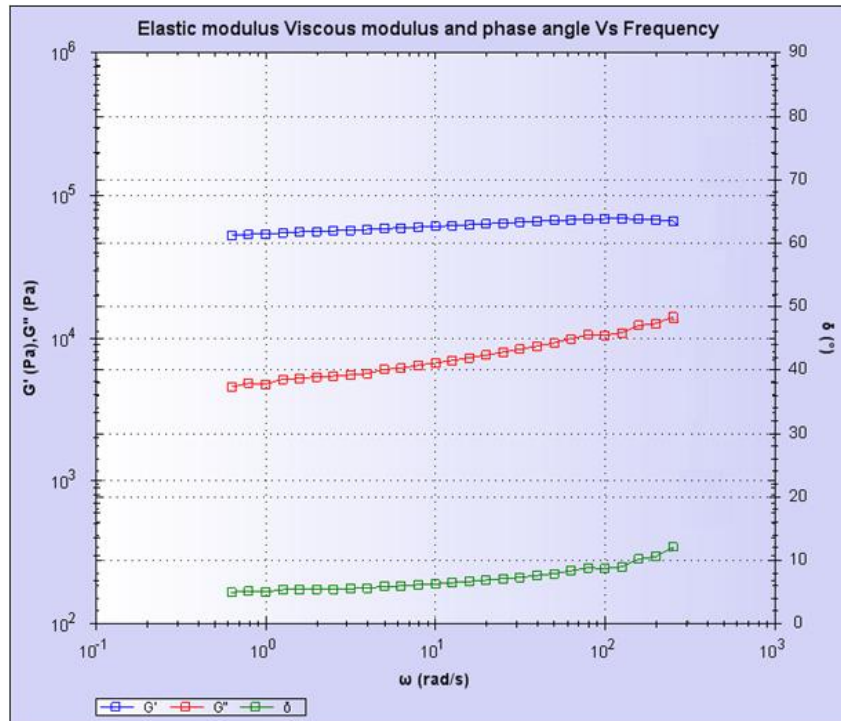
### REOGRAMAS DE BARRIDO DE FRECUENCIA $G'$ , $G''$ , $\delta$ VS $\omega$



### Masa de Harina de arroz Integral germinada por 12 horas

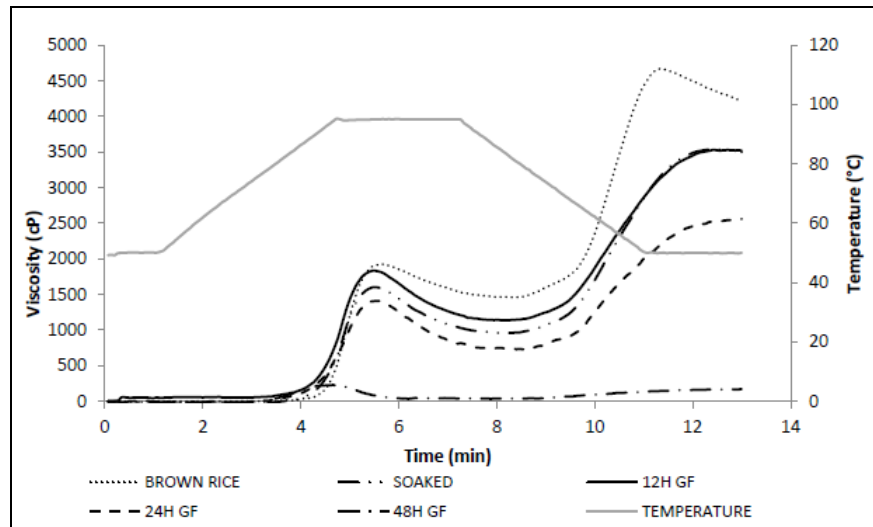


### Masa de Harina de arroz Integral germinada por 24 horas



**APÉNDICE D.**

**EFFECTO DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN EN LAS  
PROPIEDADES DE COHESIVIDAD DE LA MASA DE HAI Y HAIG  
A 12, 24 Y 48 HORAS.**



Fuente: Cornejo & Rosell (2015)



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agyare, K.K., Xiong, Y.L., Addo, K., & Akoh, C.C. (2004). Dynamic rheological and thermal properties of soft wheat flour dough containing structured lipid. *Acta Alim.* 33(1):19-29
- [2] AIB Internacional, (2011). Folleto de curso por correspondencia. Tecnología Aplicada a la Panificación, Módulo 1 y Módulo 5.
- [3] Anandha, M.PhD. (1999). *Rheology of fluid and semisolid foods, principles and applications*. Maryland: Aspen Publishers, Inc, pp. 2, 80-82.
- [4] Arriciaga, G., Prieto, K., & Cornejo, F. (2013). *Efecto del tiempo de germinación en las características de hidratación de a harina y del gel de arroz*. Tesis de pre-grado no publicada, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- [5] Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (1993). *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. España: Interamericana/ McGraw-Hill.
- [6] Baek, M. H., Yoo, B., & Lim, S. T. (2004). Effects of sugars and sugar alcohols on thermal transition and cold stability of corn starch gel. *Food Hydrocolloids*, 18(1), 133-142. doi: 10.1016/s0268-005x(03)00058-4.
- [7] Cáceres, P., Martínez-Villaluenga, C., Amigo, L., & Frias, J. (2014). Maximizing the phytochemical content and antioxidant activity of

Ecuadorian brown rice sprouts through optimal germination conditions.  
*Food Chem* 152: 407-414.

- [8] Cornejo, F., Cáceres, P.J., Martínez-Villaluenga, C., Rosell, C.M., & Frias, J. (2014). Effects of germination on the nutritive value and bioactive compounds of brown rice breads. *Food Chem.* 2015 Apr *foodchem.2014.10.037*. Epub 2014 Oct 14.
- [9] Cornejo, F., & Rosell, C. (2015). Influence of germination time of brown rice in relation to flour andn gluten free bread quality. *J Sci DOI* 10.1007/s13197-015-1720-8.
- [10] Dobraszczyk, B.J. (1997). The Rheological Basis of Dough Stickiness. *Journal of Texture Studies*, 28, 139-162.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1994). El arroz en la nutrición humana. Colección FAO alimentación y nutrición. Roma, Italia.
- [12] García Breijo, F.J., Roselló Caselles, J. & Santamarina Siurana, M. P. (2006). Iniciación al Funcionamiento de las Plantas. *Universidad Politécnica de Valencia, D.L. 2006. - 183 p. Ref.: 2006.4198; ISBN 84-9705-944.*
- [13] García, J.C. (2008, Enero 8). *Tema 3. Viscoelasticidad lineal.* Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química.

Recuperado el 25 de diciembre del 2014, de <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>.

- [14] Gil, A., & Hernandez, R. (2010). *Tratado de Nutrición: Nutrición Clínica*, (Tomo IV, 2da Ed.). Madrid, España: Editorial Médica Panamericana. pp: 626- 635.
- [15] González, S., & Herrero, R. (2009). *Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos*. Tesis de Pregrado no publicada, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- [16] Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, 37(1), 75-81.
- [17] Gujral, H.S., & Molina, C. (2006). Improvement of the bread making quality of rice flour by glucose. *Food Research International*. 37(1): 75–81.
- [18] Hager, A.S., & Arendt, E.K. (2013). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32(1), 195-203.

- [19] Hayta, M., & Schofield, J.D. (2005). Dynamic rheological behavior of wheat gluteins during heating. *J. Sci. Food Agr.* 89(12):1992-1998.
- [20] Herrera, J., Alizaga, R., Guevara, E., & Jiménez, V. (2006). Germinación y crecimiento de la planta (1era Ed.). Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica, pp.18-28.
- [21] Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. (2013). *Portada: Alimentos frescos y procesados*. Recuperado el 19 de diciembre del 2014, de <http://www.proecuador.gob.ec/sector1-6/>.
- [22] Islam, M., & Becerra, J. (2012). Analysis of chemical components involved in germination process of rice variety Jhapra. *J Sci Res* 4: 251-262.
- [23] Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C.G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of food engineering* 79 (3), 1033-1047.
- [24] Lii, C.Y., Shao, Y.Y., & Tseng, K.H. (1995). Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. *Cereal Chem* 72: 393±400.
- [25] Lii, C.Y., Tsai, M.L., & Tseng, K.H. (1996a). Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. *Cereal Chem* 73: 415±420.

- [26] Magaña, E., Ramírez, B., Platt, L.C., López, G.A., Torres, P.I., & Sánchez, D.I. (2009). Caracterización viscoelástica de masas y variedades de trigos suaves. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 24(1):12-22.
- [27] Majem, S., & Gil, A. (2014). *Libro blanco del pan*. España: Editorial Panamericana, pp. 32- 36.
- [28] Malvern, (2010). *Kinexus Customer Training: Module 3 Typical Viscoelastic Measurements*.
- [29] Marco, C., & Rosell, C. (2008). Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *Eur Food Res Tech*, 227: 1205-1213.
- [30] Masi, P., Cavella, S. & Sepe, M. (1998). Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat doughs at different moisture contents. *Cereal Chemistry*, 75 (4):428-432.
- [31] McCarthy, D., Gallagher, E., Gormley, T., Schober, T., & Arendt, E. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chem* 82: 609-615.
- [32] Menard, K. (1999). *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction*. (1st Ed.). United States of America: Editorial CRC Press, pp. 4, 29 – 31, 194.
- [33] Morales- Patiño, A., Phan-Thien, N., Gras, P., & MacRitchie, F. (1995). Linear viscoelastic region for wheat flour doughs. *Twelfth Australian*

*Fluid Mechanics Conference, The university of Sidney, Australia, p: 775.*

- [34] Morán, K., Soledispa, K. & Cornejo, F. (2013). *Efecto de la goma xanthan y la hidroxiprolcelulosa en las características físicas y reológicas del pan de arroz libre de gluten tipo molde*. Tesis de pre-grado no publicada, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- [35] Muller, G. H. (1973). *Introducción a la Reología de los Alimentos* (1era Ed.). Zaragoza-España: Editorial Acribia, pp. 14, 17.
- [36] Murgueitio, N., Guevara, M., & Cornejo, F. (2013). *Estudio del efecto de agentes emulsionantes en las características reológicas de la masa de pan con harina de arroz*. Tesis de pre-grado no publicada, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- [37] Owen, R. (2000). *Química de los Alimentos* (2da Ed.). Zaragoza, España: Editorial Acribia, pp. 188, 228, 233, 436, 440.
- [38] Pedrosa Silva Clerici, M. T., & El-Dash, A. A. (2006). *Farinha extrusada de arroz como sustituto de glúten na produção de pão de arroz*. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 56(3), 288-298.
- [39] Phimolsiripol, Y., Mukprasirt, A., & Schoenlechner, R. (2012). *Quality improvement of ricebased gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran*. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 389-395.

- [40] Ramirez, J. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*. Cali, Colombia: ReCiTeIA, p. 35.
- [41] Reyes, M.J., De Palomo, P., & Bressani, R. (2004). *Desarrollo de un producto de panificación apto para el adulto mayor a base de harina de trigo y harina de arroz*. Tesis de pre-grado no publicada, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala.
- [42] Rodríguez, E., Fernández, Q., Alcalá, A., & Ospina, B. (2006). Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Ingeniería y Desarrollo, enero-junio, 17-30*.
- [43] Ronda, F., Rodríguez de la Calle, M., & Pando, V. (2012). Enriquecimiento de pan sin gluten con  $\beta$ -glucanos extraídos del hongo *pleurotus ostreatus*. Tesis de Pre-grado no publicada, Universidad de Valladolid, Palencia, España. Recuperado el 19 de enero del 2015, de <http://www.uclm.es/area/cta/cesia2012/cd/PDFs/4-BIO/BIO-P21T.pdf>.
- [44] Salazar, T. (2001). *Mecánica básica para estudiantes de Ingeniería*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales, p.190.
- [45] Sánchez, J., Loaiza, E., & Cornejo, F. (2012). *Efecto del tiempo de germinación sobre las características físicas, reológicas y tecnológicas de la harina de arroz intergral variedad INIAP 15, cosecha verano*.

Tesis de Pre-grado no publicada, Escuela Superior Politecnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

- [46] San Miguel, M.A., & Gómez, M. (2013). Influencia de la Hidroxipropilmetilcelulosa, el Psyllium y su combinación en las propiedades morfogeométricas y texturales de panes sin gluten elaborados con harina de arroz. Tesis de master no publicada, Universidad de Valladolid, España.
- [47] Sarkar, N., & Walker, L. C. (1995). Hydration dehydration properties of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, 27(3), 177-185.
- [48] Shewry, P.R., & Halford, N.G. (2002). Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *J Exp Bot* 2002; 53:947-58. PMID\_\_ 11912237.
- [49] Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., & Chattopadhyay, P.K. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*: 62: 37-45.
- [50] Steffe, J.F. (1992). *Rheological Methods In Food Process Engineering* (2nd Ed.). United States of America: Ed Freeman Press, pp 1-2, 294,321.



- [51] Solorza, F. J., Jiménez, A. A., Arenas, O. M. L., & Bello, P. L. A. (2002). Rheology of *Okenia hypogaea* starch dispersions in aqueous solutions of DMSO. *Starch*, 54:198-202.
- [52] United States Department of Agriculture. (2011). *National Nutrient Database for Standard Reference Release 27*. Recuperado el 27 de diciembre del 2014, de <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/>.
- [53] Universidad Politécnica de Valencia. (2003). *Germinación de semillas, Parte III, Tema 17*. Recuperado el 05 de enero del 2015, de [http://www.euita.upv.es/varios/biologia/temas/tema\\_17.htm#Respiración](http://www.euita.upv.es/varios/biologia/temas/tema_17.htm#Respiración).
- [54] USWA. (1985, Mayo). Los ingredientes del pan su acción y su reacción, 2da parte. *Revista del pan*, p.72.
- [55] Vaclavik, V. (2002). *Fundamentos de la ciencia de los alimentos*. . Zaragoza – España: Editorial Acribia, pp. 49-51.
- [56] Veluppillai, S., Nithyanantharajah, K., Vasantharuba, S., Balakumar, S. and Arasaratnam, V. (2009). Biochemical changes associated with germinating rice grains (*Oryza sativa* L. subsp. indica var. Mottaikaruppan) and Germination Improvement. *Rice Science*, 16(3):240-242.

- [57] Wood, P. J. (2002). Relationships between solution properties of cereal  $\beta$ glucans and physiological effects – a review. *Trends in Food Science and Technology*, 13, 313–320.
- [58] Wu, F., Chen, H., Yang, N., Wang, J., Duan, X., Jin, Z., & Xu, X. (2013). Effect of germination time on physicochemical properties of brown rice flour and starch from different rice cultivars. *J Cereal Sci* 58: 263-271.
- [59] Yang, W.H., & Rao, M.A. (1998). Complex viscosity-temperature master curve of cornstarch dispersion during gelatinization. *J Food Process Eng* 21:191-207.