



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Veracruz

TÍTULO

Efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas de masa para pan y batidos para muffins y su relación con sus parámetros de panificación

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Bioquímica

Presenta:

Gustavo Armando Rosas Sánchez

Directores:

Zorba Josué Hernández Estrada

Patricia Rayas-Duarte

Mirna Leonor Suárez Quiroz

H. VERACRUZ, VER.

17/5/2021



H. Veracruz, Veracruz, **11/Junio/2021**
OFICIO: ITV/DEPI/No.310/2021
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**C. Rosas Sánchez Gustavo Armando
PRESENTE**

Por este conducto se le comunica que su tesis de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA BIOQUÍMICA** titulada:

“Efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas de masa para pan y batidos para muffins y su relación con sus parámetros de panificación”

Fue aprobada en su totalidad en cuanto a formato y calidad del contenido a satisfacción del H. Jurado del examen, por lo que está Usted autorizado a editar la presentación definitiva del trabajo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica.
Antorcha y Luz de Fuego Permanente.*

EL H. JURADO

**OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO
JEFE DE LA DIV. EST. POSG. E INVEST.**

**ZORBA JOSUE HERNANDEZ ESTRADA
PRESIDENTE**

**MIGUEL ÁNGEL GARCÍA ALVARADO
SECRETARIO**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**BEATRIZ TORRESTIANA SÁNCHEZ
VOCAL**

**MIRNA LEONOR SUÁREZ QUIROZ
SUPLENTE 1**

Patricia Rayas-Duarte

**PATRICIA RAYAS-DUARTE
SUPLENTE 2**



Número de registro: RP1L-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación 2021-04-10



Calz. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar
C.P. 91897, Veracruz, Ver.

Tel. (229) 934 1500

tecnm.mx | veracruz.tecnm.mx





El presente trabajo de tesis titulado “Efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas de masa para pan y batidos para muffins y su relación con sus parámetros de panificación” presentado por el (la) C. Rosas Sánchez Gustavo Armando,

ha sido aprobado por su comité tutorial como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA

DIRECTOR

DR. ZORBA JOSUÉ HERNÁNDEZ ESTRADA

CO-DIRECTORA

DRA. PATRICIA RAYAS-DUARTE

CO-DIRECTORA

DRA. MIRNA LEONOR SUÁREZ QUIROZ

REVISORA

DRA. BEATRIZ TORRESTIANA SÁNCHEZ

REVISOR

DR. MIGUEL ÁNGEL GARCÍA ALVARADO



Número de registro: RP/IL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación 2021-04-10



Calz. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar
C.P. 91897, Veracruz, Ver.

Tel. (229) 934 1500

tecnm.mx | veracruz.tecnm.mx



DEDICATORIA

A dios por siempre estar conmigo en el camino.

A mi esposa, Sissy Prados por ser mi compañera y ayudarme en todo momento.

A mis hijos Renata y Ehden por ser mi fuente de motivación e inspiración para siempre dar mi mayor esfuerzo.

A mis padres Elia Sánchez y Dionicio Rosas, y mi hermano Dionei Rosas por confiar en mi y brindarme su apoyo incondicional.

A mis amigos Luis González y Tony Gómez, que me brindan su amistad desde hace muchos años, muchas gracias por todo.

A Ana Karen, Samuel de Jesús y Carolina por siempre ayudarme, ilustrarme y enseñarme con una sonrisa en el rostro y la mejor disposición.

Al Doctor Zorba, la Dra. Mirna por ser mis asesores y guiarme durante todo el posgrado. Son todo lo que un estudiante puede pedir. Gracias por todo.

Al Doctor Oscar por sus enseñanzas, confianza y apoyo brindado durante toda la maestría.

A la Doctora Patricia por recibirme con los brazos abiertos en mi estancia en los Estados Unidos, apoyarme en todo momento, confiar en mí, compartirme sus conocimientos y las pláticas amenas que tuvimos.

A Gustavo Duarte, por su amistad y las pláticas sobre filosofía, danza y arte. Gracias por el mejor libro del mundo y demás libros que aun tengo pendiente por leer.

A Jesús por su amistad y compañía durante la estancia en OSU.

A Dominic, Rounak, John y José quienes me brindaron su amistad en OSU. Gracias por esas partidas de básquetbol, los tiempos de entrenamiento juntos, las salidas en bicicleta y las conversaciones largas y divertidas.

Gracias a todos los que se cruzaron en mi camino durante este posgrado, compañeros de clases, de generación, profesores y administrativos.

RECONOCIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico que recibí durante mis estudios de Maestría, haciendo posible el desarrollo de este trabajo.

A la **Universidad Estatal de Oklahoma (Oklahoma State University)** por el financiamiento y por facilitar el equipo y la infraestructura para realizar la fase experimental de este trabajo.

A **Techver S.A. de C.V.** por proveer el polvo de pulpa de café que fue la materia prima de este proyecto.

Al **Dr. Zorba J. Hernández Estrada, la Dra. Mirna L. Suárez Quiroz y la Dra. Patricia Rayas-Duarte** por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, brindándome siempre su apoyo y disposición. Gracias por contribuir en mi desarrollo profesional y académico.

Al **Dr. Oscar González Ríos** por el apoyo brindado a lo largo de todo el proyecto.

Al **Dr. Miguel Ángel García Alvarado y la Dra. Beatriz Torrestiana Sánchez** por formar parte de mi comité revisor y ayudarme a mejorar significativamente mi trabajo. Gracias por sus consejos, observaciones y enseñanzas.

RESUMEN

Rosas Sánchez, Gustavo Armando. Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz. Junio 2021. **“Efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas de masa para pan y batidos para muffins y su relación con sus parámetros de panificación”**. Directores: Dr. Zorba Josué Hernández Estrada, Dra. Patricia Rayas-Duarte, Dra. Mirna Leonor Suárez Quiroz.

En 2017, la Organización Internacional de Café reportó una producción de 10.5 millones de toneladas de café en el mundo; esto implica la generación de 5 millones de toneladas de pulpa de café (PC) como subproducto. Si la PC no se utiliza, se convierte en un grave problema ambiental. La PC contiene fibra, minerales, aminoácidos y compuestos polifenólicos, beneficiosos para la nutrición humana. La PC podría usarse para fortificar pan y muffins, que son productos de panadería deficientes en fibra dietética y otros nutrientes. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la sustitución de harina de trigo (HT) por polvo de pulpa de café (PPC) en la viscoelasticidad de las masas y batidos, así como en sus parámetros de panificación de pan y muffins, sin el uso de aditivos. La harina de trigo se sustituyó por PCC al 1.25, 2.5 y 5 % en pan y al 10, 20 y 40 % en muffins (base húmeda). Se realizaron pruebas de fluencia-recuperación para la masa de pan y gluten y las curvas de datos se analizaron con el modelo de Kelvin-Voigt. Para los batidos de los muffins se realizaron pruebas de barrido de frecuencia y rampas de temperatura, registrando los módulos G' , G'' (los datos se ajustaron a la ley de potencia) $\tan \delta$ y T_0 . Los parámetros del modelo de Kelvin-Voigt: J_0 , J_1 y J_2 se correlacionaron positivamente ($r = 0.90$) y η_0 negativamente ($r = -0.92$) con el volumen de pan. Así como, el volumen de los muffins se correlacionó con los parámetros de ley de potencia $G'\omega_1$ y $G''\omega_1$ ($r = -0.89$) de las pruebas de barrido de frecuencia en batidos para muffins. Los muffins tuvieron un efecto significativo al 20 y 40 % de sustitución de PPC, a diferencia del pan que tuvo efectos significativos desde el 1.25 % de sustitución, siendo los muffins una mejor alternativa para emplear la pulpa de café.

ABSTRACT

Rosas Sánchez, Gustavo Armando. Master of Science in Biochemical Engineering. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz. Junio 2021. **“Effect of coffee pulp on the rheological properties of bread dough and muffin batters and their relationship to their baking parameters** Advisors: Zorba Josué Hernández Estrada, Ph.D., Patricia Rayas-Duarte, Ph.D., Mirna Leonor Suárez Quiroz, Ph.D.

In 2017, 10.5 million tons of coffee were produced globally (According to the International Coffee Organization); it implies the generation of 5 million tons of coffee pulp (CP) as a by-product. If the CP is not used, it becomes a severe environmental problem. CP contains fiber, minerals, amino acids, and polyphenolic compounds, beneficial for human nutrition. CP could be used to fortify bread and muffins, which are bakery products deficient in dietary fiber and other nutrients. The objective of the work was to evaluate the effect of the substitution of wheat flour for coffee pulp powder (CPP) without additives on the viscoelasticity of the doughs and batters; also bread and muffins baking parameters were evaluated. Wheat flour was substituted by 1.25, 2.5, and 5 % CPP in bread and 10, 20, and 40 % in muffins (wet basis). A creep-recovery test was performed for the gluten and bread dough, and the data were fitted to the Kelvin-Voigt model. Frequency sweep test and temperature ramps were performed, and G' , G'' (the data was fitted to the power-law model), $\tan \delta$ and T_0 values were registered. The parameters of the Kelvin-Voigt model: J_0 , J_1 and J_2 were positively correlated ($r = 0.90$) with the bread volume, unlike the parameter η_0 , ($r = -0.92$). which was negatively correlated. Muffin's volume was correlated with power-law model parameters $G'\omega_1$ and $G''\omega_1$ ($r = -0.89$) from frequency sweep test on muffin batters. Muffins had a significant effect at 20 and 40 % CPP substitution, unlike bread that showed significant effects since 1.25 % of substitution. Consequently, Muffins are better alternative that the bread to use the coffee pulp.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. El café.....	4
2.1.1. Clasificación y botánica del café	4
2.1.2. La cereza de café.....	5
2.2. Beneficiado de café.....	6
2.2.1. Método seco	6
2.2.2. Método húmedo	7
2.2.3. Subproductos del café	8
2.3. Pulpa de café	9
2.3.1. Composición química de la pulpa de café	9
2.3.2. Importancia de los compuestos fenólicos en la pulpa de café	10
2.4. Mucílago de café	12
2.5. Impacto ambiental de los subproductos de café	12
2.6. Subproductos de café como ingredientes funcionales.....	14
2.7. Panificación y productos derivados	14
2.7.1. Harina y productos de panadería	15
2.7.2. Muffins	15
2.7.3. Trigo.....	16
2.7.4. Gluten	16
2.8. Enfermedad celiaca.....	17
2.9. El pan como producto funcional	18
2.10. Análisis de harina	18
2.10.1. Propiedades fisicoquímicas de las harinas.....	19
2.10.2. Farinograma.....	20
2.11. Alveograma	22
2.11.1. Mixograma	23

2.12. Reología en alimentos.....	24
2.12.1. Reología.....	25
2.12.2. Esfuerzo y deformación.....	25
2.12.3. Viscosidad, elasticidad y viscoelasticidad de los materiales.....	27
2.12.4. Comportamiento elástico (sólido ideal): ley de Hooke.....	28
2.12.5. Comportamiento viscoso (fluido).....	29
2.12.6. Comportamiento viscoelástico.....	30
2.12.7. Modelos mecánicos análogos para la viscoelasticidad.....	31
2.13. Métodos de pruebas reológicas.....	32
2.13.1. Pruebas reológicas fundamentales.....	32
2.13.2. Pruebas de fluencia-recuperación.....	33
2.13.3. Pruebas oscilatorias.....	38
2.13.4. Prueba de relajación de esfuerzos.....	41
3. JUSTIFICACIÓN.....	43
4. HIPÓTESIS.....	44
5. OBJETIVOS.....	45
5.14. Objetivo general.....	45
5.15. . Objetivos específicos.....	45
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
6.1. Material de análisis.....	51
6.2. Análisis de harina y PPC.....	52
6.2.1. Concentración de cafeína.....	52
6.3. Análisis reológico.....	53
6.3.1. Preparación de las muestras para las pruebas reológicas.....	53
6.3.2. Pruebas de compresión-recuperación.....	53
6.3.3. Cargas de muestra de masa y gluten para pruebas reológicas.....	54
6.3.4. Condiciones para pruebas de fluencia-recuperación en masa y gluten...54	
6.3.5. Modelando las propiedades viscoelásticas de la masa y el gluten.....	54
6.3.6. Condiciones para pruebas de barrido de frecuencia y temperatura en batidos para muffins.....	55
6.4. Evaluación de calidad de pan y firmeza de la miga.....	55

6.5. Evaluación de la calidad de muffins y firmeza de la miga	56
6.6. Análisis estadístico.....	56
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
7.1. Análisis proximales y de contenido de cafeína	57
7.2. Granulometría	57
7.3. Propiedades de mezclado y absorción de agua (Farinograma).....	58
7.4. Pruebas de compresión y relajación en Gluten CORE	60
7.5. Volumen de pan y firmeza de la miga.....	62
7.6. Pruebas de fluencia-recuperación en gluten y masa	64
7.7. Barrido de frecuencia de batidos para muffins.....	69
7.8. Rampas de temperatura.....	71
7.9. Volumen de muffins y firmeza de la miga	74
8. CONCLUSIONES.....	77
9. PERSPECTIVAS	78
10. BIBLIOGRAFÍA	79
11. ANEXO 88	

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 Taxonomía del café	5
TABLA 2.2 Composición química de la pulpa de café (<i>Coffea arabica L</i>).....	9
TABLA 2.3 Compuestos fenólicos en la pulpa de café (<i>Coffea arabica L</i>). Medias de los porcentajes de fenoles totales identificados.....	11
TABLA 2.4 Composición química del mucílago del café (<i>Coffea arabica L</i>)	12
TABLA 6.1 Niveles de sustitución de harina de trigo por polvo de pulpa de café*	51
TABLA 7.1 Análisis proximales y de cafeína del polvo de pulpa de café (PPC) y harina de trigo (HT)	57
TABLA 7.2 Granulometría antes de la molturación	58
TABLA 7.3 Granulometría después de molturación	58
TABLA 7.4 Propiedades de mezclado y absorción de agua* **	59
TABLA 7.5 Coeficientes de correlación de Pearson entre los indicadores tradicionales de cualidades de horneado y parámetros de fluencia para gluten y masa. ^z	61
TABLA 7.6 Parámetros de calidad de panificación para las hogazas de pan con niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*	62
TABLA 7.7 Parámetros del modelo generalizado de 6 elementos de Kelvin- Voigt para gluten aislado y masa con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*	67

TABLA 7.8 Constantes y exponentes de la ley de potencia relacionadas con el comportamiento viscoelástico de los batidos para muffins con diferente nivel de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*	70
TABLA 7.9 Parámetros de calidad de horneado de muffins*	75
TABLA 7.10 Coeficientes de correlación de Pearson entre los indicadores tradicionales de cualidades de horneado y parámetros de los barridos de frecuencia y temperatura inicial de gelatinización	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Subproductos obtenidos del beneficiado de café.	8
FIGURA 2.2 Farinogramas de harinas de diferente fuerza de gluten.	21
FIGURA 2.3 Curva típica de farinografía de harinas de trigo para obtención de parámetros para calidad.	22
FIGURA 2.4 Curva típica de alveografía de masa para pan.	23
FIGURA 2.5 Mixogramas característicos obtenidos para muestras de trigo duro.	24
FIGURA 2.6 Tipos de deformación en materiales solidos.	26
FIGURA 2.7 Métodos para aplicar un esfuerzo.	27
FIGURA 2.8 Respuesta elástica de un sólido ideal (Ley de hooke).	29
FIGURA 2.9 Diferentes comportamiento de la viscosidad de los fluidos al aplicarseles a un esfuerzo.	30
FIGURA 2.10 Modelos mecánicos de Maxwell (a), Kelvin-Voigt (b) y Burgers (c).	32
FIGURA 2.11 Curvas de fluencia-recuperación para el comportamiento de sólidos elásticos, fluidos viscosos Newtonianos y materiales viscoelásticos.	33
FIGURA 2.12 Elementos del modelo de Burgers en una curva típica de fluencia.	36
FIGURA 6.1 Diagrama de flujo de experimentación.	50
FIGURA 7.1 Recuperación elástica del gluten de masas con polvo de pulpa de café (PPC). Curva típica compresión y recuperación (a).	

Medias (columnas con barras de error estándar) con la misma letra no son significativamente diferente ($p < 0.05$, Tukey) (b).....	60
FIGURA 7.2 Hogazas de pan con diferente nivel de sustitución (0, 1.25, 2.5 y 5 % base húmeda) de polvo de pulpa de café (PPC).....	63
FIGURA 7.3 Firmeza de la miga de pan en función del nivel de sustitución de polvo de pulpa de café agrupados por día de almacenamiento. Medias ($n=2$) \pm desviación estandar con letra distinta, en el mismo día de almacenamiento, son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).....	64
FIGURA 7.4 Curvas de fluencia-recuperación para gluten extraído (a) y masa (b) con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC), graficadas con los promedios de los parámetros de regresión del modelo de Kelvin-Voigt. 1.25, 2.5, y 5 g de PPC por 100 g de harina de trigo.....	68
FIGURA 7.5 Módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función de la frecuencia con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (a). Ángulo de fase ($\tan\delta$) a 1 Hz de frecuencia (b). Los valores de medias ($n=3$) \pm desviación estandar con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).....	69
FIGURA 7.6 Influencia de la temperatura en el módulo de almacenamiento y estimación de T_0 (a). Valores estimados de T_0 (b) a diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café. Los valores de medias ($n=3$) \pm desviación estandar con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).....	72
FIGURA 7.7 Evolución del Módulo complejo (G^* ,Pa) y del ángulo de fase ($\tan \delta$) durante la rampa de temperatura (25 a 90 °C) a) 0 %	

(testigo), b) 10 %, c) 20 % y d) 40 % de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC).74

FIGURA 7.8. Firmeza de la miga de muffins en función de nivel de sustitución de polvo de pulpa de café, agrupados por día de almacenamiento. Los valores de medias (columnas con barras de error estándar) con la misma letra en el mismo día de almacenamiento no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).76

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
PC		Pulpa de café
PPC		Polvo de pulpa de café
HT		Harina de trigo
σ	Pa	Esfuerzo de corte
γ	mm/mm	Deformación de corte
ε	mm/mm	Deformación extensional
$\dot{\gamma}$	s ⁻¹	Razón de corte
ΔL	m	Cambio de longitud después de aplicar un esfuerzo
L_0	m	Longitud antes de aplicar un esfuerzo
F	N	Fuerza
A	m ²	Área
E	Pa	Módulo de Young
η	Pa·s	Módulo de viscosidad
J	Pa ⁻¹	Complianza
G	Pa	Módulo elástico

Farinografía

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
AA	%	Absorción de agua
TD	minutos	Tiempo de desarrollo
TE	minutos	Tiempo de estabilidad
TR	minutos	Tiempo de ruptura
ITM	UB	índice de tolerancia al mezclado

Compresión-recuperación

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
RE	%	Porcentaje de recuperación elástica

Fluencia-recuperación

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
σ_0	Pa	Esfuerzo constante
t	s	Tiempo
J_0	Pa ⁻¹	Compliance a tiempo cero
J_1	Pa ⁻¹	Compliance retardada del primer elemento de Kelvin-Voigt
J_2	Pa ⁻¹	Compliance retardada del segundo elemento de Kelvin-Voigt
G_0	Pa	Módulo del elemento puramente elástico
G_1	Pa	Módulo de la respuesta elástica retardada del primer elemento de Kelvin-Voigt
G_2	Pa	Módulo de la respuesta elástica retardada del segundo elemento de Kelvin-Voigt
λ_1	s	Tiempo de retardación del primer elemento de Kelvin-Voigt
λ_2	s	Tiempo de retardación del segundo elemento de Kelvin-Voigt
η_0	Pa·s	Viscosidad de estado estacionario
η_1	Pa·s	Coefficiente de viscosidad del primer elemento de Kelvin-Voigt
η_2	Pa·s	Coefficiente de viscosidad del segundo elemento de Kelvin-Voigt
Jr_0	Pa ⁻¹	Compliance a tiempo cero en la fase de recuperación
Jr_1	Pa ⁻¹	Compliance retardada del primer elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación
Jr_2	Pa ⁻¹	Compliance retardada del segundo elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación
G_{r0}	Pa	Módulo del elemento puramente elástico en la fase de recuperación
G_{r1}	Pa	Módulo de la respuesta elástica retardada del primer elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación
G_{r2}	Pa	Módulo de la respuesta elástica retardada del segundo elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación
λ_{r1}	s	Tiempo de retardación del primer elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación
λ_{r2}	s	Tiempo de retardación del segundo elemento de Kelvin-Voigt en la fase de recuperación

Barridos de frecuencia

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
G'	Pa	Módulo de almacenamiento
G''	Pa	Módulo de pérdida

$\tan \delta$	Pa/Pa	Ángulo de fase
$G'_{\omega 1}$	Pa	Módulo de almacenamiento de la ley de potencia a la frecuencia de 1 Hz
$G''_{\omega 1}$	Pa	Módulo de pérdida de la ley de potencia a la frecuencia de 1 Hz

Rampas de temperatura

Símbolo o abreviación	Unidades	Nombre
G^*	Pa	Módulo complejo
T_0	°C	Temperatura inicial de gelatinización

1. INTRODUCCIÓN

El café es una bebida popular y uno de los productos más comercializados en el mundo. Debido a la alta demanda de café, se generan grandes cantidades de subproductos como pulpa, piel plateada y pergamino (Mussatto et al., 2011). Según la Organización Internacional del Café, en 2019 se produjeron alrededor 10 millones de toneladas de café verde a nivel mundial. Lo cual, implica la generación de aproximadamente 5 millones de toneladas de pulpa de café como subproducto y representa un grave problema ambiental (ICO, 2020). Por lo que se han hecho avances en el uso de la pulpa como composta, forraje, generación de energía, absorción de compuestos, generación de productos industriales como: ácido giberélico, etanol y α -amilasa y como ingredientes para alimentos de consumo humano debido a la alta cantidad de fibra y derivados de proantocianidinas con actividad antiinflamatoria y antioxidante (Esquivel y Jiménez, 2012). Tan solo la fibra dietética abarca una gran variedad de macromoléculas, que exhiben una amplia gama de propiedades fisicoquímicas. La principal ventaja de las fibras dietéticas procedente de subproductos agrícolas es su mayor proporción de fibra soluble, en comparación con otras fuentes alternativas como los cereales. Las principales características del subproducto natural son que son ricos tanto en fibra dietética como en compuestos polifenólicos y se reconoce el concepto de fibras dietéticas antioxidantes. Los subproductos del café podrían tener una preferencia mayor que otras fuentes de fibra debido a la presencia de bioactivos asociados (compuestos fenólicos) con propiedades antioxidantes (Murthy y Naidu, 2010). Tales como los ácidos hidrodinámicos, flavonoides y antocianidinas a las que además de la actividad antioxidante se les atribuyen capacidades anticancerígenas y antiinflamatorias (Duangjai et al., 2016; Ontawong et al., 2019). En un intento por valorizar y aprovechar la pulpa de café como alimento, el Instituto Tecnológico de Veracruz junto con la empresa Techver S.A. DE C.V., desarrollaron un tren automatizado para la obtención de un polvo de pulpa de café (PPC) comestible (cuyo nombre comercial registrado ante el IMPI es Pulphari®) el cual consiste en descafeinar la pulpa, triturlarla en un molino coloidal y obtener el polvo mediante un secado por aspersion.

Por otro lado, los productos panificados son muy consumidos en el mundo, y generalmente son elaborados con harinas refinadas que naturalmente son deficientes en fibra y otros nutrientes (Bonnand-Ducasse et al., 2010). Por lo tanto, la pulpa de café podría usarse como ingrediente en productos panificados deficientes en fibra. Los productos panificados son tecnológicamente exigentes y cualquier cambio en su formulación o proceso afecta su calidad. Como, por ejemplo, la adición de fibra la cual modifica las propiedades viscoelásticas de la masa y la calidad de pan (Anil, 2007). Es bien sabido que la viscoelasticidad o el comportamiento reológico de la matriz alimentaria está relacionado con su composición, estructura y estabilidad; por lo tanto, la caracterización reológica de una matriz alimentaria y sus componentes es primordial para predecir la calidad de los alimentos (Deka et al., 2019). En el proceso de panificación, la masa se somete a diferentes tipos de deformación durante el mezclado, laminado, moldeado, fermentación y horneado (Faubion y Hosenev, 1990), e incluso el pan cuando lo cortamos y masticamos. Por lo anterior, los estudios reológicos son herramientas de investigación útiles para determinar el comportamiento de la masa y estimar las interrelaciones entre la composición de la harina, la funcionalidad de los ingredientes, los parámetros del proceso y las características del pan (Faubion et al., 1990). Las pruebas empíricas realizadas con el farinógrafo, el alveógrafo y el extensograma se utilizan ampliamente en la industria de la panificación como herramientas para predecir la calidad de panificación de las harinas, mientras que las pruebas reológicas fundamentales se continúan probando (Dobraszczyk y Morgenstern, 2003; Edwards et al., 1999; Fu et al., 2016; Girard et al., 2016; Hernández-Estrada et al., 2017). La prueba de fluencia-recuperación estima la viscoelasticidad del material al aplicar un esfuerzo constante durante un tiempo determinado (Steffe, 1996). Varios investigadores han intentado comprender el comportamiento viscoelástico del gluten y la masa modelando datos experimentales utilizando el modelo de Burgers con elementos de Maxwell y Kelvin (Chompoorat, Rayas-Duarte, et al., 2018; Edwards et al., 1999; Girard et al., 2016; Hernández-Estrada et al., 2017; Mironeasa, S. y Codina, 2019; Mironeasa, Silvia et al., 2018); los valores de este modelo se correlacionan con los parámetros de calidad de pan (Anil, 2007; Hernández-Estrada et al., 2017). Las proteínas, gliadina y glutenina, son las

responsables del comportamiento viscoelástico del gluten, y su interacción con otros elementos, como el almidón, influye en el comportamiento viscoelástico de la masa, este comportamiento cambia entre las variedades de trigo, formulaciones de productos panificados y tiempo de almacenamiento, entre otros. Las pruebas de fluencia-recuperación se han utilizado para medir el impacto de la fibra dietética en el comportamiento viscoelástico de masas de harina de arroz (Ronda et al., 2013), para estudiar el efecto de las subunidades de glutenina de alto peso molecular del gluten y su relación con la calidad del pan (Hernández-Estrada et al., 2017), para analizar las propiedades reológicas y funcionales de la harina de frijol rojo en mantecadas libres de gluten (Chompoorat, Rayas-Duarte, et al., 2018). Finalmente, en la búsqueda realizada no se encontró evidencia científica del uso de la pulpa de café como ingrediente en productos panificados. Por lo que este proyecto exploró el efecto del PPC en las propiedades reológicas y parámetros de panificación en masa para pan y batidos para muffins. Cabe mencionar, que este primer acercamiento del uso del PPC en productos horneados servirá como punto de partida para futuros estudios y posible desarrollo de productos panificados libres de gluten y altos en fibra el cual podría brindar una opción de consumo para la población sensible a este compuesto.

2. ANTECEDENTES

2.1. El café

El café es una de las bebidas más populares de creciente importancia económica durante los últimos 150 años. La palabra “café” proviene de la palabra árabe “Quaweh”. Hoy en día por su popularidad se conoce en varios idiomas: café (francés), *caffè* (italiano), *kaffee* (alemán), *coffee* (inglés). Esta bebida ganó popularidad por sus características estimulantes, principalmente atribuido a la cafeína. Por lo que en el siglo XIII los árabes lo llevaron de Etiopía a Yemen donde se establecieron las primeras plantaciones. La provincia de Kaffa en Etiopía es considerada como el hábitat natural del Género *Coffea Arabica* y el centro de África es reconocido como el lugar de origen del café robusta. Con un extenso y amplio esparcimiento del cultivo del café en todo el mundo, hoy en día es Brasil el mayor productor y exportador de café en el mundo con 178,020 toneladas en el 2019 (Esquivel et al., 2012; Heimbach et al., 2010; ICO, 2020; Murthy y Madhava Naidu, 2012).

2.1.1. Clasificación y botánica del café

Botánicamente, el café pertenece al género *Coffea* de la familia de las *Rubiaceae* (Clifford, Williams, & Bridson, 1989). Los integrantes de las *Rubiaceae* son tropicales o subtropicales con cerca de 400 géneros y 4800-5000 especies aproximadamente y el subgénero *Coffea* comprende cerca de 80 especies (Murthy et al., 2012). Las especies de importancia económica son *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. La primera es considerada superior en cuanto sus propiedades sensoriales y, por lo tanto, alcanza mayores precios en el mercado (Esquivel et al., 2012).

El café es una planta perenne y siempre verde en la naturaleza, tiene un tallo vertical prominente con un sistema radicular poco profundo (Murthy et al., 2012).

TABLA 2.1 Taxonomía del café

Clasificación		Clasificación	
Reino	<i>Plantae</i>	Subclase	<i>Asteridae</i>
Subreino	<i>Tracheoblanta</i>	Orden	<i>Rubiales</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>	Familia	<i>Rubiaceae</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>	Género	<i>Coffea</i>

Fuente: Clifford, Williams, & Bridson, 1989

Entre las características más sobresalientes de la planta: las hojas tienen un color brillante, ondulado y verde oscuro con venas conspicuas; la inflorescencia es un tipo de cimosa condensada sostenida por brácteas; es una planta de día corto y, por lo tanto, la iniciación floral tiene lugar en condiciones de 8 a 11 h de luz diurna; la polinización se produce dentro de las 6 h posteriores a la floración; el proceso de fertilización se completa entre las 24 y las 48 h después de la polinización; las semillas son elípticas o con forma de huevo y la cubierta de la semilla está representada por la piel plateada, que también está formada por escleroides; el tamaño, grosor o número de fosas en las paredes de los escleroides se considera como caracteres taxonómicos importantes para diferenciar entre especies y la germinación se produce en unos 45 días (Murthy & Naidu, 2012).

2.1.2. La cereza de café

Los árboles de café crecen en regiones tropicales entre el trópico de cáncer y capricornio, que tienen lluvias abundantes, temperaturas cálidas todo el año y una temperatura media de 21 °C. Estos crecen en altitudes entre el nivel del mar y 1900 m. A un árbol de café le toma 5 años aproximadamente producir su primera cosecha completa y será productivo por 15 años (Murthy et al., 2012). La fruta de café (también llamada baya o cereza) consiste en una suave piel externa o pericarpio, generalmente verde en frutas inmaduras y rojo-violeta o rojo intenso cuando está maduro (incluso amarillo o naranja en genotipos particulares) el pericarpio cubre el suave amarillento mesocarpio. Seguido de una capa traslúcida, viscosa, incolora y delgada de mucílago

también conocida como capa de pectina. Luego hay un delgado endocarpio amarillento llamado pergamino. Finalmente, la piel plateada cubre cada hemisferio del grano de café (endospermo) (Esquivel et al., 2012). De acuerdo con la Organización Internacional de café (ICO, 2020), del 2019 al 2020 hubo un incremento en la producción en el mundo de un 6.4 % (solo especie arábica), pasando de 9.9 millones de toneladas a 10.5 millones de toneladas. Debido a la alta producción de café por la alta demanda, se generan grandes cantidades de subproductos. El beneficiado, el cual comprende de la remoción de las capas externas del endospermo, es el proceso por el cual los países productores obtienen el café verde para comercializarlo posteriormente (Gemechu, 2020).

2.2. Beneficiado de café

Existen dos métodos que usualmente se siguen para el beneficiado de café: el método seco, que comúnmente se usa para el beneficiado de café de la especie *Coffea robusta*, y el método húmedo que comúnmente se usa para la especie de café *Coffea arabica* (Janissen y Huynh, 2018; Mussatto et al., 2011). Estos dos métodos difieren en complejidad y tipo final de producto por sus características físicas y sensoriales (Esquivel et al., 2012). De hecho, la generación de subproductos (FIGURA 2.1) también depende del tipo de método de beneficiado empleado (Gemechu, 2020).

2.2.1. Método seco

En el método seco, las cerezas frescas de café son esparcidas en un patio de secado, donde se moverán cada hora hasta alcanzar una humedad de 10 - 11 % (Gemechu, 2020). Comúnmente, consideran que el café está listo hasta que un puñado de cerezas secas produce un sonido de traqueteo cuando se agitan (Murthy et al., 2012). El grano de café se desprende del endocarpio (conocido también como pergamino) a las 3 o 4 semanas de secado, dependiendo de las condiciones (Gemechu, 2020). Para obtener el grano, se remueve la cáscara de café, la cual está compuesta por pericarpio, pulpa, mucilago, endocarpio y parte de la piel plateada. La cascara de café es el principal

subproducto obtenido por el método seco de beneficiado y representa del 40 al 50 % de la fruta seca de café (Esquivel et al., 2012). El grano final se conoce como “café no lavado” (Gemechu, 2020).

2.2.2. Método húmedo

Al café procesado por el método húmedo se le conoce como café lavado o café pergamino. El método húmedo requiere más recursos para retirar las partes de la fruta que rodean al endospermo, ya que se utilizan maquinas despulpadoras y un suministro abundante de agua limpia (Murthy et al., 2012). Este método es básicamente un proceso de despulpado seguido de una fermentación natural. A diferencia del método seco, la fruta de café debe estar en un perfecto estado de maduración, por lo que las frutas inmaduras y pasadas de maduración se descartan en un cuidadoso proceso de selección (Gemechu, 2020). La fermentación natural se realiza óptimamente entre temperaturas de 30 - 35 °C sobre racks de malla y madera donde los granos de café son esparcidos y revueltos de 3 a 4 veces durante el proceso (Esquivel et al., 2012). La fermentación tiene como objetivo remover la capa de mucílago que aún se encuentra adherida al endocarpio y tarda aproximadamente de 24 a 36 horas para café arábico y 72 horas para café robusta, dependiendo de factores como la concentración de enzimas pectinolíticas, la temperatura y la elevación (Murthy et al., 2012). Después del proceso de fermentación, el remanente de pulpa y mucílago es removido mediante un lavado que comúnmente se lleva a cabo en tanques de concreto (Esquivel et al., 2012). El lavado correcto se asegura cuando el pergamino no se siente pegajoso al tacto. Al final del proceso, por cada kilogramo de cerezas de café, se obtiene 0.432 kg de pulpa de café húmeda, el cual representa el 29 % del peso de la fruta en base seca. Además, del café despulpado, el proceso de fermentación y lavado da como resultado una descarga de 4.9 % de residuos (base seca). Esta descarga se compone del mucílago y los azúcares libres (Gemechu, 2020).

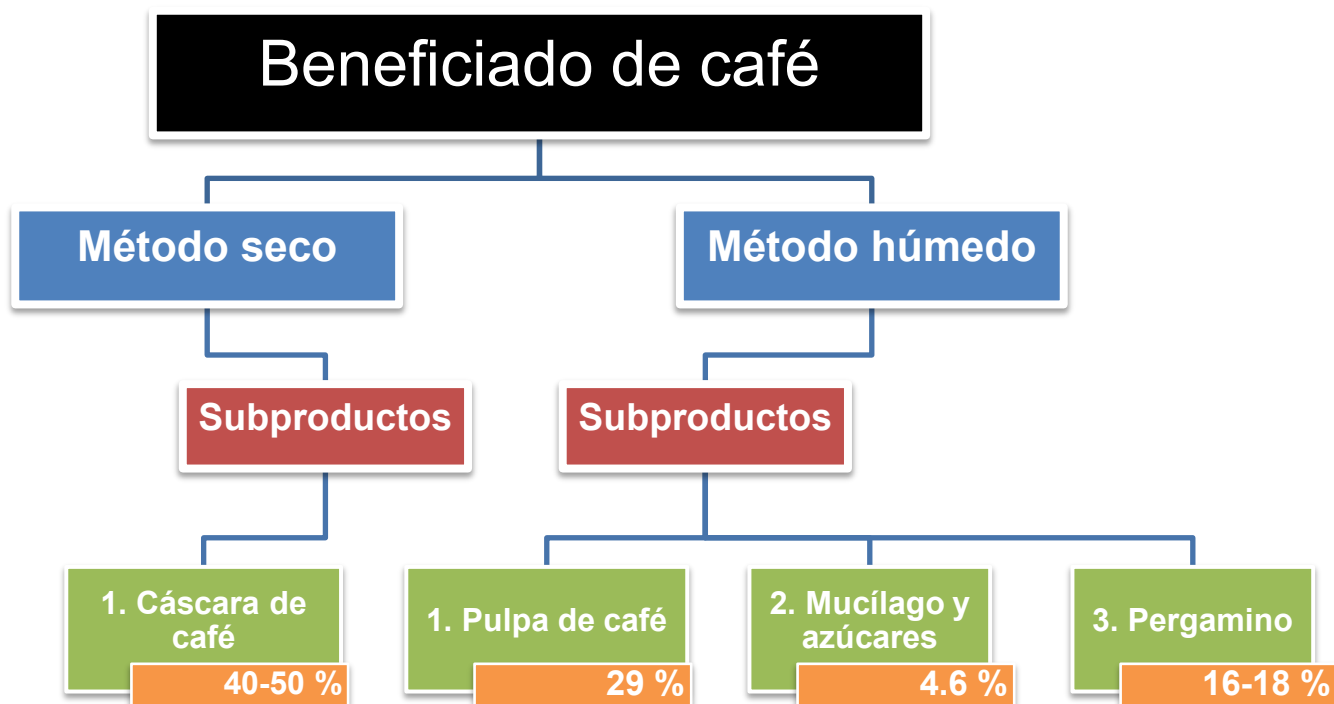


FIGURA 2.1 Subproductos obtenidos del beneficiado de café.

2.2.3. Subproductos del café

Los subproductos pueden verse como el conjunto de fracciones anatómicas en el caso del método seco, o como fracciones separadas en el caso del método húmedo (FIGURA 2.1), por ejemplo: la cascara de café que se obtiene por la vía seca, tiene parte de mucílago, pulpa, piel exterior de la fruta y es rica en carbohidratos 35 % proteínas en un 5.2 %, fibras 30.8 % y minerales en un 10.7 %. En el procedimiento húmedo, los subproductos son ligeramente diferentes ya que en el proceso se pierde un poco de mucílago y pergamino que sigue pegado en el endospermo. La piel del café y la pulpa tienen una composición similar con un contenido de proteína de 7.5 - 15 %, grasas de 2.0 - 7.0 % y carbohidratos en 21 - 32 % (Esquivel & Jiménez, 2012).

2.3. Pulpa de café

La pulpa de café es el primer subproducto obtenido del procesamiento y por cada 2 toneladas de café se produce una tonelada de pulpa de café, lo cual se traduce en un serio problema ambiental al ser desechada irresponsablemente (Duangjai et al., 2016). La pulpa de café contiene fibra, minerales, aminoácidos, compuestos polifenólicos que tienen un gran potencial para la nutrición humana. Por lo tanto, se han hecho varios estudios para valorizar la pulpa de café como: estudios de calidad nutricional, propiedades potencialmente promotoras de la salud y percepción sensorial de una formulación mejorada de pan sin gluten que contiene inulina, proteína de arroz y compuestos bioactivos extraídos de subproductos del café (Guglielmetti et al., 2019); el estudio de la valorización de los subproductos de la pulpa de café como ingrediente antiinflamatorio de complementos alimenticios que actúan sobre la liberación de IL - 8 (Magoni et al., 2018) y el estudio de Ontawong et al. (2019) sobre los mecanismos de relación entre la esteatosis hepática inducida en ratas obesas y el efecto de un extracto acuoso de pulpa de café, entre otros.

2.3.1. Composición química de la pulpa de café

La pulpa de café ha sido objeto de diferentes estudios donde se ha determinado su composición química cuyos resultados son similares.

TABLA 2.2 Composición química de la pulpa de café (*Coffea arabica* L)

Compuestos	Pulpa de café g/100 g	Compuesto	Pulpa de café g/100 g
Celulosa	63 ± 2.5	Azúcares totales	14.4 ± 0.9
Hemicelulosa	2.3 ± 1.0	Substancias pécticas	6.5 ± 1.0
Proteína	11.5 ± 2.9	Lignina	17.5 ± 2.2
Grasa	2.0 ± 2.6	Taninos	3.0 ± 5.0
Fibra total	60.5 ± 2.9	Ácidos clorogénicos	2.4 ± 1.0
Polifenoles totales	1.5 ± 1.5	Cafeína	1.5 ± 1.0

Fuente: Murthy & Madhava Naidu, 2012

Algunos de los componentes orgánicos presentes en la pulpa como la fibra, los polifenoles y las sustancias pécticas (TABLA 2.2) tienen un uso potencial en la industria como material crudo, alimento para animales, composta, generación de biogás y más recientemente como ingredientes en alimentos (Esquivel et al., 2012). Estas sustancias varían según el café, las prácticas de agricultura y las técnicas de procesamiento.

El contenido de cafeína en la pulpa ha sido una de las principales causas de sus efectos adversos en la alimentación para animales, sin embargo, esta puede ser extraída con agua u otros solventes (Braham & Bressani, 1979; Murthy & Madhava Naidu, 2012).

2.3.2. Importancia de los compuestos fenólicos en la pulpa de café

La pulpa de café es una buena fuente de compuestos fitoquímicos de los cuales se identifican 4 clases: flavan-3-ols, ácidos hidroxinámicos, flavonoides y antocianidinas cuya concentración varía dependiendo del estado de maduración de la cereza de café (Esquivel et al., 2012). Las proantocianidinas (taninos condensados) son polímeros de unidades de flavan-3-ol ligadas por enlaces carbón-carbón y están naturalmente presente en hojas y frutas de muchas plantas. Las fracciones de flavan-3-ol están presentes también como monómeros o unidades oligoméricas. Muchas plantas tienen altos contenidos de taninos a los que se les atribuye un efecto antinutricional al no permitir que las proteínas y los carbohidratos se absorban durante la digestión. Cuando se absorben, los taninos condensados pueden ser tóxicos para algunos mamíferos. Sin embargo, los taninos también se encuentran en bebidas como el vino y la sidra, a los que se les atribuye capacidad antioxidante (Ramirez-Coronel et al., 2004; Ramirez-Martinez, 1988). Los ácidos hidroxinámicos (como el ácido clorogénico, cafeico y ferúlico) se encuentran en la pulpa de café en un rango de 8.9 a 16.5 g/kg de PC, distribuidos como se muestra en la TABLA 2.3 y suelen estar unidos covalentemente a los polisacáridos de las paredes celulares de las plantas a través del enlace éster. Presentan propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias y antioxidantes. Estas propiedades son de gran interés para las industrias alimentaria, farmacéutica y

cosmetológica. El ácido ferúlico también se puede utilizar como aditivo debido a su capacidad para inhibir la peroxidación de ácidos grasos y constituye el ingrediente activo en muchas lociones para la piel y protectores solares (Duangjai et al., 2016; Ramirez-Coronel et al., 2007; Torres-Mancera et al., 2011).

TABLA 2.3 Compuestos fenólicos en la pulpa de café (*Coffea arabica L.*). Medias de los porcentajes de fenoles totales identificados

Compuesto	%
Ácido protocatecuico	1.6
Catequina	2.2
Ácido clorogénico (ácido-5-caffeoylquinico)	42.2
Epicatequina	21.6
Ácido Ferúlico	1.0
Ácido isoclorogénico I	5.7
Ácido isoclorogénico II	19.3
Ácido isoclorogénico III	4.4
Rutina	2.1

Fuente: Ramirez-martinez, 1988

En estudios recientes de Magoni et al. (2018) encontraron que los derivados del ácido quínico y proantocianidinas son abundantes en los extractos acuosos de pulpa de café y que son responsables de una alta actividad antiinflamatoria al inhibir la segregación de interleucina-8 en el tracto digestivo. Por otro lado, los estudios de Ontawong et al. (2019) encuentran que extractos acuosos de pulpa de café son ricos en ácidos clorogénicos, epicatequina y catequina. Entre estos, el ácido clorogénico, presente en la pulpa de café, disminuye los niveles de lípidos en plasma e hígado y aumenta el HDL (lipoproteínas de alta densidad) en ratas Zucker y ratas alimentadas con dietas altas en colesterol. Además, el ácido clorogénico mejora la sensibilidad a la insulina y disminuye la acumulación de lípidos hepáticos en ratones obesos inducidos por la dieta alta en grasa, mientras que la epicatequina, un componente menor presente en los

extractos de pulpa de café, reduce los lípidos plasmáticos y protege contra la acumulación de lípidos hepáticos en ratas hiperlipidémicas.

2.4. Mucílago de café

El mucílago del café adherido a la pulpa es rico en carbohidratos y nitrógeno, se considera un sustrato potencial en la industria de base biológica para producir moléculas y productos de valor agregado, como etanol y ácido láctico porque contiene 85–91 % (p/p) de agua, 6.2–7.4 % (p/p) de azúcares y pequeñas cantidades de proteínas, azúcares no reductores y pectina. También se ha encontrado que puede ser utilizado como fertilizante y como alimento para ganado, sin embargo, para este último se ve limitado por el contenido de cafeína (Orrego et al., 2018). La TABLA 2.4 muestra la composición química del mucílago de café reportada por Orrego et al. (2018).

TABLA 2.4 Composición química del mucílago del café (*Coffea arabica* L)

Componente	Concentración (g L ⁻¹)	Mineral	Partes por millón (ppm)
Glucosa	37.1	Calcio	337
Galactosa	14.7	Hierro	73
Lactosa	0.8	Magnesio	81
Ácido acético	1.2	Potasio	116(mg L ⁻¹)
Proteína	0.3	Fosforo	115

Fuente: Orrego et al., 2018

2.5. Impacto ambiental de los subproductos de café

Debido al impacto en el medio ambiente por el desecho y de los subproductos del café, el estudio de la valorización de estos desechos se convierte en prioridad. Fernández y colaboradores estudiaron en el 2017 la toxicidad de los desechos de café usado (el café usado es el que se desecha después de preparar la bebida) y argumentan que los residuos de café desechados en el medio ambiente, pueden suponer un riesgo

para la salud humana y ambiental, ya que este compuesto puede causar daños en el ADN y presentar toxicidad para los organismos acuáticos. El contenido de ácidos clorogénicos en los subproductos del café afecta la germinación de semillas y crecimiento de algunas plantas (Janissen et al., 2018). Esto podría poner en tela de juicio y preguntar: ¿Pueden hacerse productos de consumo humano a partir de desechos de café? En el mismo artículo ellos mencionan a dos estudios anteriores que no encontraron indicadores mutagénicos en los residuos, además argumentan que es probable que los efectos mutagénicos encontrados se deben a la presencia de metales o cafeína, o algún efecto de interacción entre ellos o incluso con otros compuestos no monitoreados en el estudio. Por otro lado, Heinbach y colaboradores en el 2010 reportaron un estudio de toxicidad y genotoxicidad de la fruta entera de café consumida por modelos murinos y demostraron que no había efectos adversos en las ratas por la dieta. El impacto ambiental del procesamiento húmedo y semihúmedo del café es considerable. Durante la fermentación en los procesamiento húmedo y semihúmedo, en el agua para los tanques de fermentación y las despulpadoras, los azúcares se fermentan en presencia de levaduras para producir alcohol y CO₂. Sin embargo, en esta situación el alcohol se convierte rápidamente en vinagre o ácido acético. El agua se acidifica con un pH alrededor de 4, el mucílago se precipita y forma costras en la superficie del agua. Estas aguas altamente ácidas de desecho están cargadas con pulpa y cáscara de café (Blinová et al., 2017; Fernandes et al., 2017; Heimbach et al., 2010; Janissen et al., 2018).

La industria del café es responsable de una alta producción de desechos sólidos y aguas de desecho altamente contaminantes. Actualmente, hay una presión social y política para reducir la contaminación ocasionada por actividades industriales. La mayoría de los países desarrollados y no desarrollados se esfuerzan por reciclar sus residuos adaptando sus procesos. El uso de los subproductos ha sido ampliamente estudiado como: compostaje, forraje, alimento humano, producción de biogás, removedor de metales pesados, fuente de antioxidantes, entre otros (Blinová et al., 2017).

2.6. Subproductos de café como ingredientes funcionales

Con respecto a la utilización de subproductos de café como ingrediente en la formulación de alimentos o fuente de aditivos alimentarios naturales, estos proporcionan antioxidantes, efecto antimicrobiano y son ricos en fibra. Por lo que, el uso de la pulpa de café como materia prima o ingrediente alimenticio natural saludable podría generar ganancias económicas para la industria, mejoraría la nutrición de los consumidores, produciendo efectos beneficiosos para la salud, y reduciría el impacto ambiental de los mismos. En relación con esto, actualmente la demanda de alimentos saludables y con propiedades alimentarias mejoradas por parte de los consumidores está aumentando, y los productores de alimentos están reorganizando el desarrollo de sus productos alimenticios a esta demanda (Gemechu, 2020). Los resultados de Guglielmetti et al. (2019) apoyan la viabilidad de los extractos de piel plateada y cascara de café como fuentes naturales sustentables de antioxidantes, inhibidores de la α -glucosidasa y colorantes. Las propiedades promotoras de la salud que observaron sugieren que los extractos de subproductos del café podrían potencialmente usarse como ingredientes alimentarios funcionales o suplementos para reducir el riesgo de enfermedades crónicas asociadas con el estrés oxidativo y para controlar los niveles de glucosa posprandial. En base a las preferencias de los consumidores, obtuvieron nuevas formulaciones de pan con una alta calidad nutricional y sensorial, aptas para celíacos y con potencial para reducir el riesgo de enfermedades gastrointestinales relacionadas con el estrés oxidativo. Los datos sobre la digestión in vitro indicaron una disminución significativa ($p < 0.05$) en la bioaccesibilidad de los azúcares y un aumento significativo ($p < 0.05$) en los antioxidantes.

2.7. Panificación y productos derivados

El pan es uno de los alimentos básicos más consumidos en todo el mundo. La fabricación de pan es un proceso complejo que implica mezclar la masa, fermentar, hornear y enfriar. Entre estos pasos, la cocción es de gran importancia porque la transferencia de calor y masa ocurre simultánea e interdependientemente dentro de la

masa durante la cocción, junto con una serie de cambios físicos y químicos, p. ej. evaporación de agua, expansión de celdas de gas, gelatinización de almidón, coagulación de proteínas, transición de masa de miga y formación de costra. El ingrediente principal en la panificación es la harina de trigo. El producto final depende en gran medida de la calidad de la harina utilizada, del proceso de producción y técnica de elaboración de pan (Bonnand-Ducasse et al., 2010).

2.7.1. Harina y productos de panadería

De acuerdo con norma oficial mexicana NOM-247-SSA1-2008, productos y servicios. Cereales y sus productos: el polvo que resulta de la molienda del trigo y otros cereales se le denomina harina. La harina es utilizada para elaboración de productos como pastas, pasteles, pays, productos de bollería, productos de panificación, entre otros. Según la NOM-247-SSA1-2008 un producto de panificación es aquel obtenido de las mezclas de harinas o cereales integrales o leguminosas, agua potable, fermentados o no, que pueden ser formulados con: mantequilla, margarina, aceites comestibles, grasas vegetales, sal, leudantes, polvo de hornear y otros aditivos para alimentos, especias y otros ingredientes opcionales tales como, azúcares, mieles, frutas, jugos, granos y semillas comestibles, entre otros; sometidos a proceso de horneado, cocción o fritura; con o sin relleno o cobertura, pueden ser mantenidos a temperatura ambiente, en refrigeración o en congelación según sea el caso (NOM-247-SSA1-, 2008).

2.7.2. Muffins

El muffin es un producto de rápida preparación cuyos ingredientes principales son harina, azúcar, grasa y huevos. Cada ingrediente juega un rol importante en la estructura, apariencia y calidad final del producto. Hoy en día, las tendencias marcan que los consumidores demandan un aporte nutricional con más beneficios a la salud en diferentes productos alimenticios sin que afecte el sabor o textura original. Por lo tanto, se han llevado a cabo estudios para sustituir ingredientes convencionales del producto por otros que aporten beneficios a la salud. (Singh, S. et al., 2020). Como

harinas de distintos cereales como maíz, avena, arroz, centeno y cebada que han ganado importancia en la elaboración de productos panificados, debido al valor que agregan al producto final en composición, valor nutrimental y funcionalidad (Bonnand-Ducasse et al., 2010). Además de la funcionalidad y valor nutrimental se han hecho esfuerzos por crear productos panificados libres de harina de trigo, ya que hay un segmento de la población que padece de celiaquía. El inconveniente de estos productos es que se consideran con una calidad sensorial por debajo de los productos panificados con harina de trigo.

2.7.3. Trigo

El trigo, junto con el maíz y el arroz, son los tres cultivos más importantes del mundo con una producción total de 766 millones de toneladas en el 2019 (FAOSTAT, 2019) y una demanda de consumo creciente ya que se prevé que la utilización mundial de trigo en la campaña comercial 2021/22 aumente a 770 millones de toneladas sobre el crecimiento interanual previsto en el consumo de alimentos y el uso industrial (FAO, 2021). El trigo se cultiva en aproximadamente 216 millones de hectáreas, desde Escandinava hasta Argentina, incluyendo las zonas más altas de los trópicos, con un rendimiento aproximado de 3.5 t/ha (Pequeno et al., 2021; Shewry et al., 2002). Muchos documentos históricos confirman que el trigo fue el primer alimento utilizado en procesos para la elaboración de alimentos, y actualmente representa cerca del 20 % de las calorías de la dieta a nivel mundial (Kulp y Jr, 2000; Zampieri et al., 2017)

2.7.4. Gluten

El gluten se compone de prolaminas las cuales son el conjunto de las principales proteínas de almacenamiento que se depositan en las células de endospermo (Sayaslan, 2004). La naturaleza de las interacciones entre proteínas en el gluten de trigo se discute con referencia particular al papel de las subunidades de alto peso molecular. Se argumenta que las subunidades de alto peso molecular interactúan entre sí por enlaces disulfuro y enlaces de hidrógeno. El trabajo realizado a la masa favorece

la formación de enlaces disulfuro en las subunidades y esto aumenta el peso molecular efectivo del gluten, y por lo tanto, el número de interacciones proteína-proteína se incrementa. La asociación de las subunidades también puede tener lugar mediante enlaces de hidrógeno entre cadenas. Se forman tantos enlaces de hidrógeno que no todos pueden romperse simultáneamente (Shewry et al., 2002).

La organización tridimensional y el papel que desempeñan las proteínas en las propiedades viscoelásticas del gluten aún sigue siendo un reto a pesar de los avances en conocimiento (Hernández-Estrada et al., 2014). Las proteínas del gluten juegan un papel clave en la determinación de la calidad de cocción y horneado del pan al conferir capacidad de absorción de agua, cohesividad, viscosidad y elasticidad de las masas por lo que se ha convertido en el foco principal de estudio bioquímico para determinar la calidad trigo (Hernández-Estrada et al., 2017).

Por otro lado, existe un segmento de la población que padece de celiaquía (o enfermedad celiaca) que les imposibilita consumir alimentos con proteínas presentes en el trigo.

2.8. Enfermedad celiaca

Se trata de una reacción autoinmune que resulta del consumo de gluten y causa inflamación en la mucosa del intestino delgado, que conduce a la mala absorción de nutrientes, el único tratamiento disponible es evitar estrictamente los alimentos que contienen gluten, (Singh, J. P. et al., 2015). La realización de pruebas serológicas han podido confirmar su prevalencia en ciertas regiones (Parada y Araya, 2010). La enfermedad celiaca tiene una distribución mundial con una estimación de prevalencia entre 1:67 y 1:250. La prevalencia puede ser subestimada en ciertas áreas, especialmente en Latinoamérica. En México aún es incipiente, sin embargo, las investigaciones invitan a generar una mayor sospecha del padecimiento, una mayor conciencia y confiabilidad de los procedimientos de diagnóstico para poner en relieve la recientemente prevalencia de la enfermedad celíaca. Por otro lado, la adherencia

de por vida a una dieta sin gluten sigue siendo el tratamiento fundamental para la enfermedad (Remes-Troche et al., 2018).

2.9. El pan como producto funcional

Un producto funcional (en alimentos) es aquel que además de su aporte nutricional inherente, aporta otros nutrimentos que impactan positivamente en la salud, como, por ejemplo: el consumo de fibra dietética o compuestos fitoquímicos (Bisen et al., 2016; Kumar y Krishnan, 2017). El pan, en especial el pan de trigo es un alimento muy común en la dieta en todo el mundo que cumple con ciertas recomendaciones nutricionales. Sin embargo, el uso de harinas refinadas durante las últimas décadas ha provocado una deficiencia en fibra dietética (Bonnand-Ducasse et al., 2010). Por otro lado, Segmentos de la población con patologías como diabetes, obesidad, celiaquía e hipertensión arterial, limitan el consumo de diversos alimentos panificados, además de que hay una tendencia en aumentar el aporte nutricional de alimentos de consumo común para cubrir deficiencias nutricionales. Por lo que cambiar formulación del pan convencional ha significado una alternativa para el problema y sobre todo un reto tecnológico. La menor alteración en la formulación de pan repercutirá fuertemente en su calidad sensorial final. La tecnología de cereales utiliza la reología para determinar, las características de uso potencial de distintas harinas de trigo y otros cereales, así como la formulación y mejoramiento tecnológico de productos panificados (Goesaert et al., 2005; Moore et al., 2004; Scheuer et al., 2011). La industria de cereales ha logrado obtener información valiosa por medio de técnicas reológicas empíricas para evaluar la calidad y el desempeño de las harinas durante el proceso de panificación (Dobraszczyk et al., 2003).

2.10. Análisis de harina

La harina se produce por la eliminación selectiva del germen y otras capas externas del endospermo de trigo durante el proceso de molienda NOM-247-SSA1- (2008). Como se ha descrito antes, la harina de trigo es usada para la producción de una

amplia variedad de productos horneados, extruidos y laminados. Cada uno de estos productos requieren un tipo de harina diferente para alcanzar las cualidades requeridas por los consumidores, por ejemplo: las harinas fuertes y medianamente fuertes con alto y medio contenido de proteína, son usadas para la producción de pan, mientras que las harinas débiles que tienen bajo contenido de proteínas son usadas para la producción de pasteles, galletas y muffins. Mientras que las harinas de trigos duros (*Triticum durum*) son usadas para la producción de pastas. La capacidad de la harina para producir un producto determinado se debe a las características fenotípicas del trigo, el efecto del ambiente durante su crecimiento, cosecha y almacenamiento, y las técnicas de molienda para producir la harina. Para predecir o medir el efecto de todos los factores antes mencionados durante el procesamiento de la harina se han desarrollado diferentes tipos de pruebas (Preston y Williams, 2003).

2.10.1. Propiedades fisicoquímicas de las harinas

Estas pruebas fueron diseñadas para predecir o determinar la eficiencia del proceso de molienda sus capacidades tecnológicas y las cualidades del producto final. Estas pruebas pueden ser subdivididas en tres categorías: análisis proximales, parámetros relativos al procesado y análisis de aditivos específicos. Además de estas pruebas, las masas y productos finales, que pueden producirse a partir de las harinas, son sometidas a pruebas físicas en condiciones de laboratorio que estiman la calidad del producto (Preston et al., 2003).

En la industria de cereales hay una larga historia de mediciones físicas empíricas que se lleva a cabo con ingeniosos instrumentos como el penetrómetro, texturómetro, alveógrafo, farinógrafo, viscosímetros de flujo y fermentómetros. Estos instrumentos con sus respectivas técnicas proveen información útil para la calidad y desempeño de los productos como: consistencia, dureza, textura y viscosidad (Dobraszczyk et al., 2003). Además de las pruebas de reología fundamental, que continúan estudiándose para relacionarlas con las cualidades del producto.

2.10.2. Farinograma

El farinógrafo se ha utilizado ampliamente para estudiar las propiedades de absorción de agua y mezcla de las harinas de trigo principalmente, aunque también se ha utilizado para estudiar el efecto de la adición de fibra y proteína a la harina y la correlación de los parámetros propios de la farinografía con el volumen de pan. Anil (2007), estudia el efecto de la adición de fibra de avellana en la harina de trigo con el fin de incrementar el contenido de fibra. Se encontró que la adición de fibra de avellana aumenta la absorción de agua de la harina junto con los tiempos de desarrollo y estabilidad por lo que se concluye que afecta significativamente sus propiedades reológicas y que faltan más estudios para develar la acción de las fibras en el proceso de panificación. Seydi et al. (2015) determinó las relaciones entre los parámetros de farinografía y el volumen de pan y contenido de proteína. En su estudio, se evaluaron 100 genotipos de trigo (*Triticum aestivum L.*) por medio de análisis químicos, físicos y reológicos. Sus resultados demuestran que los parámetros del farinógrafo están correlacionados con el volumen de pan por lo que el farinógrafo se puede utilizar como herramienta principal para estudiar reológicamente la masa para pan. Wirkijowska et al. (2020) realiza una aproximación al uso de subproductos de la producción de aceite de la semilla de lino en panificación. Para evaluar el efecto de la adición de la harina de lino, ellos realizaron farinografía, análisis de textura y calidad de pan (volumen, color, peso y altura) y una evaluación sensorial. Observaron que la adición de fibra disminuyó el tiempo de estabilidad de la masa, por lo que es posible que los componentes de la semilla de lino afectaran la hidratación y extensión de los péptidos, dificultando la formación de la red de gluten durante el mezclado.

El farinógrafo determina la cantidad óptima de agua para lograr la consistencia de la masa de 500 Unidades Brabender (UB) por medio de la resistencia que opone la masa al mezclado (durante la incorporación de agua a la harina). Los parámetros que se reportan según el método 54-21.02 de la AACCI (método de comportamiento reológico por farinógrafo: procedimiento con una cantidad de harina constante) y la norma ICC-N – 115/1 para calidad de harina (FIGURA 2.3) son:

Tiempo de desarrollo: es el intervalo, desde la primera adición de agua hasta ese punto de consistencia máxima inmediatamente antes de la primera indicación de debilitamiento.

Estabilidad: se define como la diferencia de tiempo, entre el punto donde la parte superior de la curva se cruza por primera vez con la línea de 500 UB y el punto donde la parte superior de la curva sale de la línea de 500 UB.

Índice de Tolerancia al Amasado (ITM): este valor es la diferencia en UB desde la parte superior de la curva en el pico hasta la parte superior de la curva medida 5 minutos después de que se alcanza el pico.

Tiempo de ruptura: Este es el tiempo desde el inicio de la mezcla hasta hay una disminución de 30 UB con respecto al punto máximo.

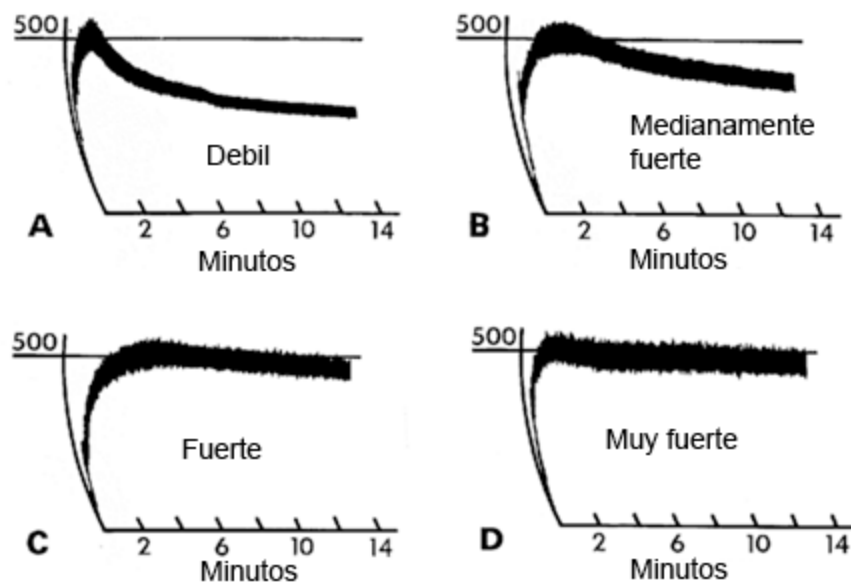


FIGURA 2.2 Farinogramas de harinas de diferente fuerza de gluten.

En la FIGURA 2.2 se muestran farinogramas de harinas de diferente fuerza de gluten, donde: **A** representa una harina débil de absorción del 54 %; un Tiempo de desarrollo de masa (TD), 1.25 min; Un índice de tolerancia al amasado (ITM) con un valor de 180 Unidades Brabender, **B** representa a una harina de dureza media, con una absorción de 57 %; un TD de 2.75 min; un ITM con valor de 80 UB. **C** representa a una harina

fuerte con absorción de 64.5 %; un TD de 5 min; un ITM con valor de 30 UB. y **D** que representa a una harina muy fuerte con absorción de 62.7 %; un aparente TD de 1.75 min y un ITM con valor de 20 UB. (Método 54.21.02).

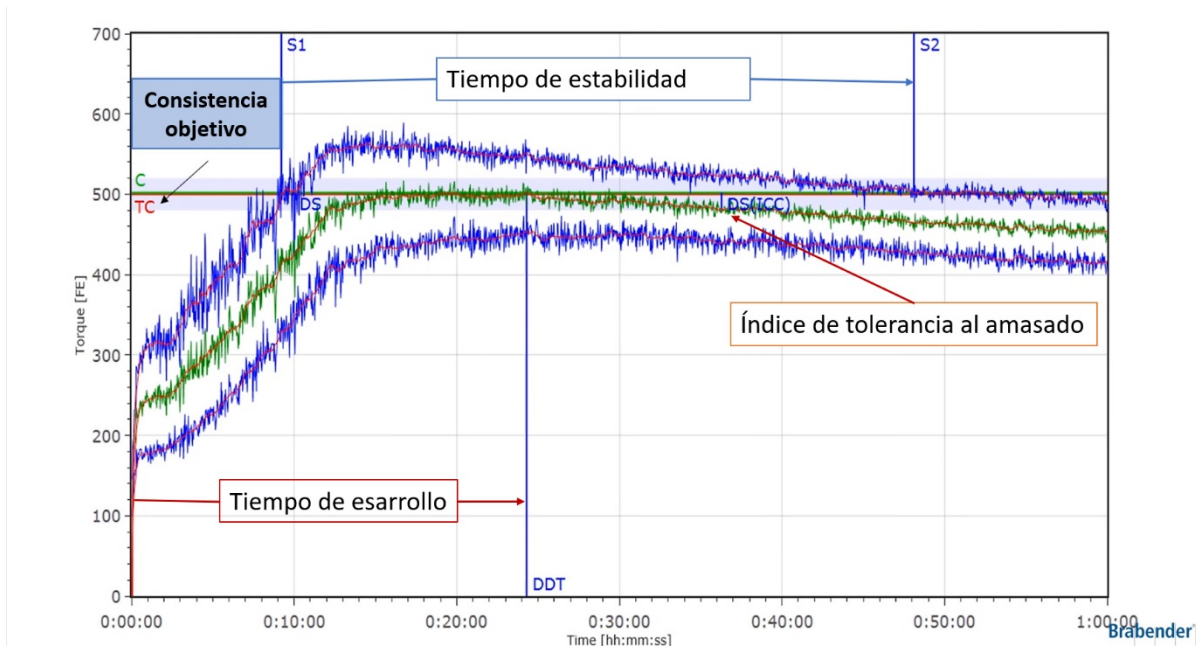


FIGURA 2.3 Curva típica de farinografía de harinas de trigo para obtención de parámetros para calidad.

2.11. Alveograma

El alveógrafo mide la resistencia de la masa a la deformación y el nivel de deformación que la masa puede tener sin romperse. Condiciones establecidas por el método de la AACCI 54.30.02. En este método, una hoja o disco de masa de espesor definido preparada en condiciones específicas se expande por presión de aire en forma de burbuja hasta que se rompe. La presión interna en la burbuja se registra gráficamente. Los resultados son medidos y calculados de 5 curvas obtenidas. Los parámetros que se consideran en este método son: Sobre presión máxima (P), la abscisa promedio en la ruptura (L), índice de hinchamiento (G), la relación de configuración de la curva (P/L), energía de deformación de la masa (W) e índice de elasticidad. La FIGURA 3 muestra una curva típica de alveograma reportado por Rodríguez (2012).

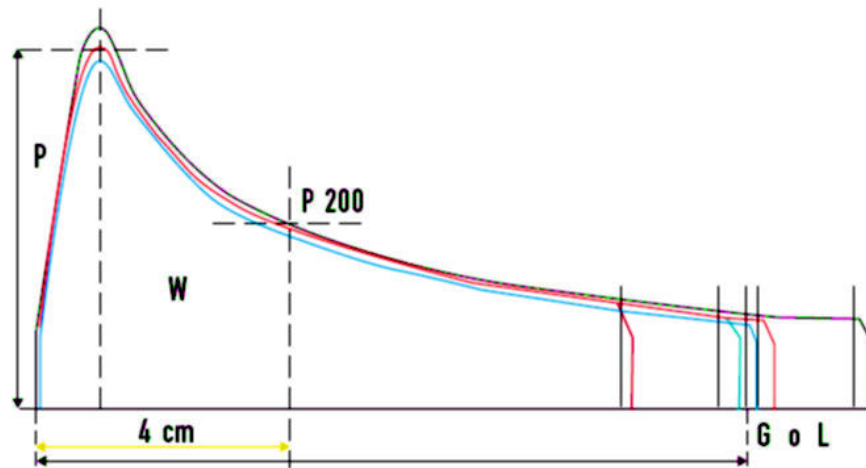


FIGURA 2.4 Curva típica de alveografía de masa para pan.

2.11.1. Mixograma

El mixógrafo es un instrumento de prueba utilizado para la evaluación de la calidad de horneado de las masas de harinas de trigo, y al igual que el farinógrafo, mide la resistencia que opone la masa al amasado. El mixógrafo ha sido utilizado para estudiar los efectos de los ingredientes añadidos en el proceso de amasado, la reología de la masa, control de calidad, y para la evaluación de la dureza y suavidad de masas de harina de trigo. Es principalmente utilizado en los estados unidos para clasificar las harinas por su fuerza. Esta prueba es descrita por el método oficial de la AACCI 54-40.02. Los parámetros que se consideran en esta prueba son: absorción agua, donde menos agua aumenta la consistencia de la masa y mueve la curva del mixograma hacia arriba; el tiempo de desarrollo máximo que es el tiempo que tarda en crearse la curva desde el origen hasta el punto más alto, que es donde la masa alcanza su óptima retención de gas; y la tolerancia al amasado que está directamente relacionada con la cantidad y calidad de proteína formadora de gluten presente (Preston et al., 2003).

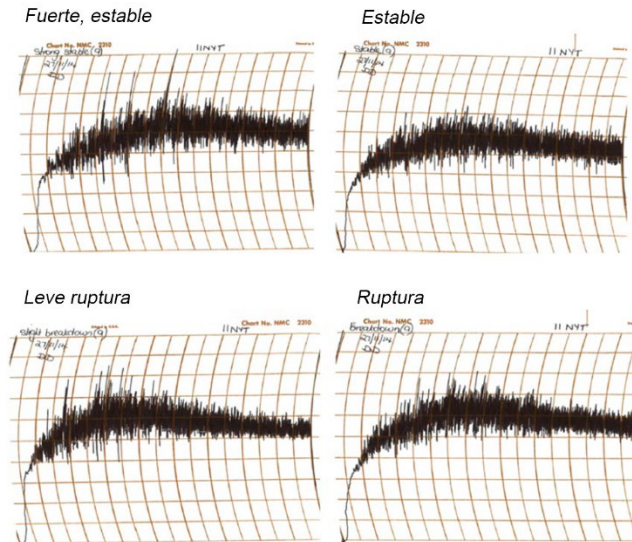


FIGURA 2.5 Mixogramas característicos obtenidos para muestras de trigo duro.

Los títulos de los mixogramas de la FIGURA 2.5 fueron dados de forma arbitraria en el estudio. Cada línea vertical representa 0.5 min. Fuente: (Sissons, 2016).

2.12. Reología en alimentos

Los alimentos son sistemas complejos con una alta cantidad de componentes biológicos, además, de generalmente, un contenido importante de agua. La diversidad de estos componentes imparte variabilidad estructural a los alimentos, exhibiendo así diferentes comportamientos reológicos como: fluidos newtonianos de baja viscosidad (agua), y fluidos newtonianos de alta viscosidad (miel) y sólidos rígidos (caramelos). El comportamiento reológico, está determinado con la estructura molecular del alimento, y por lo tanto está relacionado con la estabilidad, apariencia y calidad de los alimentos. La calidad de los alimentos y sus componentes se puede predecir mediante una caracterización reológica (Deka et al., 2019).

2.12.1. Reología

La reología ha sido descrita como el estudio del flujo y la deformación de los materiales (Barnes, 2000). Para medir el comportamiento reológico, el material se somete a una deformación controlada durante un tiempo definido y se mide el esfuerzo resultante o viceversa. Los objetivos de los estudios reológicos son: obtener una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas de los materiales asociada a información de la estructura molecular y composición del material; así como caracterizar y simular el desempeño del material durante condiciones de proceso y control de calidad (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003). Esta ciencia es importante en muchos campos de estudio: geología y minería, mecánica de suelos, materiales estructurales, bioingeniería, cosmética, alimentos, entre otras (Steffe, 1996). Para comprender los comportamientos reológicos, hay que poner atención en los conceptos básicos de esfuerzo y deformación.

2.12.2. Esfuerzo y deformación

La deformación es el efecto observado o respuesta inducida por el esfuerzo aplicado, en otras palabras: es el cambio relativo en las dimensiones del material por efecto de una fuerza externa aplicada (Deka et al., 2019). La deformación se puede calcular con la ecuación 2.1:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 2.1$$

Donde ε es la deformación (mm/mm), L es la longitud original de una muestra y ΔL es el cambio de longitud después de aplicar el esfuerzo. Usualmente se multiplica por 100 y se expresa en porcentaje de deformación (Menard, 1999). La FIGURA 2.6 ilustra el cambio de longitud y menciona los tipos de deformación.

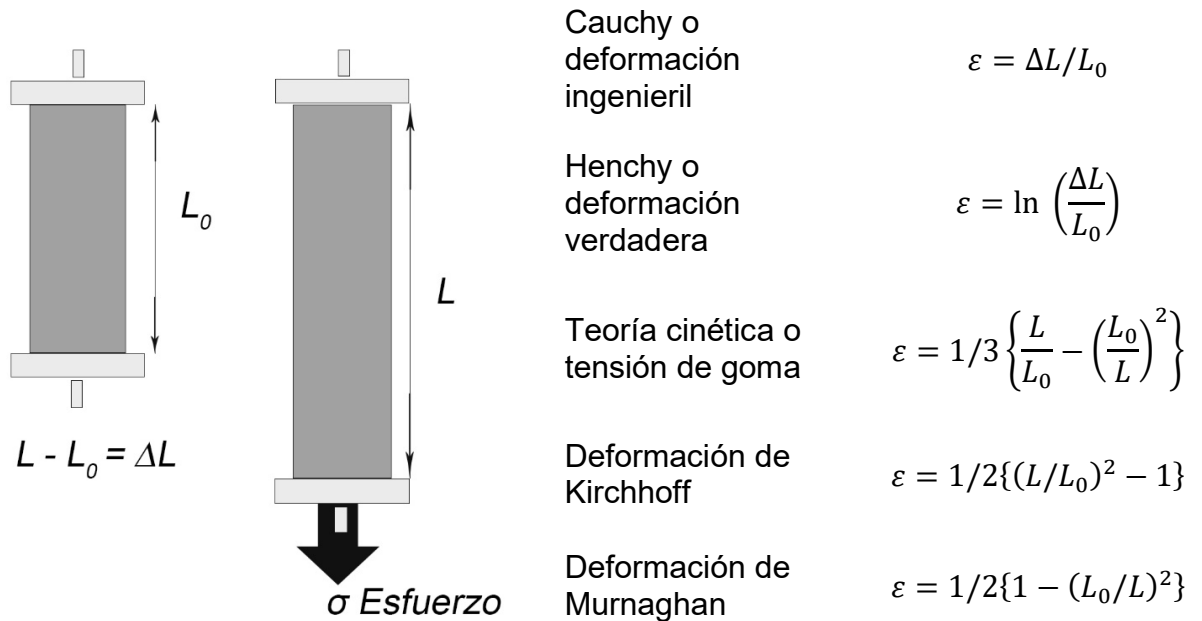


FIGURA 2.6 Tipos de deformación en materiales solidos.

El esfuerzo es la fuerza por unidad de área aplicada en un material y se describe con la ecuación 2.2:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.2}$$

donde σ es el esfuerzo, F es la fuerza y A es el área donde se aplica la fuerza. La unidad para esfuerzo en el sistema Internacional es en N/m^2 o Pa.

Los materiales exhiben diferentes comportamientos dependiendo de cómo es aplicado el esfuerzo y también el modo de deformación que se ha elegido. La FIGURA 2.7 ilustra la orientación del esfuerzo, estas diferentes geometrías dan diferentes curvas de esfuerzo-deformación aparentes e, incluso en un material isotrópico homogéneo, dan resultados distintos (Menard, 1999). Es decir, la rigidez del material se puede observar y evaluar dependiendo de la forma y dirección en la que se aplica el esfuerzo, los módulos obtenidos por flexión, compresión, cizallamiento y volumétrico no son iguales. Además, cada forma de aplicar el esfuerzo tiene sus limitaciones. Por lo que tenemos

que ocupar pruebas que traten de describir o simular las condiciones de esfuerzo y deformación que se utilizan habitualmente durante los procesos de interés.

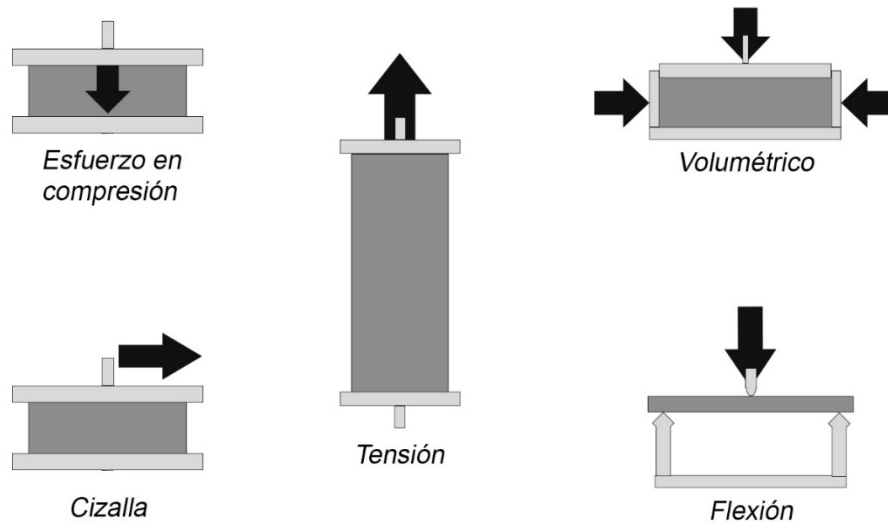


FIGURA 2.7 Métodos para aplicar un esfuerzo.

Para evaluar correctamente los efectos del esfuerzo y la deformación, la muestra del material debe ser homogénea, isotrópica y continua. Una muestra de material es homogénea si tiene propiedades físicas idénticas en cualquier punto, e isotrópica si una propiedad física dada es igual en cualquier dirección y en cualquier punto de la muestra del material (Menard, 1999).

2.12.3. Viscosidad, elasticidad y viscoelasticidad de los materiales

Las propiedades de los materiales se pueden concebir dentro de dos extremos: Los límites del comportamiento elástico de un sólido ideal regido por la ley de Hook y el comportamiento viscoso de un fluido. Además de los comportamientos elástico y viscoso, existe un tercer comportamiento denominado viscoelástico, que a grandes rasgos es una combinación de los dos primeros comportamientos (Deka et al., 2019), siendo este el caso de los alimentos, ya que usualmente tienen un contenido de

humedad, que afecta directamente las propiedades reológicas. De forma general la viscosidad de los fluidos se define como la resistencia de un material a fluir, mientras que la elasticidad de los sólidos se define como la capacidad de un material de deformarse y regresar a su forma original después de retirar el esfuerzo sometido. La naturaleza de los comportamientos elástico ideal, viscoso ideal y viscoelasticidad de los materiales se pueden representar mediante modelos mecánicos utilizando resortes, amortiguadores y una combinación de ambos. Donde la naturaleza del resorte imita a los materiales sólidos elásticos pues almacena energía cuando al aplicar un esfuerzo y sin deformarse regresa a su forma original, y el amortiguador representa a los fluidos viscosos, donde la energía se disipa al aplicar un esfuerzo y quedan deformados permanentemente (Deka et al., 2019).

2.12.4. Comportamiento elástico (sólido ideal): ley de Hooke

La elasticidad de los sólidos se define como la capacidad del material para resistir la deformación y regresar a su forma original después de retirar el esfuerzo sometido. Al graficar el esfuerzo contra la deformación resultante en un material sólido se observa una línea recta que parte del origen, este resultado se conoce como la ley de Hooke. La ley de Hooke dice que la deformación de un resorte está linealmente relacionada con el esfuerzo aplicado, multiplicado por una constante específica del resorte. Matemáticamente se expresa con la ecuación 2.3:

$$\sigma = E\varepsilon \quad 2.3$$

donde E es la constante de proporcionalidad o módulo de Young, σ el esfuerzo y ε la deformación. A medida que la constante E incrementa, el material se vuelve más rígido, y la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación incrementa. Como la pendiente inicial es el módulo de Young, el módulo también aumenta. El módulo de Young es entonces una medida para la rigidez del material y se define como la relación esfuerzo-deformación (Menard, 1999).

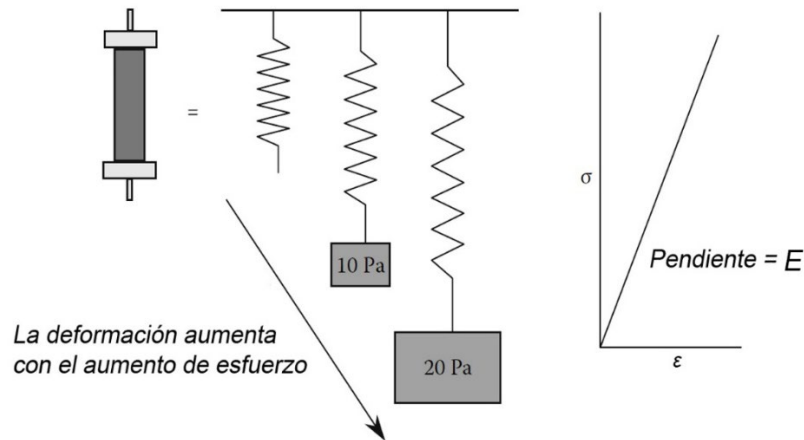


FIGURA 2.8 Respuesta elástica de un sólido ideal (Ley de Hooke).

2.12.5. Comportamiento viscoso (fluido)

La viscosidad es la resistencia que tiene un fluido a fluir debido a la fricción interna entre las capas del fluido (Deka et al., 2019). Un líquido newtoniano es aquel, que, a pesar de cambiar la temperatura y la presión, su viscosidad no varía con la velocidad de deformación o tiempo (Barnes, 2000). Es decir, la curva del esfuerzo en función de la velocidad de deformación es una línea recta y se describe con la ecuación 4 (Menard, 1999). Para un fluido no-Newtoniano la relación esfuerzo y velocidad de deformación no es lineal y la viscosidad no es constante y se considera como viscosidad aparente. La viscosidad aparente depende de la razón de corte (Deka et al., 2019).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} = \eta \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) \quad 2.4$$

Para la ecuación 2.4, se muestra como el esfuerzo está relacionado con la razón de deformación por la viscosidad donde σ es el esfuerzo, η es la viscosidad y $\dot{\gamma}$ es la razón de deformación (velocidad de corte), y se define como el gradiente de velocidad en la dirección del flujo del material (Barnes, 2000) la cual es igual a la derivada de la deformación (γ) sobre la derivada del tiempo (t). Si bien muchos aceites y líquidos son fluidos newtonianos, materiales como polímeros, productos alimenticios y

suspensiones no lo son (Menard, 1999). Los fluidos no Newtonianos se clasifican por sus diferencias con el comportamiento ideal, como se ilustra en la FIGURA 2.9.

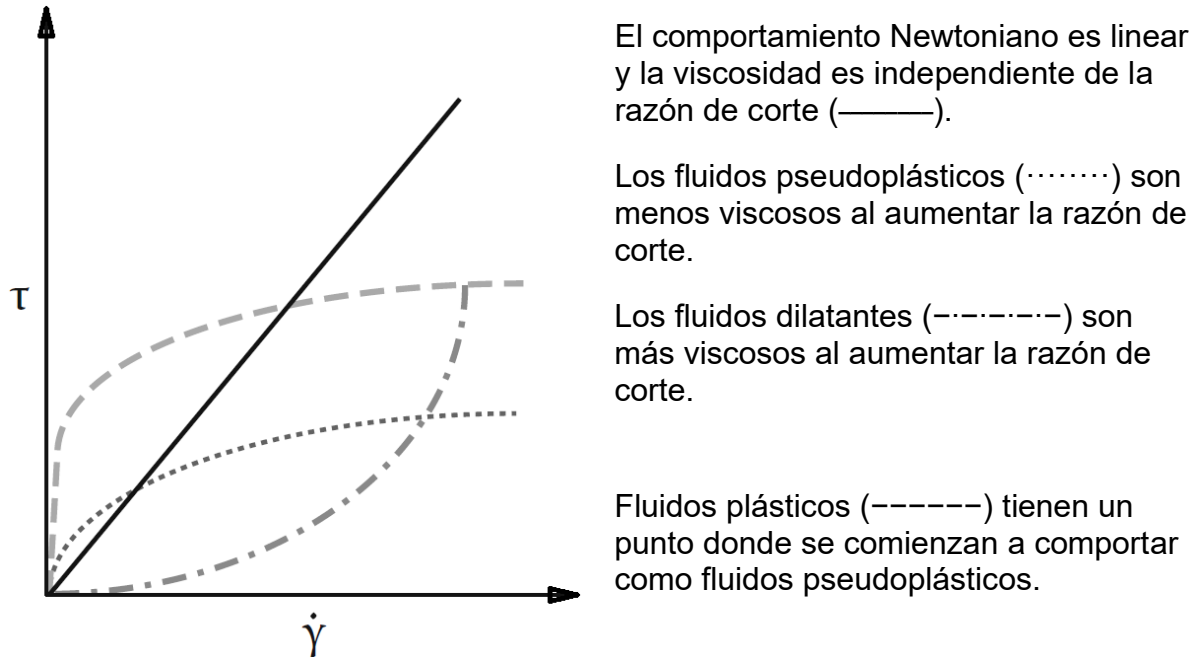


FIGURA 2.9 Diferentes comportamiento de la viscosidad de los fluidos al aplicarseles a un esfuerzo.

2.12.6. Comportamiento viscoelástico

La viscoelasticidad es la propiedad que muestran materiales al exhibir la combinación de comportamientos elásticos y viscosos (Deka et al., 2019).

En los fluidos estructurados (fluidos más complejos de comportamiento no Newtoniano) hay una condición natural de reposo de la microestructura que representa un mínimo estado de energía. Cuando los fluidos estructurados se deforman, las fuerzas termodinámicas actúan inmediatamente para recuperar el estado de reposo, analógicamente como lo haría un resorte. Este tipo de energía es el origen del comportamiento elástico en los fluidos estructurados. Inicialmente la fuerza restauradora incrementa linealmente con la deformación que aleja al fluido de su estado de reposo, pero eventualmente esta respuesta deja de ser lineal. La tasa de aumento de fuerza con la deformación disminuye, hasta que a deformaciones grandes

surge una situación de estado estacionario y la fuerza elástica se vuelve constante. Para cuando estas respuestas elásticas se hagan presente la microestructura habrá cambiado drásticamente. Las fuerzas elásticas se manifiestan en deformaciones pequeñas como módulos elásticos y en deformaciones más largas (o estado estacionario) se manifiesta como la diferencia de los esfuerzos normales. Junto a estas fuerzas elásticas, también están las fuerzas de fricción entre capas (o fuerzas viscosas) del fluido que explican la disipación de energía y evita que el fluido regrese por completo a su estado de reposo. El conjunto de fuerzas elásticas y viscosas producen la viscoelasticidad (Barnes, 2000; Krishnan et al., 2010). Una de las formas más sencillas de entender la viscoelasticidad es usando los modelos mecánicos análogos de Maxwell, Kelvin y Burgers.

2.12.7. Modelos mecánicos análogos para la viscoelasticidad

Los modelos mecánicos analógicamente consisten en la combinación de elementos lineales elásticos y viscosos (resortes y amortiguadores). El resorte representa el elemento sólido elástico ideal y obedece la ley de Hook (Ec. 2.3). En el comportamiento elástico no se considera efecto del tiempo, por lo que al aplicar un esfuerzo la deformación se hace presente de inmediato, y al retirar el esfuerzo la deformación cae a cero inmediatamente. De forma similar a la respuesta elástica, la respuesta lineal viscosa puede ser representada por un amortiguador: un embolo que se mueve por un líquido newtoniano viscoso representa esto físicamente. La razón de deformación ($\dot{\gamma}$) adquiere importancia en este comportamiento. Al imponer un esfuerzo el amortiguador inmediatamente comienza a deformarse a velocidad constante hasta que el esfuerzo es retirado. Al igual que el comportamiento elástico, en el comportamiento o elemento viscoso tampoco se considera el efecto del tiempo.

Si se conecta en serie un resorte (elemento elástico) con un amortiguador (elemento viscoso) se obtiene un modelo que representa a un fluido viscoelástico, este es el modelo de Maxwell. Si se conectan el elemento viscoso y elástico, pero en paralelo, se obtiene un modelo que representa a un sólido viscoelástico y este modelo recibe el nombre de Kelvin-Voigt. Al combinar los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt en serie

se obtiene el modelo de Burger (Barnes, 2000). Este modelo describe todas las características básicas de interés para estudiar el comportamiento viscoelástico mediante ensayos reológicos. La FIGURA 2.10 ilustra los modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt y Burgers.

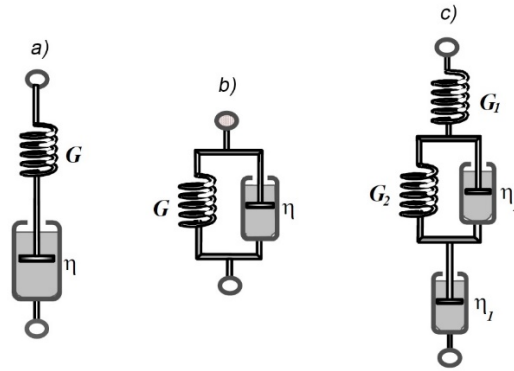


FIGURA 2.10 Modelos mecánicos de Maxwell (a), Kelvin-Voigt (b) y Burgers (c).

2.13. Métodos de pruebas reológicas

Es común categorizar las técnicas reológicas de acuerdo con el tipo de deformación impuesta: compresión, extensión, corte, torsión etc. O por la magnitud de la deformación: pequeñas o grandes. Tradicionalmente (en el estudio de las propiedades de los cereales), las principales técnicas reológicas se dividen en técnicas descriptivas empíricas y mediciones fundamentales (Dobraszczyk et al., 2003).

2.13.1. Pruebas reológicas fundamentales

Las pruebas de fluencia-recuperación, junto con las pruebas dinámicas oscilatorias son las más comunes en los estudios reológicos en cereales. A grandes rasgos, las pruebas de fluencia consisten en aplicar un esfuerzo constante durante un intervalo de tiempo y monitorear la deformación resultante y las pruebas oscilatorias consisten en aplicar un esfuerzo o deformación sinusoidal por ciclos con cierto tiempo y frecuencia (Barnes, 2000; Dobraszczyk et al., 2003).

2.13.2. Pruebas de fluencia-recuperación

La deformación inducida durante las pruebas de fluencia-recuperación es medida después de aplicar y remover un esfuerzo constante en un tiempo predefinido (Deka et al., 2019). En la industria metalúrgica se comenzaron a hacer pruebas con piezas de metal (usualmente pequeñas) que se sometían a un esfuerzo durante tiempos largos (meses o incluso años). Las muestras bajo un esfuerzo constante a largos tiempos continuaron deformándose después de la respuesta elástica inicial. La deformación medida en estas pruebas era tan lenta que recibió el nombre de *creep* (Steffe, 1996) (en inglés significa arrastrarse. El término que se utiliza en español para este fenómeno es *compliance*). La FIGURA 2.11 representa la respuesta ideal de un sólido elástico, fluido viscoso y un material viscoelástico en las pruebas de fluencia-recuperación (Barnes, 2000; Steffe, 1996).

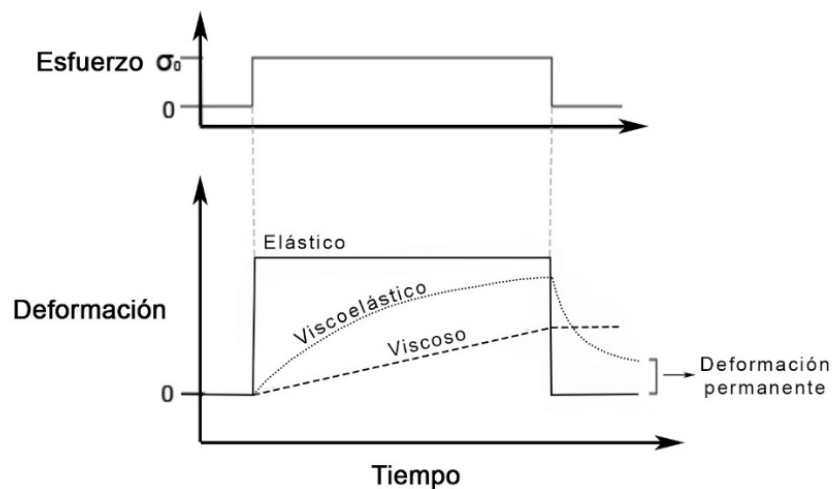


FIGURA 2.11 Curvas de fluencia-recuperación para el comportamiento de sólidos elásticos, fluidos viscosos Newtonianos y materiales viscoelásticos.

En las pruebas de fluencia, un sólido elástico simple muestra una respuesta inmediata a una deformación constante. Por otro lado, un fluido viscoso ideal (líquido newtoniano)

simple muestra una deformación que incrementa continuamente. Y los materiales viscoelásticos muestran una respuesta no lineal a la deformación y debido a su característica de su estructura de acumular energía, muestra una deformación permanente menor a la deformación total aplicada a la muestra (Barnes, 2000; Steffe, 1996). Los resultados de la prueba de fluencia-recuperación se expresan en términos de complianza (Ec. 2.5).

$$J(t) = \frac{\gamma}{\sigma} \quad 2.5$$

Donde J es la complianza, t es el tiempo, γ la deformación y σ el esfuerzo (Steffe, 1996).

En una curva típica de fluencia se puede estudiar el comportamiento viscoelástico de los alimentos usando modelos análogos mecánicos (sección 2.11.7) que combinan elementos elásticos de Hook ideales (resortes) y elementos fluidos ideales (amortiguadores) como el modelo de Burgers. La FIGURA 2.12 representa de forma simple el modelo de Burgers en una curva típica de fluencia.

El modelo inicia con una respuesta elástica (J_0), continua con una parte llamada respuesta elástica tardía o retardada (J_1) donde la velocidad de deformación se hace cada vez más lenta, terminando en deformaciones tan lentas que son casi estáticas (Barnes, 2000) en tiempos largos (viscosidad en estado estacionario η_0).

Si durante la prueba de fluencia la analizáramos con el modelo de Maxwell, el comportamiento se definiría con la ecuación 6:

$$\gamma = \sigma \left(\frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} \right) \quad 2.6$$

Donde a tiempos muy cortos se caracteriza por una respuesta elástica inmediata, donde la deformación (γ) es igual al esfuerzo (σ) sobre el módulo de elasticidad (G) ($\gamma = \sigma/G$) y a tiempos muy largos, cuando $t \gg \lambda$, por un comportamiento viscoso,

donde la deformación es igual al producto del esfuerzo por el cociente del tiempo (t) entre la viscosidad (η) ($\gamma = \sigma(t/\eta)$) (en el modelo de Maxwell λ es el tiempo de relajación ($\lambda = \eta/G$) (Barnes, 2000).

Si, por otro lado, analizamos la curva con el modelo de Kelvin-Voigt, la deformación gradualmente se vuelve constante, tal como lo describe la ecuación 2.7:

$$\gamma = \frac{\sigma}{G} \left(1 - e^{-t/\lambda}\right) \quad 2.7$$

Donde γ es la deformación, σ es el esfuerzo, G es el módulo elástico, t es el tiempo y λ es el tiempo de retardación o tiempo retardado cuyo valor está dado por $\lambda = \eta/G$ (Barnes, 2000) y es el tiempo que tarda la deformación en alcanzar el 63.2 % de su valor final (Steffe, 1996). Si ahora analizamos la curva con el modelo de Burgers dado por la ecuación 2.8

$$\gamma = \sigma \left(\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \left(1 - e^{-t/\lambda_1}\right) + \frac{t}{\eta_0} \right) \quad 2.8$$

Donde G_0 es el elemento puramente elástico, G_1 es la respuesta elástica tardía del elemento de Kelvin-Voigt, λ_1 es el tiempo de retardación dado por $\lambda_1 = \eta_1/G_1$, (donde η_1 es el coeficiente de viscosidad del elemento de Kelvin-Voigt,) t es el tiempo y η_0 es la viscosidad en estado estacionario. El elemento elástico dado por G_0 se deforma instantáneamente, mientras que el elemento viscoso η_0 comenzará a deformarse a la velocidad esperada. Sin embargo, el elemento elástico de Kelvin-Voigt (G_1) no puede responder inmediatamente ya que se retrasa o retarda por su elemento viscoso. De todas formas, G_1 comienza a deformarse y eventualmente alcanza su deformación esperada de estado estacionario (Barnes, 2000).

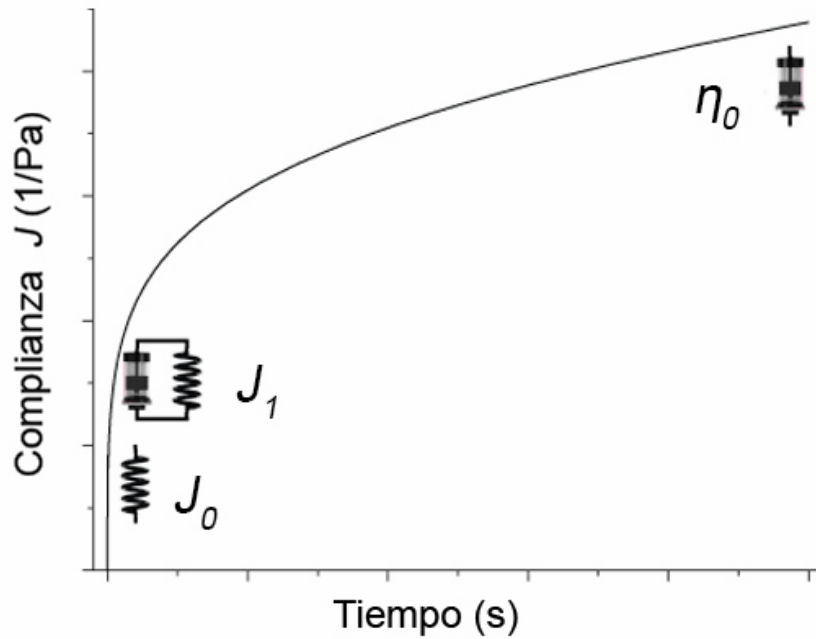


FIGURA 2.12 Elementos del modelo de Burgers en una curva típica de fluencia.

Cualquier número extra de elementos de Kelvin-Voigt se puede añadir en serie en el modelo de Burgers, y cada elemento añade un término extra a la ecuación de la fase de fluencia para que las curvas de fluencia puedan ser descritas de manera practica desde su respuesta elástica instantánea G_0 , hasta su viscosidad en estado estacionario η_0 (Barnes, 2000)(Ec. 2.9).

$$\frac{\gamma(t)}{\sigma} = J(t) = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) + \frac{1}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}\right) + (\dots) \dots \frac{t}{\eta_0} \quad 2.9$$

Donde $\lambda_1 = \eta_1/G_1$ y $\lambda_2 = \eta_2/G_2$; γ es deformación, t es tiempo; σ_0 es el esfuerzo constante aplicado; G_0 es el módulo de elasticidad instantáneo o modulo a tiempo 0; η_0 es la viscosidad en estado estacionario, G_1 y G_2 son los módulos de elasticidad del primer y segundo elemento de Kelvin-Voigt, respectivamente; λ_1 y λ_2 son el primer y segundo tiempo de retardación respectivamente; y η_1 y η_2 son los coeficientes de

viscosidad del primer y segundo elemento elástico retardado, respectivamente. La fase de fluencia se representa con la Ec. 2.10 la cual también se conoce como la ecuación generalizada del modelo de Kelvin-Voigt de 6 elementos en términos de complianza (Hernández-Estrada et al., 2017; Ronda et al., 2017; Sanz et al., 2017).

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = J_0 + J_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) + J_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}\right) + \frac{t}{\eta_0} \quad 2.10$$

Donde $J(t)$ es la complianza en función del tiempo; J_0 es la complianza instantánea o complianza en el tiempo 0; J_1 y J_2 son la complianza en el primer y segundo elemento elástico retardado, respectivamente.

La fase de recuperación, se representa con una ecuación similar para $Jr(t)$, solo que con 5 elementos ya que la fase de recuperación no tiene el elemento puramente viscoso (Hernández-Estrada et al., 2017).

$$Jr(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = Jr_0 + Jr_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda r_1}}\right) + Jr_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda r_2}}\right) \quad 2.11$$

Donde $Jr(t)$ es la complianza (1/Pa) en la fase de recuperación, Jr_0 es la complianza a tiempo 0 en la fase de recuperación, Jr_1 , Jr_2 son las complianzas en el primer y segundo tiempo de retardación y λr_1 , λr_2 son el primer y segundo tiempo de retardación para el primer y segundo elemento de Kelvin-Voigt durante la fase de recuperación respectivamente (Hernández-Estrada et al., 2017).

En la prueba de fluencia-recuperación, los parámetros obtenidos aportan información valiosa del comportamiento viscoelástico. Estas pruebas han sido ampliamente utilizadas. Por ejemplo: se han utilizado para medir el impacto de fibra dietética en el comportamiento viscoelástico de masas formuladas con harina de arroz (Ronda et al., 2013); para estudiar el efecto de las subunidades de glutenina de alto peso molecular en el gluten y su relación con la calidad del pan (Hernández-Estrada et al., 2017); para determinar las propiedades reológicas y funcionales de harina de frijol rojo y su efecto

en las propiedades viscoelásticas de batidos sin gluten para cupcakes (Chompoorat, Rayas-Duarte, et al., 2018) entre otros.

2.13.3. Pruebas oscilatorias

En las pruebas oscilatorias, la muestra se somete a una deformación o esfuerzo (controlado) el cual varía armónicamente con el tiempo y se aplica de forma sinusoidal. Esta prueba es ideal para la caracterización de fluidos viscoelásticos, pues con la información se puede deducir el comportamiento (sólido o viscoso) de los mismos (Deka et al., 2019). Al igual que una prueba de fluencia-recuperación se puede aplicar en función del tiempo, una prueba oscilatoria se puede aplicar en función de la frecuencia. Podría decirse que son análogos. Pues las observaciones en tiempos cortos de las pruebas de fluencia corresponden a frecuencias altas en pruebas oscilatorias y tiempos largos en pruebas de fluencia a frecuencias bajas en pruebas oscilatorias. Donde tiempos cortos y altas frecuencias predomina el comportamiento elástico y en tiempos largos y bajas frecuencias el comportamiento viscoso (Barnes, 2000).

Si la muestra a medir fuese un sólido ideal (que obedece la ley de Hooke), el esfuerzo resultante se representaría como en la ecuación 2.12:

$$\sigma = G\gamma = G\gamma_0 \sin \omega t = \sigma_0 \sin \omega t \quad 2.12$$

Donde γ_0 es la deformación máxima, ω es la frecuencia angular y G es el módulo de elasticidad y t el tiempo. El esfuerzo medido es también una función sinusoidal, en fase con la deformación de oscilación y representa al comportamiento elástico; σ_0 es el esfuerzo máximo o amplitud de la oscilación de esfuerzo (Sanz et al., 2017).

Por otro lado, en un fluido viscoso ideal (que obedece la ley de Newton), el esfuerzo resultante se representa por la ecuación 2.13.

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \gamma_0 \omega \cos \omega t = \sigma_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad 2.13$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la razón de deformación (o velocidad de deformación) y η es la viscosidad. Lo que sugiere que el esfuerzo resultante se encuentra 90 grados desfasado con la oscilación que corresponde a la deformación y representa al comportamiento viscoso (Sanz et al., 2017). Para comportamientos viscoelásticos la oscilación de esfuerzo presenta un ángulo de fase, δ , llamado ángulo de pérdida, con la oscilación de deformación, el cual varía entre 0 y 90 grados y se representa por la ecuación 2.14:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad 2.14$$

Donde G' es el módulo de almacenamiento, el cual está relacionado con el comportamiento sólido elástico (relacionado a la energía almacenada en el sistema) y G'' es el módulo de pérdida, el cual está relacionado con el comportamiento líquido viscoso, en el cual sucede la disipación de energía. Los módulos G' y G'' se definen con las ecuaciones 2.14 y 2.15 respectivamente (Sanz et al., 2017).

$$G' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) \cos \delta \quad 2.15$$

$$G'' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) \sin \delta \quad 2.16$$

Donde σ_0 es el esfuerzo de corte y γ_0 es la deformación de corte. Bajos valores de $\tan \delta$ corresponden a una sustancia que tiende a un comportamiento elástico (mayores valores de G'). Por lo que, $\tan \delta$ es un indicador de la organización estructural e interacción molecular en el material (Sanz et al., 2017). Los resultados son muy sensibles a la composición química y estructura física de la muestra por lo que tiene múltiples aplicaciones como la evaluación de la fuerza de un gel, el monitoreo de la

gelatinización del almidón, estudio del fenómeno de transición vítrea, la coagulación proteica, entre otros (Steffe, 1996). Estas pruebas presentan ciertas desventajas con respecto a las masas para pan. Las condiciones de deformación son generalmente inapropiadas ya que, según Dobraszczyk et al. (2003), las masas para pan se someten a deformaciones diferentes durante el amasado y horneado. Estas pruebas usualmente operan en la región lineal viscoelástica a pequeñas deformaciones y las masas para pan experimentan en situaciones prácticas grandes deformaciones, de manera que deformaciones pequeñas no son útiles para predecir la calidad de los productos horneados (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Los espectros mecánicos de pruebas oscilatorias realizadas en masas para pan y batidos para productos panificados han sido ajustados con éxito por varios autores a la ley de potencia (Ec. 2.17 y 2.18).

$$G'(\omega) = G'_{\omega_1} \cdot \omega^a \quad 2.17$$

$$G''(\omega) = G''_{\omega_1} \cdot \omega^b \quad 2.18$$

Donde G'_{ω_1} , G''_{ω_1} son los coeficientes que representan los módulos elásticos y viscosos a 1 Hz de frecuencia respectivamente. Los exponentes a y b cuantifican el grado de dependencia con la frecuencia oscilatoria (Kirbaş et al., 2019). Las pruebas oscilatorias se han usado ampliamente para estudiar la organización estructural e interacción molecular de nuevas formulaciones de masa para pan y batidos para productos panificados. Ronda et al. (2013) estudió el impacto de la incorporación de hidroxipropilmetilcelulosa y β -glucano de cebada sobre las propiedades reológicas de formulaciones para pan libres de gluten a base de harina de arroz. Ellos reportan los efectos sinérgicos y antagonistas de la adición de fibras mediante su estudio con pruebas de fluencia-recuperación y dinámicas oscilatorias (barridos de frecuencias). Reportan que prevalece un comportamiento elástico en los barridos de frecuencia (0.01 a 10 Hz) y que ambos módulos incrementan de valor (G' y G'') al aumentar la

frecuencia oscilatoria. Al ajustar los datos experimentales a la ley de potencia, no observaron diferencia significativa en los exponentes “a”, el cual determina la dependencia que presenta el material a la frecuencia oscilatoria; Kirbaş et al. (2019) estudian el efecto de la adición de polvo de cascara de manzana, naranja y zanahoria como fuente de fibra en las propiedades reológicas de batidos para pasteles. Ellos realizaron pruebas oscilatorias como barridos de esfuerzo y frecuencia y lo ajustaron a la ley de potencia (Ec. 2.17 y 2.18). Encontraron que el modelo de la ley de potencia explica el comportamiento de flujo de todas las formulaciones de masa como un “gel suave”. El módulo elástico (G') y el módulo viscoso (G'') de la masa aumentaron significativamente con el aumento de la cantidad de polvo de las fuentes de fibra. Además, la adición de polvo de las fuentes de fibra aumentó la dureza de la miga y disminuyó el volumen específico de los pasteles; Bozdogan et al. (2019) investigaron el efecto de la adición de harina de quinoa en las propiedades de batidos para pasteles libres de gluten. El objetivo de su estudio fue determinar la influencia de sustituir harina de arroz y almidón de papa con harina de quinoa sobre las propiedades reológicas y físicas de los batidos para pasteles. Su análisis reológico mostró que el modelo de la ley de potencia es el modelo más adecuado para representar el comportamiento de flujo de los batidos para pasteles ya que exhibieron un comportamiento sólido con la excepción de la muestra sin harina de quinoa. También el módulo de elasticidad G' y el módulo de viscosidad G'' de las masas aumentaron con la sustitución de la harina de quinoa en el rango de frecuencia de 0.01 - 10 Hz predominando un comportamiento elástico ($G' > G''$). En general reportan que el volumen de los pasteles con harina de quinoa incrementó y la firmeza de la miga del pastel disminuyó;

2.13.4. Prueba de relajación de esfuerzos

La prueba de relajación de esfuerzos, al igual que las pruebas de fluencia, son dependientes del tiempo. En estas pruebas una deformación instantánea se aplica a la muestra y se mide el cambio en el esfuerzo en función del tiempo. Las pruebas de relajación de esfuerzos se pueden realizar en texturómetros (aplicando el esfuerzo en compresión) para materiales sólidos o en reómetros para materiales líquidos y geles

(Deka et al., 2019). Según la naturaleza de los materiales: Los sólidos ideales tienen un comportamiento elástico y no presentan relajación de esfuerzos; los fluidos ideales se relajarán instantáneamente y los materiales viscoelásticos se relajarán gradualmente, dependiendo de la estructura molecular del material. El esfuerzo en los sólidos viscoelásticos se degrada a un esfuerzo de equilibrio, mientras que el esfuerzo residual en los líquidos viscoelásticos tiende a cero (Rodríguez-Sandoval et al., 2009).

3. JUSTIFICACIÓN

La producción de café genera una gran cantidad de desechos que son un foco de contaminación al ambiente.

Los productos panificados son aceptados por el consumidor y generalmente se elaboran mezclas con distintas harinas refinadas.

La pulpa de café contiene fibra, minerales y compuestos fenólicos que podrían ser aprovechados para fortalecer los productos de panadería deficientes en estos nutrimentos.

El gluten determina gran parte de la calidad de pan al tener efecto en la cohesividad, viscosidad, elasticidad y absorción de agua de la masa.

Se ha reportado que la fibra dietética interfiere en la formación de la red de gluten, afectando las características propias de los productos panificados.

Las pruebas y técnicas reológicas son una excelente herramienta para caracterizar el efecto de nuevos ingredientes en la estructura en gluten, la masa para pan y batidos para productos panificados.

En la búsqueda realizada no se encontró evidencia científica del uso de la pulpa de café como ingrediente en productos panificados. Por lo que en este proyecto se exploró el efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas y parámetros de panificación en masa, gluten extraído y batidos para muffins, sin la utilización de aditivos.

4. HIPÓTESIS

Es posible desarrollar productos panificados a partir de la mezcla de harina de trigo y pulpa de café con características tecnológicas y sensoriales aceptables para el consumidor.

5. OBJETIVOS

5.14. Objetivo general

Evaluar el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por polvo de pulpa de café en la viscoelasticidad de las masas y batidos y parámetros de panificación en pan de caja y *muffins*.

5.15. . Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de la adición de pulpa de café en el comportamiento viscoelástico de las formulaciones de masa para pan.
2. Evaluar el efecto de la adición de pulpa de café en el comportamiento viscoelástico de las formulaciones de batidos para *muffins*.
3. Evaluar los efectos de la adición de pulpa de café en los parámetros de panificación de la elaboración de pan.
4. Estudiar los efectos de la adición de pulpa de café en los parámetros de panificación de la elaboración de muffins de chocolate.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

En la FIGURA 6.1 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento para la realización de este trabajo:

1. Obtención de la pulpa de café de la especie *Coffea arabica* L por parte de la compañía grupo Techver Veracruz, México S.A. DE C.V.
 - 1.1. Se realizaron los ensayos bromatológicos de la pulpa de café, en la cual se determinaron: humedad, proteínas, cenizas, lípidos y fibra.
 - 1.2. Se realizó la cuantificación de cafeína en la pulpa de café.
2. Se realizó una molturación y tamizado
3. La harina de trigo se obtuvo de "Shawnee Milling Company" (Shawnee, OK, USA).
 - 3.1. Se determinó humedad de la harina, y los demás datos bromatológicos (Cenizas, proteína, lípidos y fibra) los proporcionó la empresa "Shawnee Milling Company".
4. Se estudió el efecto de la sustitución de PPC en las propiedades de mezcla y absorción de las mezclas de harina (farinografía), utilizando un farinógrafo y se registraron las siguientes variables de respuesta a una consistencia de 500 Unidades Brabender: tiempo de desarrollo, tiempo de estabilidad, absorción de agua, tiempo de ruptura e índice de tolerancia al amasado (descritas en la sección 2.10.2).
5. Para la elaboración de masa se tomó en cuenta la absorción de agua a 500 Unidades Brabender que se registró en el farinógrafo.
 - 5.1. A las masas con diferentes niveles de sustitución de PPC se estudiaron con pruebas de fluencia-recuperación donde después de ajustar los datos experimentales al modelo de Kelvin-Voigt, se obtuvieron las siguientes variables de respuesta para la fase de fluencia: Complianza a tiempo 0 (J_0); complianzas tardías (J_1, J_2); tiempos de retardación (λ_1, λ_2), Módulo elástico inmediato (G_0); Módulos elásticos retardados (G_1, G_2); Viscosidad en estado estacionario (η_0); coeficientes de viscosidad para el primer y segundo elemento

de Kelvin-Voigt (η_1, η_2); y porcentaje de deformación máxima. Y para la fase de recuperación: Complianza a tiempo 0 (J_{r0}); complianzas tardías (J_{r1}, J_{r2}); tiempos de retardación ($\lambda_{r1}, \lambda_{r2}$), Módulo elástico inmediato (Gr_0); Módulos elásticos retardados (Gr_1, Gr_2) y porcentaje de recuperación.

6. Se extrajo el gluten de masas preparadas con 10 g de harina al cual se estudió con:
 - 6.1. Pruebas de compresión-recuperación de la cual se registró como variable de respuesta el porcentaje de recuperación elástica (RE).
 - 6.2. Y pruebas de fluencia-recuperación, cuyas variables de respuesta son las mismas que las mencionadas para masa.
7. La preparación de batidos para muffins se realizó en una mezcladora de 10 g de capacidad adaptada de un mixógrafo y se estudió mediante:
 - 7.1. Pruebas dinámicas oscilatorias de barridos de frecuencia, donde se registraron las siguientes variables de respuesta: Modulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' , modulo complejo G^* y ángulo de fase $\tan \delta$.
 - 7.2. Pruebas dinámicas oscilatorias de rampas de temperatura, donde se registró la evolución del módulo complejo G^* en función de la temperatura y se determinó la temperatura de gelatinización (T_0) a partir de las curvas del módulo de almacenamiento G' .

Las matrices alimentarias estudiadas (pan y muffins) tienen procesos y características distintas: en el pan suceden interacciones gluten-almidón-agua y un proceso de fermentación que determinan la calidad final del producto. El gluten es un entramado proteico complejo que determina en gran medida el comportamiento viscoelástico de la masa que se puede aislar después de la preparación mediante un lavado con agua hasta diluir y retirar por completo el almidón. En la revisión de la bibliografía, se encontraron trabajos de adición de fibra de diferentes fuentes: Bonnard-Ducasse et al. (2010); Han et al. (2019); Nawrocka et al. (2017); Wirkijowska et al. (2020) entre otras que señalan que la adicción de fibra afecta la formación de gluten en la masa. Dado que la pulpa de café es alta en fibra, se decidió estudiar el gluten formado en las masas con PPC. Por otro lado, es importante mencionar que la aproximación desde el punto de vista reológico se estudió de forma distinta para cada matriz alimentaria: para

masa y gluten se realizaron pruebas de fluencia-recuperación, para gluten se realizaron también pruebas de deformación biaxial compresión-recuperación y para los batidos para muffins se realizaron pruebas dinámicas oscilatorias de barridos de frecuencia y rampas de temperatura. Esto se decidió debido al tipo de deformación que se ha utilizado para estudiar estas matrices, deformaciones cortas y largas para masa y gluten (Chompoorat, Hernández-Estrada, et al., 2018; Hernández-Estrada et al., 2017; Huang et al., 2020; Mironeasa, S. et al., 2019; Nawrocka et al., 2017; Ronda et al., 2013; Rosas-Sanchez et al., 2021; Zhou et al., 2021) y deformaciones cortas para batidos (Aydogdu et al., 2018; Bozdogan et al., 2019; Chompoorat et al., 2020; Chompoorat, Rayas-Duarte, et al., 2018; Hesso et al., 2015; Kirbaş et al., 2019; Saghafi et al., 2019). Finalmente, se evaluaron los parámetros de calidad de panificación que comúnmente se utilizan (volumen, altura, peso y firmeza de la miga) y se correlacionaron con los parámetros obtenidos de las pruebas de reológicas.

8. Se realizó un horneado de pan, siguiendo el método estándar de la AACCI y se registró: Volumen, altura y peso.

8.1. Los panes se guardaron en bolsas Ziploc para medir la firmeza de la miga en los días 1, 4 y 7, siguiendo la metodología propuesta por la AACCI y se registró como variable de respuesta: la fuerza necesaria en N para deformar la miga de pan en un 25 %.

9. Se realizó un horneado de muffins. Debido a que no hay una metodología estándar para la elaboración de muffins, se procuró establecer las acciones a seguir para la preparación de muffins: Preparación del batido en una mezcladora de 10 g adaptada de un mixógrafo, distribución de 50 ± 0.1 g de batido en cada celda de la charola para muffins (6 celdas por charola), horneado, enfriado y almacenado.

9.1. Se evaluó la firmeza de la miga del muffin con la metodología propuesta por la AIB la cual es una adaptación del método de la AACCI 74-09 para miga de pan y se registró como variable de respuesta la fuerza en N necesaria para deformar la miga del muffin 7 mm de distancia

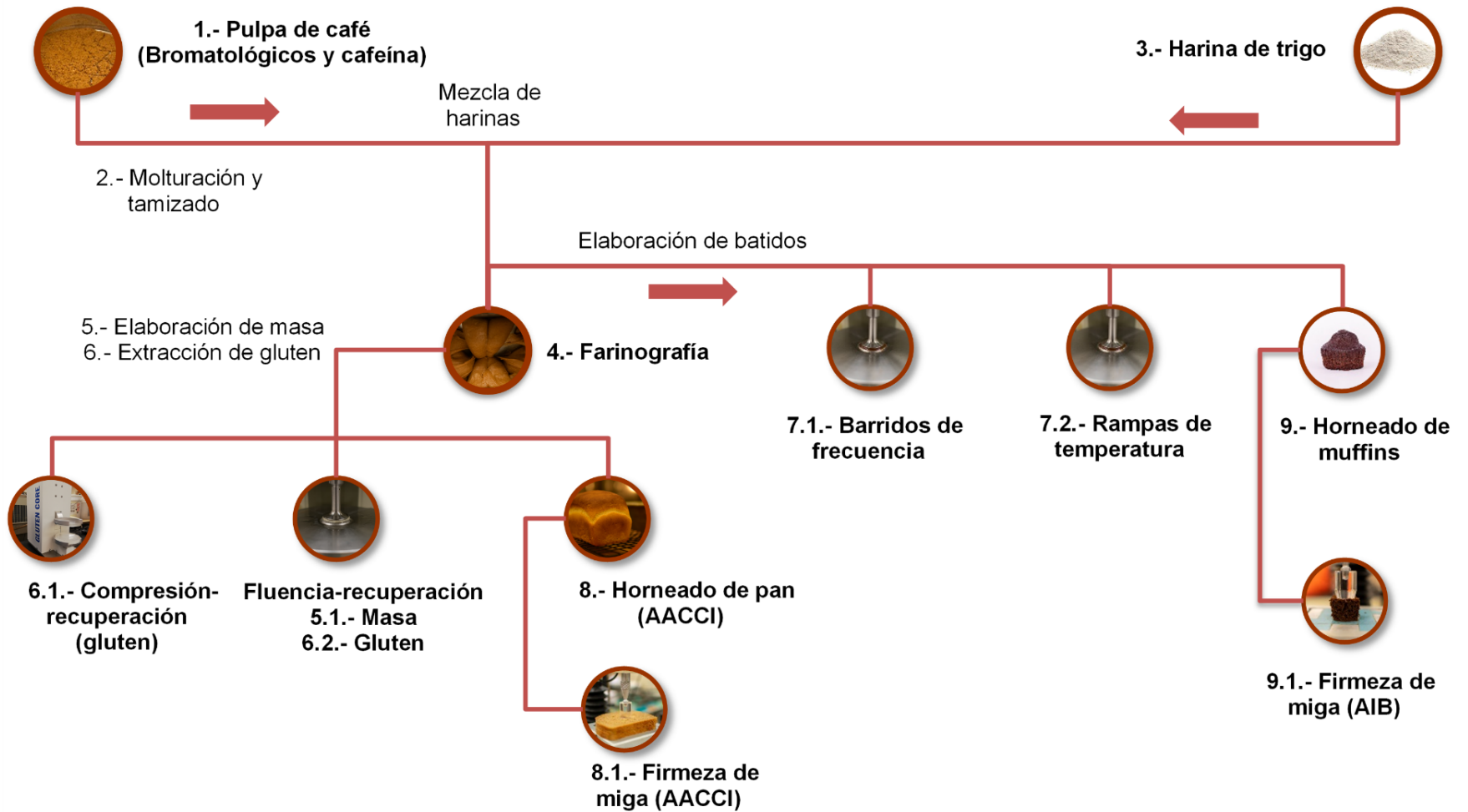


FIGURA 6.1 Diagrama de flujo de experimentación.

Se utilizaron diseños completamente al azar en dos matrices alimentarias (Pan de caja y muffins de chocolate) con 3 niveles de sustitución de harina de trigo (HT) por PPC. Después de realizar experimentos preliminares, se decidió trabajar con sustituciones de PPC de 1.25, 2.5 y 5 % (base húmeda) para la preparación de la masa, debido a que una sustitución mayor a 5 % afectaba notablemente al pan en sus cualidades sensoriales y volumen. Para los batidos se utilizaron sustituciones de 10, 20 y 40 % (base húmeda) debido a que sustituciones mayores a 40 % afectaba de forma notable las características sensoriales de los muffins.

TABLA 6.1 Niveles de sustitución de harina de trigo por polvo de pulpa de café*

Sustituciones para pan de caja			Sustituciones para muffins de chocolate		
Tratamientos (g/100 g)	PPC (g/100 g)	HT (g/100 g)	Tratamiento (g/100 g)	PC (g/100 g)	HT (g/100 g)
0	0	100	0	0	100
1.25	1.25	99.85	10	10	90
2.5	2.5	97.5	20	20	80
5	5	95	40	40	60

*PPC= Polvo de pulpa de café; HT= Harina de trigo

6.1. Material de análisis

El PPC, de nombre comercial Pulphari, fue descafeinado y proporcionado por la empresa Techver desde la región de Xico en Veracruz México. El PPC fue molido y tamizado (número de malla 100). Posteriormente, se almacenó en contenedores cerrados a temperatura ambiente hasta su análisis. Se utilizó harina de trigo refinada y obtenida de "Shawnee Milling Company" (Shawnee, OK, USA) para la elaboración de pan, y harina comercial "all purpose" de la marca Gold Medal Hotel & Restaurant de la empresa General Mills para la elaboración de muffins.

6.2. Análisis de harina y PPC

El PPC y la harina de trigo se evaluaron de acuerdo con los métodos oficiales de la AOAC (2005) para proteína (920.87), humedad (925.10) cenizas (923.03) y lípidos (945.16). El contenido de fibra dietética soluble e insoluble fueron evaluados con el método oficial de la AACCI 32-07.01 y de la AOAC 991.43. El PPC fue triturado con un molino de impacto de la marca Blendtech®, (Kitchen Mill, Blendtech, Orem, UT, USA). Para la granulometría se utilizó el método de la AACCI 66-20.1 para solo seleccionar las partículas menores a 150 μm . Se prepararon mezclas de harina con PPC y se determinó su comportamiento reológico con el método de la AACCI 54-21.02 para obtener, porcentaje de absorción de agua a 500 UB de consistencia, tiempo de desarrollo, tiempo de estabilidad, y índice de tolerancia al mezclado durante la incorporación de agua y mezclado usando un Farinógrafo-E (C.W. Brabender Instruments, South Hackensack, NJ, USA).

6.2.1. Concentración de cafeína

La concentración de cafeína se determinó mediante la metodología que describe la ISO (2008) 20481 para la extracción de cafeína en café verde previamente molido y tamizado con una malla de orificio de 630 μm . Se pesó 1 ± 0.001 g de muestra para posteriormente depositarla en un matraz volumétrico de 250 ml en donde se le añadieron 200 ml de agua. Después, se calentó a baño maría hasta 90 °C durante 20 min mezclando intermitentemente. Para terminar, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se diluyó con 250 ml de agua, la solución se dejó sedimentar para posteriormente filtrarla (filtro de 0.45 μm) dejando perder los primeros mililitros. La cafeína fue cuantificada por HPLC. Para la fase móvil se dispuso de 24 % y 76 % v/v de metanol grado HPLC (MeOH) y agua, a un flujo de 1.0 ml/min con una columna RP-C18 con elución isocrática, longitud mínima de 125 mm y un detector UV a una longitud de onda de 272 nm.

6.3. Análisis reológico

Después de realizar las pruebas de farinografía y analizar las propiedades de mezcla y absorción de agua de las mezclas de harina de trigo con PPC a una consistencia de 500 UB, se realizaron pruebas de compresión-recuperación (deformación biaxial para gluten), de fluencia-recuperación (para gluten y masa), barridos de frecuencia oscilatoria (para gluten, masa y batido para muffins) y barridos de temperatura (solo para batidos para muffins).

6.3.1. Preparación de las muestras para las pruebas reológicas

Las muestras de gluten se prepararon siguiendo el método de la AACCI 38.12.02, lo cual lleva a una extracción utilizando un Glutomatic System (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) modelo 2200 y una solución salina de 20 g NaCl/L. El gluten húmedo estaba en su capacidad intrínseca de retención de agua como reporta Chompoorat, Hernández-Estrada, et al. (2018). Las muestras de masa se prepararon a absorción de agua constante de acuerdo con el valor obtenido de los tratamientos testigos utilizando el farinógrafo. Las muestras se prepararon en una amasadora de 10 g modificada de un mixógrafo (National Manufacturing, Lincoln, NE, USA) durante 4 minutos. Las muestras de batidos para muffins se prepararon utilizando la amasadora modificada del mixógrafo. Primero se incorporaron los ingredientes en polvo (sin agregar el polvo para hornear y el bicarbonato de sodio) y posteriormente se agregaron los ingredientes líquidos y se mezclaron durante 2 min.

6.3.2. Pruebas de compresión-recuperación

Las muestras de gluten fueron preparadas acorde a lo reportado por Chompoorat, Hernández-Estrada, et al. (2018), usando una centrífuga Perten 2015 a 2430 x g durante 1 minuto (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden). La prueba de compresión-recuperación basada en una deformación biaxial se llevó a cabo con un Gluten CORE Analyzer (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) con las siguientes condiciones: velocidad de arranque 20 mm/s, velocidad de compresión 4 mm/s, fuerza

objetivo de 0.5 N, fuerza objetivo de compresión 8 N, tiempo de compresión de 5 s, fuerza para recuperación de 0.2 N y un tiempo de recuperación de 55 s. La recuperación del gluten se reporta en porcentaje de recuperación.

6.3.3. Cargas de muestra de masa y gluten para pruebas reológicas

El gluten extraído y las masas preparadas con diferentes niveles de sustitución de PPC fueron sometidas a un tiempo de relajación de 40 minutos bajo una pesa de 2.5 kg, con una distancia entre platos de 2.5 mm a temperatura ambiente acorde a lo reportado por Hernández-Estrada et al. (2017). Posteriormente, se recortaron discos de gluten y masa de 25 mm de diámetro para ser colocados en un reómetro AR1000 (TA Instruments, New Castle, DE). Se utilizó una geometría de platos paralelos con una distancia entre platos de 2.5 mm a 25 °C. El diámetro de los discos de gluten y masa se ajustaron al diámetro de la geometría y los bordes fueron cubiertos con aceite mineral para evitar la pérdida de humedad.

6.3.4. Condiciones para pruebas de fluencia-recuperación en masa y gluten

Para medir la deformación de las muestras se aplicó un esfuerzo de corte constante de 100 Pa durante 100 segundos para la fase de fluencia. Posteriormente se retiró el esfuerzo y se midió la fase de recuperación de la muestra durante 100 segundos. Se realizaron 5 repeticiones por nivel de sustitución (0, 1.25, 2.5 y 5 g de PPC/100 g de harina de trigo) (Hernández-Estrada et al., 2017)

6.3.5. Modelando las propiedades viscoelásticas de la masa y el gluten

Se utilizó un modelo de 6 elementos de Kelvin-Voigt, compuesto de conceptos de resortes (cuerpos elásticos) y amortiguadores (cuerpos viscosos) para estudiar el comportamiento viscoelástico de las masas y gluten y es representado por la ecuación Ec. 2.10 para la fase de fluencia y por la ecuación 2.11 para la fase de recuperación. Las curvas típicas se analizaron mediante una regresión no lineal, utilizando el

software Origin Pro-9.1 (OriginLab, Northampton, MA, EE. UU.) siguiendo la metodología reportada en Hernández-Estrada et al. (2017).

6.3.6. Condiciones para pruebas de barrido de frecuencia y temperatura en batidos para muffins

Las muestras de batidos con diferentes niveles de sustitución de PPC (10, 20, y 40 g de PPC) se prepararon como se indicó en la sección 6.4.1. Las pruebas de barrido de frecuencia se realizaron con una distancia entre platos de 1 mm, un esfuerzo de 0.5 Pa, con frecuencias de 0.1 a 10 Hz y a temperatura constante de 25 °C. Se registraron los valores de los módulos de almacenamiento y de pérdida (G' y G'' respectivamente) y el valor del ángulo de fase $\tan \delta$ (G''/G'). Los resultados de tres repeticiones se ajustaron al modelo de ley de potencia (Ec. 19 y 20) y se registraron las medias de las constantes y exponentes obtenidas ($G'_{\omega 1}$, $G''_{\omega 1}$, a y b).

Para los barridos de temperatura se utilizó una distancia entre platos de 1 mm, un esfuerzo de 0.5 Pa, con una frecuencia constante a 1 Hz y escalando la temperatura de 20 - 90 °C a 2 °C/min.

6.4. Evaluación de calidad de pan y firmeza de la miga

Se llevó a cabo una prueba de horneado de pan optimizada para evaluar la calidad de la harina de trigo siguiendo el método de la AACCI 10-10.03 con panes de 1 libra. La altura, el peso y el volumen de la barra de pan se midieron 1 hora después de la cocción. El volumen se midió mediante el desplazamiento de las semillas de colza siguiendo el método de la AACCI 10-05.01. La firmeza de la miga de pan se midió al primer, cuarto y séptimo día de almacenamiento a temperatura ambiente (25 ° C) de acuerdo con el Método de la AACCI 74-09.01 usando un 25 % de compresión en altura en dos rebanadas de pan de 12.7 mm de espesor. Se hicieron dos barras de pan por tratamiento y día (24 barras en total) y se realizaron seis mediciones por barra de pan.

6.5. Evaluación de la calidad de muffins y firmeza de la miga

Para la preparación de muffins se utilizó una receta comercial: harina (120 g), cocoa (28.4 g), azúcar (132.4 g), polvo para hornear (2 g), bicarbonato de sodio (2 g), sal (2.8 g), huevo en polvo (13.9 g), leche en polvo (11.3 g), extracto de vainilla (5 ml), vinagre (5 ml), aceite vegetal (30.2 ml) y agua (200 ml). La altura, peso y volumen de los muffins se midieron 1 hora después de su preparación. El volumen se midió mediante el desplazamiento de las semillas de colza basado en el método de la AACCI 10-05.01. La firmeza de la miga de los muffins se registró los días 1, 4 y 7 con el método de la AIB (2019) B974A-GB.

6.6. Análisis estadístico

Las curvas de fluencia-recuperación y los espectros mecánicos de los barridos de frecuencia se ajustaron con el software Origin Pro-9.1 (OriginLab, Northampton, MA, EE. UU.) Utilizando análisis de regresión no lineal. Con el software JMP Pro-14.0.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.), los coeficientes de regresión fueron analizados por una comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), además de evaluar las correlaciones de Pearson de los parámetros obtenidos de reología con métodos tradicionales.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1. Análisis proximales y de contenido de cafeína

La TABLA 7.1 contiene los análisis proximales y análisis de cafeína de la harina de trigo y del PPC. El contenido de cafeína en PPC es de 0.04 %, y el contenido total de fibra es de 44 % (10 % de fibra soluble y 34 % de fibra insoluble), el cual es 19 veces mayor que el contenido de fibra en el trigo. La sustitución de harina de trigo por PPC aumentó significativamente el contenido de fibra (en 22, 44 y 89 %) y cenizas (en 3.6, 7.1 y 14.3 %) en los niveles 1.25, 2.5 y 5 % de sustitución respectivamente, comparados con el nivel testigo (Rosas-Sanchez et al., 2021).

TABLA 7.1 Análisis proximales y de cafeína del polvo de pulpa de café (PPC) y harina de trigo (HT)

Compuesto	PPC (g/100 g)	HT (g/100 g)
Humedad	6.1 ± 0.0	12.6
Proteína	9.7 ± 0.1	11.7
Fibra dietética	44.5 ± 0.6	2.37
Ceniza	4.2 ± 0.1	1.09
Lípidos	1.5 ± 0.0	<1.0
Cafeína	0.04 ± 0.0	n. a.
Carbohidratos totales	78.7	73.5

*Los carbohidratos totales fueron calculados por diferencia. n. a.= no analizado.

7.2. Granulometría

Se realizó granulometría con el método de la AACCI 60-20.01 para determinar el tamaño de partícula del PPC. En la TABLA 7.2 se muestra la cantidad de pulpa de café que pudo atravesar las aperturas de los números de tamiz correspondientes.

Debido a que el tamaño de partícula era superior a la apertura de 150 µm, se decidió disminuir el tamaño de partícula del PPC en un molino de cocina Kitchen Mill™ de la compañía Blendtec, posteriormente se repitió el proceso de granulometría (TABLA 7.3).

TABLA 7.2 Granulometría antes de la molturación

No. Tamiz	Apertura en μm	g/100 g
40	425	5.25
Continua Tabla 7.1		
50	300	9.55
70	212	13.61
80	180	8.29
100	150	11.39
120	125	11.74
<120		40.17

TABLA 7.3 Granulometría después de molturación

No. Tamiz	μm	g/100 g
40	425	0.48
50	300	1.95
70	212	6.6
80	180	4.69
100	150	8.56
120	125	6.88
<120		70.84

70 g de 100 g atravesaron la malla No. 120 con una apertura de 125 μm , por lo cual se decidió molturar los 3.5 kg de la muestra de PPC con la que se contaba.

7.3. Propiedades de mezclado y absorción de agua (Farinograma)

La TABLA 7.4 muestra los resultados del farinógrafo de masas con diferentes niveles de sustitución de PPC. El porcentaje de absorción de agua (AA) para la formación de la masa aumentó en un 1.7 % en el último nivel de sustitución de PPC (5 %) en comparación con el tratamiento testigo.

TABLA 7.4 Propiedades de mezclado y absorción de agua* **

Nivel de sustitución de PPC (% base húmeda)	AA. (%)	TD. (s)	TE (s)	ITM (UB)	TR (s)
0	62.1 ± 0.057 ^a	11 ± 1.73 ^a	16.3 ± 1.77 ^a	19.7 ± 3.21 ^a	18.9 ± 1.79 ^a
1.25	62.2 ± 0.057 ^a	9.4 ± 0.59 ^{ab}	9.8 ± 0.87 ^b	39.7 ± 4.04 ^b	12.5 ± 0.85 ^b
2.5	62.6 ± 0.057 ^b	8.4 ± 0.05 ^{ab}	8.7 ± 0.2 ^b	53 ± 2.64 ^c	11.1 ± 0.4 ^{bc}
5	63.8 ± 0.11 ^c	7.7 ± 0.35 ^b	8.2 ± 0.16 ^b	63.3 ± 5.77 ^c	9.8 ± 0.36 ^c

* **AA**: absorción de agua, **TD**: Tiempo de desarrollo en minutos; **TE**: Tiempo de Estabilidad en minutos; **ITM**: Índice de tolerancia al Mezclado en Unidades Brabender; **TR**: Tiempo de ruptura en minutos.

** Medias ± desviación estándar (n=3) seguidas de diferente letra son diferentes significativamente (Tukey, $p < 0.05$).

Los cambios en la absorción de agua se deben al aumento del contenido de fibra. La harina con 5 % de PPC tuvo un aumento de 4.5 % en la fibra dietética total. Estos resultados concuerdan con otros informes con tendencias similares cuando se añadieron salvado de trigo (Boita et al., 2016) y fibra de tomate comercial insoluble (Chouaibi et al., 2019) a la harina de trigo. Anil (2007) sugirió que esto se explicaba por los grupos hidroxilo en la estructura de la fibra, formando más interacción con el agua a través de enlaces de hidrógeno mediante la adición de fibra de avellana en los productos de panadería. Los tiempos de desarrollo y estabilidad son valores que indican la fuerza de la masa, los valores altos sugieren masas fuertes. En contraste con los resultados de Anil (2007), la adición de PPC disminuyó significativamente los tiempos de desarrollo y estabilidad (Tukey, $p < 0.05$) en un 30 y 48 %, respectivamente. Nuestros resultados concuerdan con los de Boita et al. (2016), quienes informaron una disminución significativa en el tiempo de desarrollo y la estabilidad, y un mayor índice de tolerancia a la mezcla con salvado de trigo. Esto puede explicarse en parte porque la fibra dificulta la formación de enlaces disulfuro entre las proteínas del trigo, lo que resulta en una reducción del tamaño molecular (Han et al., 2019; Rosas-Sanchez et al., 2021), debilitando su cohesión y disminuyendo el desarrollo de gluten. El índice de tolerancia de mezcla más alto (en Unidades Brabender) se encuentra en las muestras

con la concentración más alta de PPC añadido (5 %). Los valores altos del índice de tolerancia de mezcla están relacionados con masas débiles (Wirkijowska et al., 2020).

7.4. Pruebas de compresión y relajación en Gluten CORE

Se desarrolló la masa con 10 g de harina y se lavó el almidón para obtener el gluten desarrollado en un sistema Glutomatic Perten (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden). Las muestras de gluten se comprimieron durante 5 s con una fuerza constante de 8 N, posteriormente se recuperaron durante un período de 55 segundos. El analizador Gluten CORE (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) registró la distancia de compresión como un factor de tiempo durante un intervalo de 1 minuto (FIGURA 7.1 a).

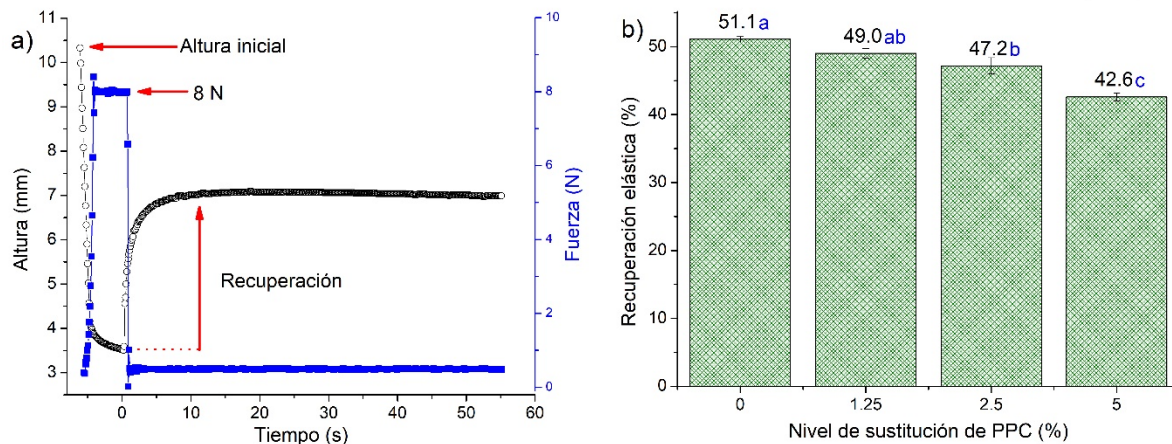


FIGURA 7.1 Recuperación elástica del gluten de masas con polvo de pulpa de café (PPC). Curva típica compresión y recuperación (a). Medias (columnas con barras de error estándar) con la misma letra no son significativamente diferente ($p < 0.05$, Tukey) (b).

La FIGURA 7.1 b muestra los resultados de la prueba de compresión-recuperación para el gluten extraído de masas con diferentes niveles de sustitución de PPC. La recuperación elástica, calculada como la relación entre la altura total recuperada y la

altura comprimida (Chapman et al., 2012), disminuyó significativamente ($p < 0.05$) en 4, 8 y 17 % (1.25, 2.5 y 5 % de PPC, base húmeda, respectivamente). Los cambios de mayor magnitud en la recuperación elástica del gluten en comparación con los parámetros del farinógrafo de mezcla sugieren un efecto mayor de la fibra en el gluten que en la masa (Rosas-Sanchez et al., 2021). La TABLA 7.5 muestra los coeficientes de correlación de Pearson, con sus respectivos valores p , entre los parámetros reológicos y de calidad del pan. La recuperación elástica se correlacionó positivamente ($r = 0.91$, $p < 0.0001$) con el volumen de pan.

TABLA 7.5 Coeficientes de correlación de Pearson entre los indicadores tradicionales de cualidades de horneado y parámetros de fluencia para gluten y masa. ^z

Parámetros	Gluten										
	J_0	G_0	J_1	G_1	λ_1	J_2	G_2	λ_2	η_0	η_1	η_2
Tiempo de desarrollo	0.64*	-0.69*	0.66*	-0.69*	ns	0.73**	-0.72**	ns	-0.73**	-0.66*	-0.70*
Tiempo de estabilidad	0.64*	-0.63*	0.65*	-0.63*	ns	0.71*	-0.66*	ns	-0.66*	-0.60*	-0.64*
Firmeza de miga	-0.86**	0.90***	-0.85**	0.89***	ns	-0.85**	0.87**	0.65*	0.87**	0.89***	0.89***
ITM	-0.89***	0.88**	-0.90***	0.87**	ns	-0.90***	0.87**	0.62*	0.85**	0.87**	0.88**
Peso de pan	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Volumen de pan	0.94***	-0.94***	0.94***	-0.93***	-0.57+	0.92***	-0.92***	-0.70*	-0.91***	-0.93***	-
											0.93***
Absorción de agua	-0.85**	0.90***	-0.85**	0.90***	ns	-0.87**	0.89***	0.59*	0.90***	0.88**	0.90***
Índice de recuperación	0.77**	-0.77**	0.77**	-0.76**	ns	0.81**	-0.78**	ns	-0.81**	-0.74**	-0.77**
Parámetros	Masa										
	J_0	G_0	J_1	G_1	λ_1	J_2	G_2	λ_2	η_0	η_1	η_2
Tiempo de desarrollo	0.75**	-0.70*	0.73**	-0.69*	ns	0.70*	-0.68*	ns	-0.70*	-0.69*	-0.67*
Tiempo de estabilidad	0.78**	-0.64*	0.78**	-0.63*	0.65*	0.76**	-0.63*	ns	-0.65	-0.61	-0.61
Firmeza de miga	-0.90***	0.99***	-0.87**	0.99***	-0.68*	-0.86**	0.98***	ns	0.98***	0.97***	0.99***
ITM	-0.95***	0.87**	-0.94***	0.86**	-0.77**	-0.93***	0.86**	ns	0.87**	0.85**	0.84**
Peso de pan	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Volumen de pan	0.98***	-0.95***	0.97***	-0.94***	0.82**	0.95***	-0.94***	ns	-0.95***	-0.92***	-
											0.93***
Absorción de agua	-0.91***	0.97***	-0.87**	0.97***	-0.72*	-0.86**	0.96***	ns	0.97***	0.94***	0.98***
Índice de recuperación	0.81**	-0.76**	0.79**	-0.77**	0.76**	0.78**	-0.76**	ns	-0.80**	-0.69*	-0.78**

^z Prueba de fluencia a 100 Pa de esfuerzo de corte durante 100 s. *, ** y *** son significativos a $p < 0.05$, 0.01 y 0.0001, respectivamente; + indica significancia a $p < 0.06$; y ns = no significativo. G_0 = modulo elástico instantáneo de corte; G_1 , G_2 = módulos elásticos de corte retardados; J_0 = fluencia elástica instantánea; J_1 , J_2 = fluencias elásticas retardadas; η_1 , η_2 = coeficientes de viscosidad asociados a los tiempos de retardación λ_1 , λ_2 , respectivamente; η_0 = “zero shear viscosity”; ITM = Índice de Tolerancia al Mezclado, tiempo de desarrollo y estabilidad fueron a 500 UB en la prueba de farinografía.

7.5. Volumen de pan y firmeza de la miga

La TABLA 7.6 muestra los parámetros de panificación obtenidos con el método estándar AACCI 10-10.03 AACCI .

TABLA 7.6 Parámetros de calidad de panificación para las hogazas de pan con niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*

Nivel de sustitución de PPC (% base húmeda)	Altura (mm)	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Volumen específico (cm ³ /g)
0 (testigo)	127±5.91a	736±4.21a	3056±108a	4.14±0.17a
1.5	118±3.22a	739±3.59a	2804±88b	3.79±0.12b
2.5	106±5.76b	735±12.71a	2408±99c	3.28±0.19c
5	91±2.28c	737±1.43a	2007±45d	2.72±0.06d

*Medias ± desviación estándar (n=6) seguidas de diferente letra son diferentes significativamente (Tukey, $p < 0.05$).

A medida que aumentaron los niveles de sustitución de PPC (1.25, 2.5 y 5 % de PPC en base húmeda), el volumen de la hogaza de pan disminuyó (8.7, 21 y 36 %, respectivamente). Los valores de complianza de la prueba de fluencia-recuperación se correlacionaron positivamente ($r = 0.90$, $p < 0.0001$), con el volumen de pan, en contraste con los módulos elásticos (G_0 , G_1 y G_2) y la viscosidad en estado estacionario (η_0) en la masa ($r = 0.95$) y gluten ($r = 0.93$), que se correlacionaron negativamente ($p < 0.001$) con el volumen de pan (TABLA 7.5). Se observó una disminución significativa en el volumen de pan incluso en el nivel de sustitución más bajo (1.25 % de PPC). Una baja concentración de PPC también afectó las propiedades reológicas de la masa, como el debilitamiento de la red de gluten y el aumento de la rigidez del sistema. Eso implica una menor expansión de la masa con los tratamientos de sustitución de PPC en comparación con el control. La sustitución de harina de trigo por PPC tiene un efecto sobre el volumen de pan similar al reportado para la harina integral y la incorporación

de fibra dietética de diferentes fuentes. A la fibra dietética se le atribuye el debilitamiento de la matriz del gluten (Anil, 2007; Boita et al., 2016; Bonnard-Ducasse et al., 2010; Chouaibi et al., 2019; Peressini y Sensidoni, 2009; Rosas-Sanchez et al., 2021). Un oscurecimiento cualitativo de la corteza y la miga de pan aumentó a medida que aumentaba el nivel de sustitución de PPC (FIGURA 7.2). El color oscuro del pan se informa comúnmente con la adición de fibra (Anil, 2007). Esto también es común en la mayoría de los panes de pan especiales cuyas características se espera que difieran de la mayoría de los panes de harina blanca.

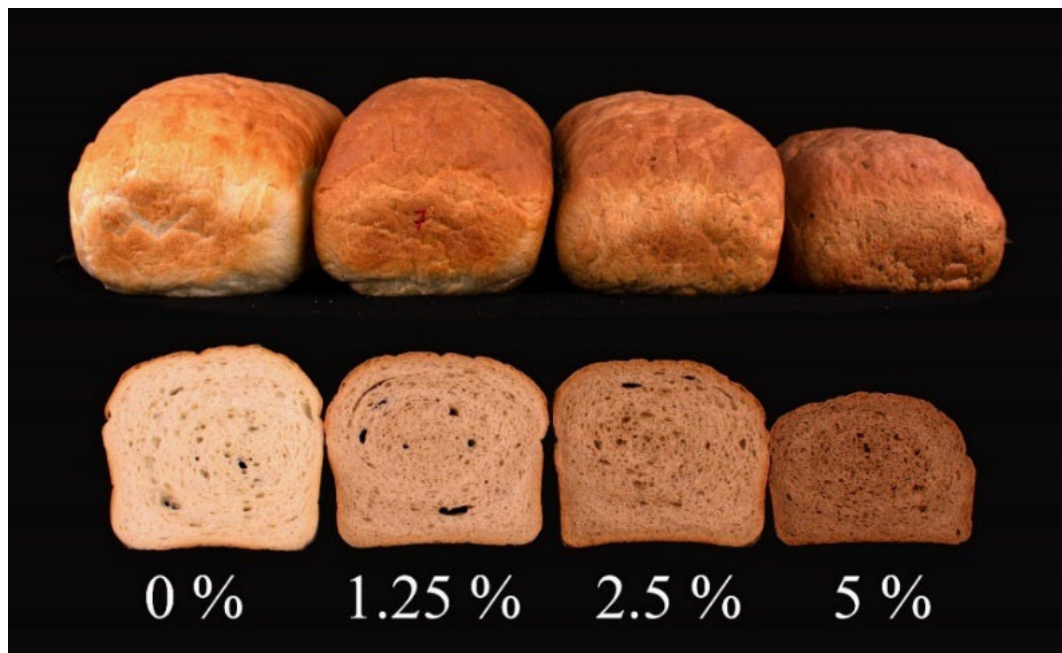


FIGURA 7.2 Hogazas de pan con diferente nivel de sustitución (0, 1.25, 2.5 y 5 % base húmeda) de polvo de pulpa de café (PPC).

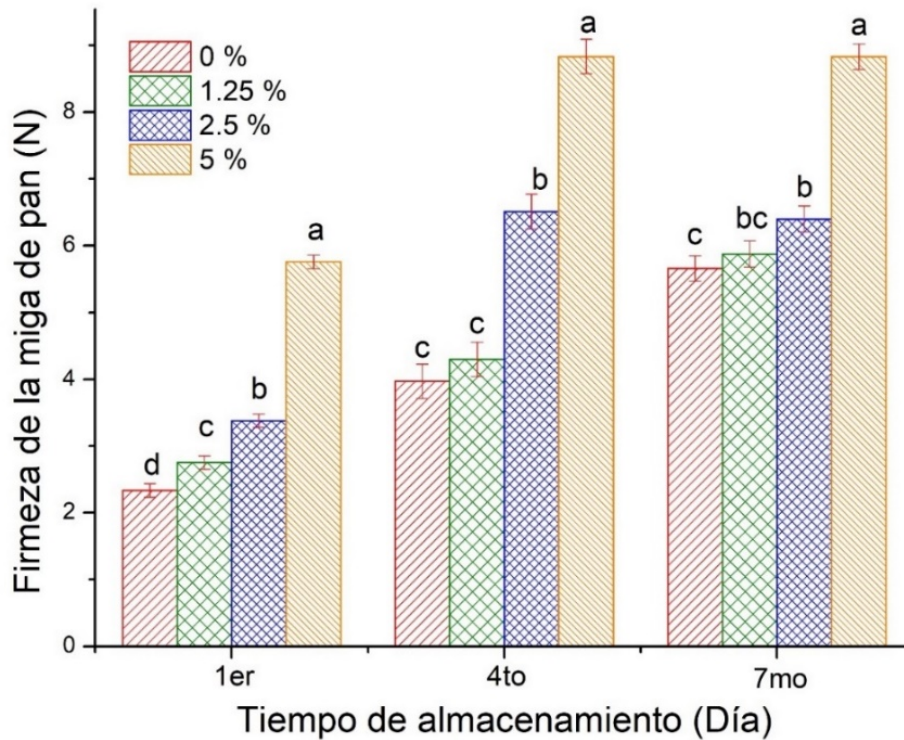


FIGURA 7.3 Firmeza de la miga de pan en función del nivel de sustitución de polvo de pulpa de café agrupados por día de almacenamiento. Medias ($n=2$) \pm desviación estandar con letra distinta, en el mismo día de almacenamiento, son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

7.6. Pruebas de fluencia-recuperación en gluten y masa

Los datos de las curvas de fluencia-recuperación fueron tomadas con un reómetro AR-1000 (TA, Instrument New castle, DE), se analizaron los datos en el programa Origin Lab, los ajustes presentaron en promedio un coeficiente de determinación en promedio de 0.98.

La TABLA 7.7 muestra los parámetros de regresión estimados del modelo generalizado de Kelvin-Voigt de 6 elementos de las pruebas de fluencia-recuperación para masa y gluten con diferentes niveles de sustitución de PPC. El valor del componente elástico durante la fase de fluencia es 1.7 y 2.8 veces mayor para el gluten y masa respectivamente en el tratamiento de 5 % de sustitución (comparado con el tratamiento testigo). Tendencias similares se encontraron en el estudio de Mironaesa

y colaboradores (2018), quienes investigaron el efecto de la adición de cascara de uva en diferentes tamaños de partícula en las propiedades reológicas de la masa de trigo. Donde la fluencia (J_0) del componente elástico puro (G_0), disminuyó al aumentar la cantidad de fibra. Otro estudio, evaluó los efectos de la incorporación de harina de semilla de tomate en masa, que concuerda con un decremento significativo de la fluencia asociada al componente elástico puro, al aumentar la cantidad de harina de semilla de tomate (Mironeasa, S. et al., 2019). Para el gluten, los valores de G_1 y G_2 incrementaron 1.8 y 1.6 veces respectivamente en el último nivel de sustitución (5 %) comparado con el tratamiento testigo. En la masa se observó un incremento mayor de 3.6 y 3.8 veces para G_1 y G_2 respectivamente en el último nivel de sustitución (5 %). Altos valores de los módulos elásticos indican que se necesita más esfuerzo para deformar una muestra. Por lo tanto, las muestras con mayor nivel de sustitución de PPC son mucho más rígidas comparadas con las muestras testigo. En la FIGURA 7.4 se puede observar gráficamente las curvas construidas con el promedio de los parámetros del modelo de Kelvin-Voigt. Las muestras con mayor nivel de sustitución tienen menores valores de fluencia, lo que sugiere que estas muestras oponen mayor resistencia a la deformación, por lo tanto, las muestras con mayor nivel de PPC (mayor cantidad de fibra) se deforman menos al aplicar 100 Pa de esfuerzo (Rosas-Sanchez et al., 2021). Esto se observó en ambos tipos de muestra: gluten y masa. La deformación máxima disminuyó 73 % en las muestras de masa con 5 g / 100 g de PPC comparadas con las muestras testigo, mientras que la deformación máxima en gluten se redujo un 41 %. La deformación máxima fue menor en gluten comparada con la de la masa, y esto se debe posiblemente a que se remueve una porción de PPC durante el aislamiento del gluten, como lo sugieren estudios realizados por otros investigadores (Zhou et al., 2021). Cuando se compararon los promedios de los módulos de elasticidad (G_0 , G_1 y G_2), los valores de la masa fueron dos veces mayor que los del gluten debido a que el almidón provee rigidez a la masa, tal y como se ha reportado en otras investigaciones (Hernández-Estrada et al., 2017). Los cambios en deformación de la masa fueron relacionados inversamente con los niveles de PPC. Al aumentar los niveles de PPC, se observó que la deformación disminuyó y los valores

de los módulos elásticos aumentaron, lo que sugiere que la masa es más fuerte. Otros autores reportaron tendencias similares (Mironeasa, Silvia et al., 2018; Sakhare y Prabhasankar, 2017). Comparando las magnitudes de la recuperación, el gluten se recuperó 1.4 veces que la masa, debido a que las proteínas presentes en el gluten proveen la elasticidad (capacidad para recuperarse) y el almidón provee la rigidez en la masa. No hay evidencia suficiente para determinar un efecto significativo en la recuperación del gluten en las pruebas de fluencia-recuperación. Por otro lado, en las muestras de masa solo se observó un efecto significativo en el segundo nivel de sustitución (2.5 %) comparado con el control. En la TABLA 7.7 se observa una falta de tendencia en el porcentaje de recuperación por adición de fibra y podría atribuirse, como se ha reportado, por la reducción de la deformación máxima, que disminuyó en un 57 % en promedio para el gluten y la masa (Mironeasa, S. et al., 2019; Mironeasa, Silvia et al., 2018). Por otro lado, cuando se analizó la recuperación de las muestras de gluten a 8 N con las pruebas de compresión-recuperación (deformación biaxial), si se observó una tendencia y disminución significativa del porcentaje de recuperación de hasta un 16 % en el último nivel de sustitución de PPC (5 %) y fue correlacionada positivamente con el volumen de pan. Esto sugiere que las deformaciones largas brindaron más información en las muestras de gluten estudiadas (FIGURA 7.1). Las propiedades de retención de agua de la fibra PPC pueden disminuir el agua libre en la masa, y se le atribuye un efecto de relleno que podría aumentar la fricción de las partículas en la estructura. Los valores de fluencia fueron positivamente correlacionados ($r = 0.90$), con el volumen de pan, en contraste a los módulos elásticos (G_0 , G_1 y G_2) y la “zero shear viscosity” (η_0) en la masa ($r = - 0.95$) y en el gluten ($r = - 0.93$), que fueron negativamente correlacionados ($p < 0.001$) con el volumen de pan (TABLA 7.5).

TABLA 7.7 Parámetros del modelo generalizado de 6 elementos de Kelvin-Voigt para gluten aislado y masa con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*

Nivel de sustitución de PPC	Gluten				Masa para pan			
	0 %	1.25 %	2.50 %	5 %	0 %	1.25 %	2.50 %	5 %
Parámetros	Fase de fluencia (gluten)				Fase de fluencia (masa para pan)			
G_0 (Pa) $\times 10^3$	1.5±0.1c	1.5±0.1c	2.2±0.1b	2.6±0.2a	10.8±0.4c	13.1±1.3c	17.8±0.7b	30.6±2.1a
G_1 (Pa) $\times 10^3$	1.2±0.1c	1.2±0.1c	1.7±0.1b	2.1±0.2a	4.8±0.3d	6.3±1.0c	8.9±0.6b	17.3±0.9a
G_2 (Pa) $\times 10^3$	1.1±0.1c	1.0±0.0c	1.5±0.1b	1.7±0.1a	7.1±0.5c	9.2±1.9c	13.5±0.9b	26.6±2.3a
η_0 (Pa) $\times 10^5$	1±0.1a	1±0.1a	1.4±0.1b	1.7±0.1c	1.5±0.1a	2.1±0.3a	3.2±0.1b	6.1±0.5c
Deformación máxima (%)	34.2±2.3a	34.3±0.8a	24.0±1.3b	20.1±1.7c	13.4±0.8a	10.4±1.8b	6.9±0.4c	3.6±0.3d
	Fase de recuperación (gluten)				Fase de recuperación (masa para pan)			
Gr_0 (Pa) $\times 10^3$	1.3±0.1c	1.3±0.1c	1.8±0.1b	2.2±0.2a	5.5±0.1c	6.9±0.8c	9.5±0.6b	17.5±1.3a
Gr_1 (Pa) $\times 10^3$	1.1±0.1c	1.1±0.1c	1.6±0.1b	1.9±0.2a	4.0±0.1c	5.2±0.8c	7.9±0.6b	16.6±1.1a
Gr_2 (Pa) $\times 10^3$	1.1±0.1c	1.1±0.0c	1.6±0.1b	1.8±0.2a	3.5±0.2c	4.5±0.7c	6.4±0.3b	12.1±0.8a
Deformación final (%)	8.4±0.6a	8.0±0.7a	5.9±0.7b	5.0±0.5b	6.3±0.5a	4.8±1b	3.0±0.1c	1.6±0.2d
Recuperación (%)	75.4±2.3a	76.7±2.3a	75.6±2.1a	74.9±2.1a	53±1.4b	54±1.9ab	55±0.6a	54±1.2ab

*Valores de medias ($n = 5 \pm$ desviaciones estándar) en la misma fila del respectivo material (gluten o masa) seguido de diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey). Esfuerzo en la fase de fluencia: 100 Pa durante 100 s; G_0 = módulo elástico instantáneo; G_1 y G_2 = módulos de respuesta elástica tardía; η_0 = viscosidad en estado estacionario (steady state viscosity); Gr_0 , Gr_1 , Gr_2 son para los módulos de respuesta elástica instantánea y tardía en la fase de recuperación. 0, 1.25, 2.5 y 5 % (base húmeda) de sustitución de PPC.

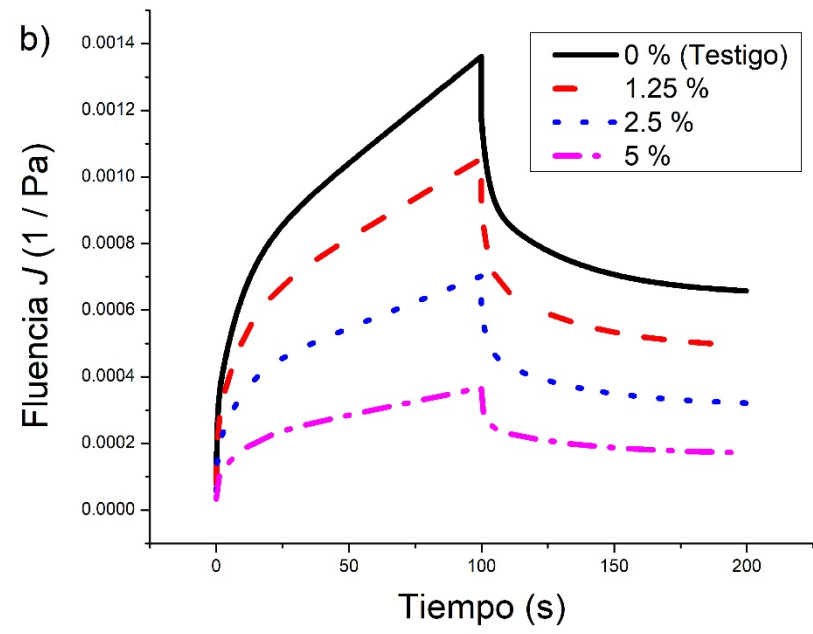
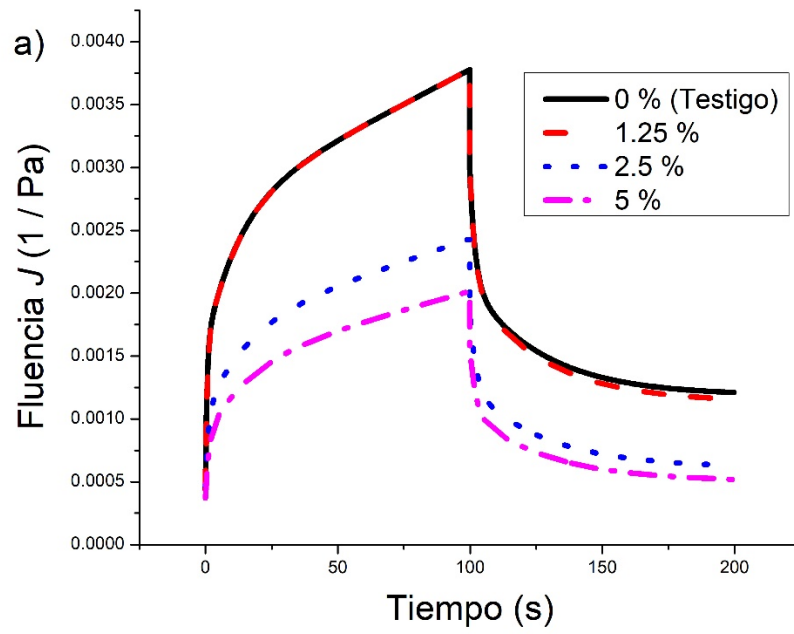


FIGURA 7.4 Curvas de fluencia-recuperación para gluten extraído (a) y masa (b) con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC), graficadas con los promedios de los parámetros de regresión del modelo de Kelvin-Voigt. 1.25, 2.5, y 5 g de PPC por 100 g de harina de trigo.

7.7. Barrido de frecuencia de batidos para muffins

La FIGURA 7.5 es una gráfica típica de un barrido de frecuencia y muestra los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función de la frecuencia angular. La sustitución de harina de trigo por PPC afectó significativamente las propiedades viscoelásticas de los batidos para muffins. Ambos módulos incrementaron significativamente con la adición de PPC y esto puede ser atribuido por su alto contenido de fibra. Los módulos G' y G'' son sensibles al contenido de agua, a medida que esta disminuye los módulos tienden a aumentar. Debido a la alta capacidad de retención de agua de la fibra, la disponibilidad de agua libre disminuye en el sistema, lo cual afecta el valor de los módulos (Aydogdu et al., 2018).

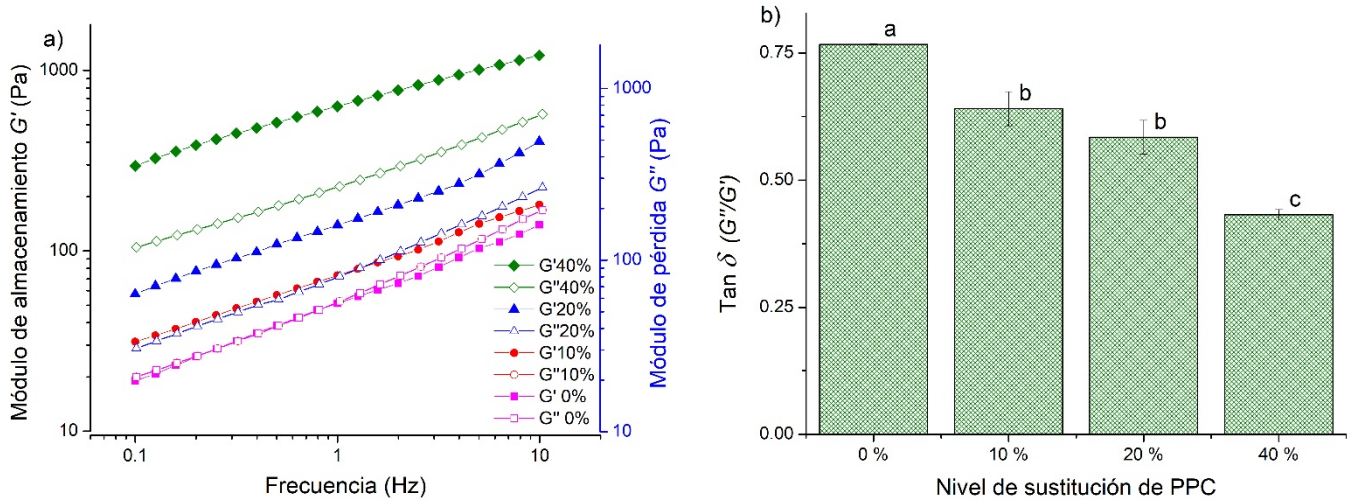


FIGURA 7.5 Módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función de la frecuencia con diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café (a). Ángulo de fase ($\tan \delta$) a 1 Hz de frecuencia (b). Los valores de medias ($n=3$) \pm desviación estandar con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

La mayoría de las muestras tienen un valor de $\tan \delta$ (G''/G') menor a la unidad, lo cual evidencia que G' es mayor a G'' , y por lo tanto, exhiben un comportamiento más parecido a un sólido (Kirbaş et al., 2019; Ronda et al., 2017; Saghafi et al., 2019).

La TABLA 7.8 muestra los módulos de almacenamiento y de pérdida a la frecuencia de 1 Hz: (G'_{ω_1} y G''_{ω_1}) y los exponentes a y b, que cuantifican su dependencia a la frecuencia. Estos valores fueron obtenidos durante el ajuste del modelo a las curvas

de los módulos de almacenamiento en función de la frecuencia con un valor de r^2 de 0.99 lo que indica un nivel de ajuste satisfactorio .

TABLA 7.8 Constantes y exponentes de la ley de potencia relacionadas con el comportamiento viscoelástico de los batidos para muffins con diferente nivel de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC)*

Nivel de sustitución de PPC (% base húmeda)	G'	a	r^2	G''	b	r^2
0 (Testigo)	45.4±5.2c	0.6±0.2a	0.979	56.3±1.6b	0.54±0.02a	0.997
10	80.1±5.8bc	0.4±0.0ab	0.996	56.3±1.6b	0.54±0.02a	0.997
20	133.2±13.2b	0.5±0.0ab	0.965	80.6±3.1b	0.48±0.03b	0.998
40	584.1±57.8a	0.3±0.0b	0.985	257.6±21.0a	0.41±0.01c	0.998

*Valores de medias ($n = 3 \pm$ desviación estándar) en la misma columna seguido de letra distinta son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

El comportamiento del batido control, se describe como una solución macromolecular ($G'\omega_1 < G''\omega_1$), con valores de los módulos $G'\omega_1$ y $G''\omega_1$ altamente dependientes de la frecuencia (Sanz et al., 2017). Desde el primer nivel de sustitución (10 %), el comportamiento cambia y se describe como el de un gel suave ($G'\omega_1 > G''\omega_1$) ligeramente dependiente de la frecuencia (Kirbaş et al., 2019; Sanz et al., 2017). Tendencias similares fueron encontradas por Kirbaş et al. (2019), donde sus valores de $G'\omega_1$ y $G''\omega_1$ de los batidos aumentaron con la adicción de fibra de naranja, manzana y zanahoria, y observaron valores de los exponentes a y b entre 0.21 y 0.48.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza, no hay suficiente evidencia para decir que existe una diferencia significativa al primer nivel de sustitución (10 %). Pero al segundo y tercer nivel (20 y 40 %) la adicción de PPC afecta significativamente el comportamiento viscoelástico de los batidos para muffins predominando el comportamiento más parecido a un sólido.

7.8. Rampas de temperatura

Para las rampas de temperatura se utilizó una distancia entre platos de 1 mm, un esfuerzo de 0.5 Pa, con una frecuencia constante a 1 Hz y escalando la temperatura de 20 – 90 °C a 2 °C/min. La evolución de la respuesta reológica de los batidos con diferente nivel de sustitución de PPC con respecto a la temperatura se describe en la FIGURA 7.7. Según la literatura consultada, el gluten no experimenta cambios hasta temperaturas de 80 °C , por lo que los cambios se pueden atribuir al almidón (Baldino et al., 2018). La microestructura comienza a experimentar cambios desde bajas temperaturas puesto que se observa que el valor del ángulo de fase $\tan \delta$ disminuye en todos los niveles de sustitución de PPC, a diferencia del estudio de Baldino et al. (2018) del efecto de la hidroxipropilmetilcelulosa y la carboximetilcelulosa sobre las propiedades reológicas de batidos para pastel, cuyo valor de $\tan \delta$ se mantiene casi constante a bajas temperaturas. Esto puede deberse a la presencia de proteína por el huevo añadido a la formulación de los muffins. Para poder determinar de manera cuantitativa la temperatura donde comienzan el fenómeno de gelatinización y estructuración, se analizó el módulo de almacenamiento por estar relacionado con el comportamiento sólido (FIGURA 7.6 a). De acuerdo con el estudio de Baldino et al. (2018) se realizó una linealización de la primera y segunda sección de incremento del módulo G' en función de la temperatura considerando la tangente al punto de inflexión de la curva. La temperatura donde inicia el fenómeno de gelatinización se asumió como la intersección de las líneas obtenidas, y como se aprecia en la FIGURA 7.6 (a), representa un punto de incremento acelerado en la curva de G' .

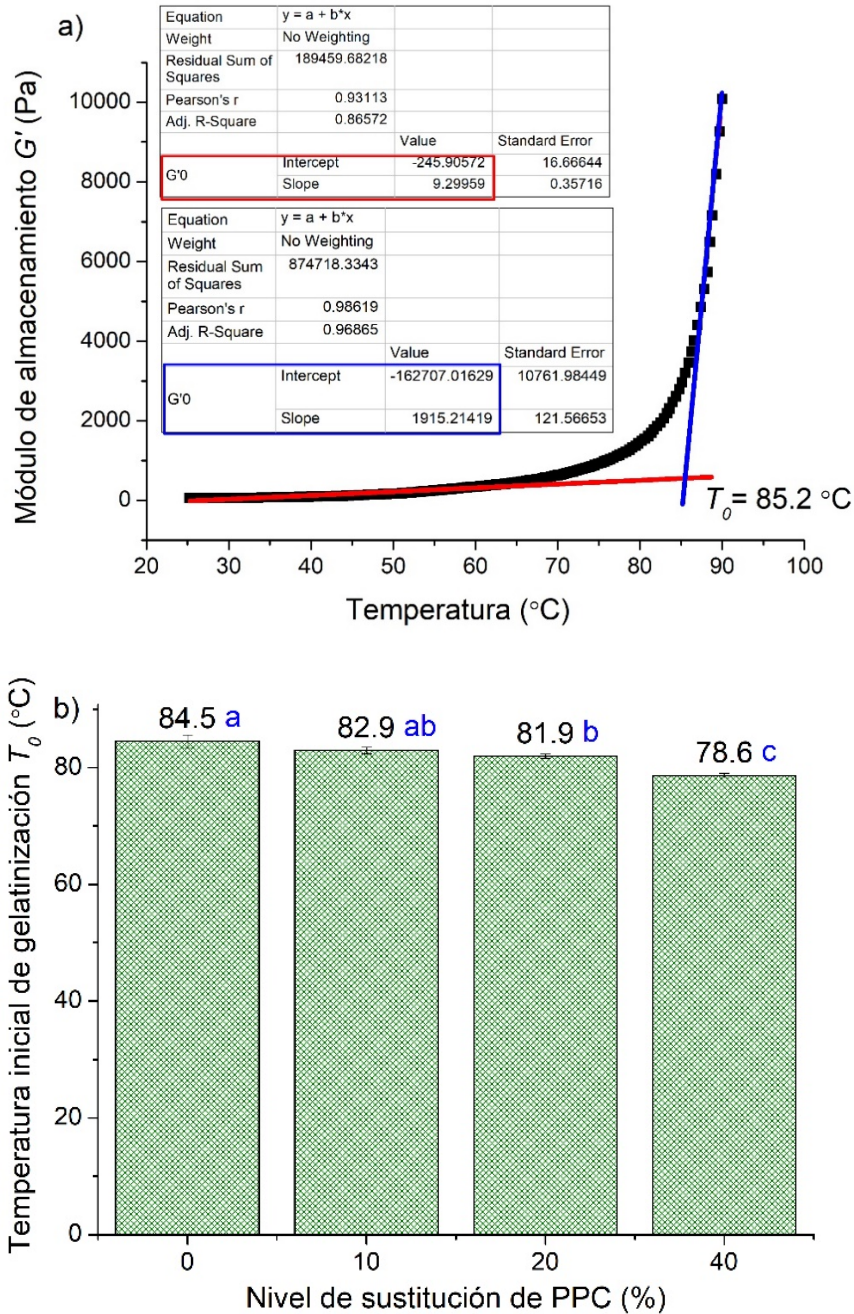


FIGURA 7.6 Influencia de la temperatura en el módulo de almacenamiento y estimación de T_0 (a). Valores estimados de T_0 (b) a diferentes niveles de sustitución de polvo de pulpa de café. Los valores de medias ($n=3$) \pm desviación estandar con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

Las propiedades viscoelásticas de los batidos para muffins con y sin PPC disminuyeron los valores de $\tan \delta$ y aumentaron los valores del módulo complejo (G^*)

durante el incremento de temperatura de 25 a 90 °C a valores constantes de deformación y frecuencia (FIGURA 7.7). La respuesta casi lineal del módulo complejo cambia drásticamente después de la temperatura de gelatinización (T_0), lo que indica un incremento en la rigidez del batido durante el calentamiento (Chompoorat et al., 2020). En la FIGURA 7.7, el incremento acelerado del módulo complejo (G^*) está relacionado con la desnaturalización de proteínas el hinchamiento del almidón y la formación de estructuras (Baldino et al., 2018; Bozdogan et al., 2019; Chompoorat et al., 2020; Hesso et al., 2015). Los batidos mostraron una tendencia similar, con un incremento significativo del 3 y 6.9 % al segundo y tercer nivel de sustitución de PPC (20 y 40 % respectivamente) con respecto al testigo. En los espectros mecánicos de la FIGURA 7.7 para batidos de muffins con diferentes niveles de sustitución de PPC, se aprecia una caída del valor inicial de $\tan \delta$ (a 25 °C) del 9.5, 17 y 38 % en los niveles de sustitución (10, 20 y 40 % respectivamente) comparados con el nivel testigo. Esto sugiere un comportamiento más parecido a un sólido (predominancia del comportamiento elástico) a medida que se va añadiendo PPC. La tendencia de decremento de T_0 es parecida con lo reportado por Chompoorat et al. (2020) quienes al incrementar el contenido de harina de arroz en los batidos de frijol rojo observaron una disminución de la temperatura inicial de gelatinización (T_0) de 63 a 56 °C a un 25 % de sustitución. Esto lo atribuyen al incremento de almidón en el sistema al agregar la harina de arroz.

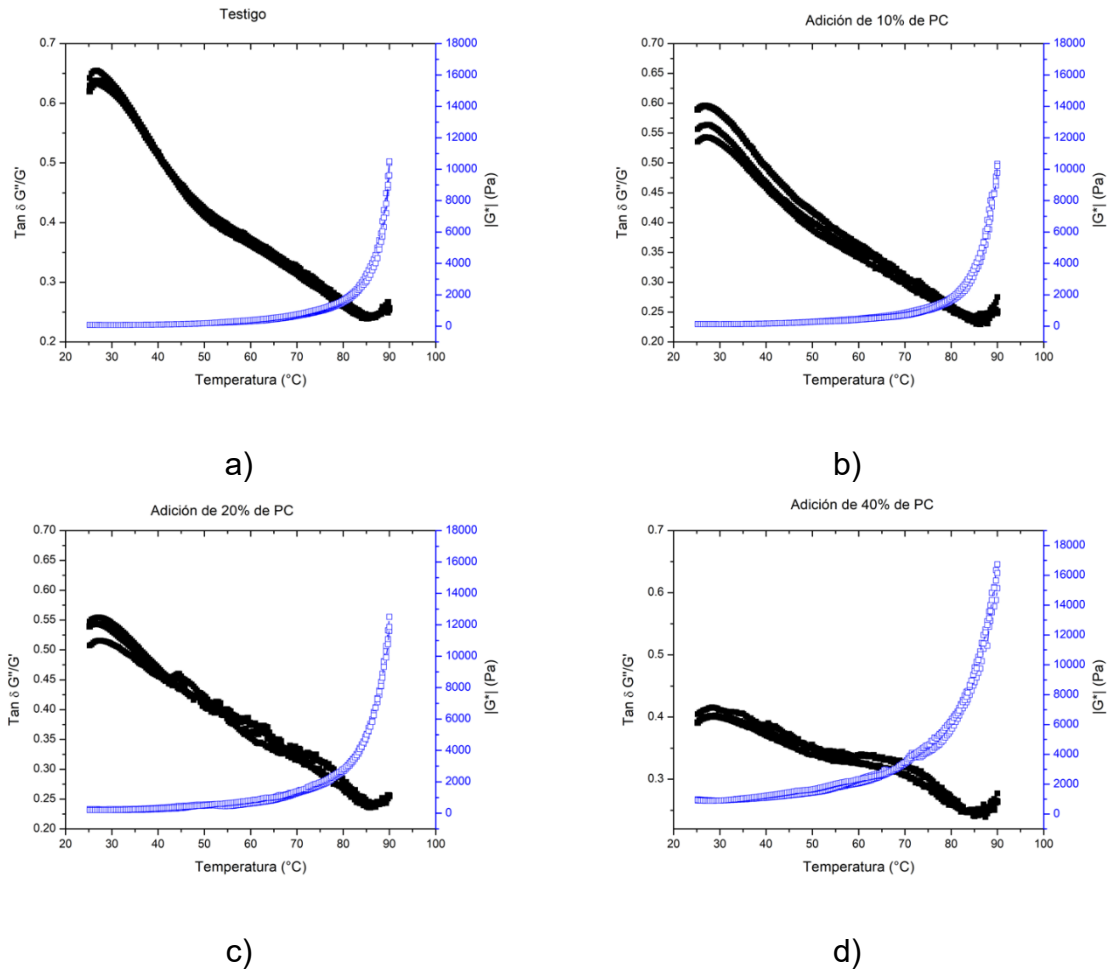


FIGURA 7.7 Evolución del Módulo complejo (G^* , Pa) y del ángulo de fase ($\tan \delta$) durante la rampa de temperatura (25 a 90 °C) a) 0 % (testigo), b) 10 %, c) 20 % y d) 40 % de sustitución de polvo de pulpa de café (PPC).

7.9. Volumen de muffins y firmeza de la miga

Los parámetros de calidad de horneado se muestran en la TABLA 7.9. Al aumentar el nivel de sustitución de PPC (10, 20 y 40 % de PPC base húmeda), no se observa diferencia significativa a los niveles 10 y 20 %, sin embargo, el volumen de muffins disminuye significativamente un 9.5 % al último nivel de sustitución de PPC (40 %). La TABLA 7.10 muestra las correlaciones de los parámetros de calidad muffins con los parámetros obtenidos de las pruebas reológicas. El volumen de los muffins fue negativamente correlacionado con los módulos $G' \omega_1$ y $G'' \omega_1$ ($r = -0.84$, $p < 0.01$) y positivamente con la temperatura inicial gelatinización T_0 ($r = 0.78$, $p < 0.01$), lo cual

indica que estos parámetros pueden ser utilizados para predecir la calidad del producto final con respecto al volumen. Cabe destacar que los batidos con 40 % de PPC obtuvieron los valores más grandes de G' (584.1 Pa) y al tener un comportamiento más rígido, las burbujas de gas no logran expandir la miga durante el horneado. Los resultados concuerdan con (Kirbaş et al., 2019), quienes estudian los efectos de la adición de diferentes fuentes de fibra como cascara de manzana, zanahoria y naranja en batidos para pasteles. Ellos obtienen bajos volúmenes de pastel al nivel de sustitución de 15 % y (Aydogdu et al., 2018) quienes estudiaron el efecto de la adición de fibras de avena, guisante manzana y limón. Los pasteles con menor volumen son los que contienen más fibra. Los batidos con baja consistencia no pueden conservar el aire durante la mezcla y el horneado, y producen bajo volumen de productos panificados, mientras que una mayor consistencia podría limitar la expansión de la masa. El aire capturado en el batido debe considerarse ya que está relacionado con el volumen final y la textura del producto (Kirbaş et al., 2019). La FIGURA 7.8 muestra la firmeza de la miga de los muffins obtenida con el método de la AIB B974a-GB el cual es una versión modificada del método de la AACCI 74-09. La firmeza incrementó significativamente un 25.6 y 21.1 % en el último nivel de sustitución al primer y cuarto día de almacenamiento respectivamente. En el séptimo día de almacenamiento, todos los tratamientos incrementaron en firmeza y solo se observó diferencia significativa de 15.7 % entre el segundo y tercer nivel de sustitución de PPC.

TABLA 7.9 Parámetros de calidad de horneado de muffins*

Nivel de sustitución de PPC (% base húmeda)	Peso (g)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Volumen específico (cm ³ /g)
0 (Testigo)	42.09 ± 0.3ab	46.61 ± 1.5a	84.16 ± 2a	1.98 ± 0.04a
10	41.96 ± 0.2b	44.25 ± 1.9ab	82.5 ± 2.7a	1.95 ± 0.05a
20	42.02 ± 0.2b	43.17 ± 2.0b	83.83 ± 1.6a	1.98 ± 0.04a
40	42.53 ± 0.3a	39.19 ± 1.1c	75.83 ± 1.8b	1.76 ± 0.05b

* Valores de medias ($n=2 \pm$ desviación estándar) en la misma columna seguido de letra distinta son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

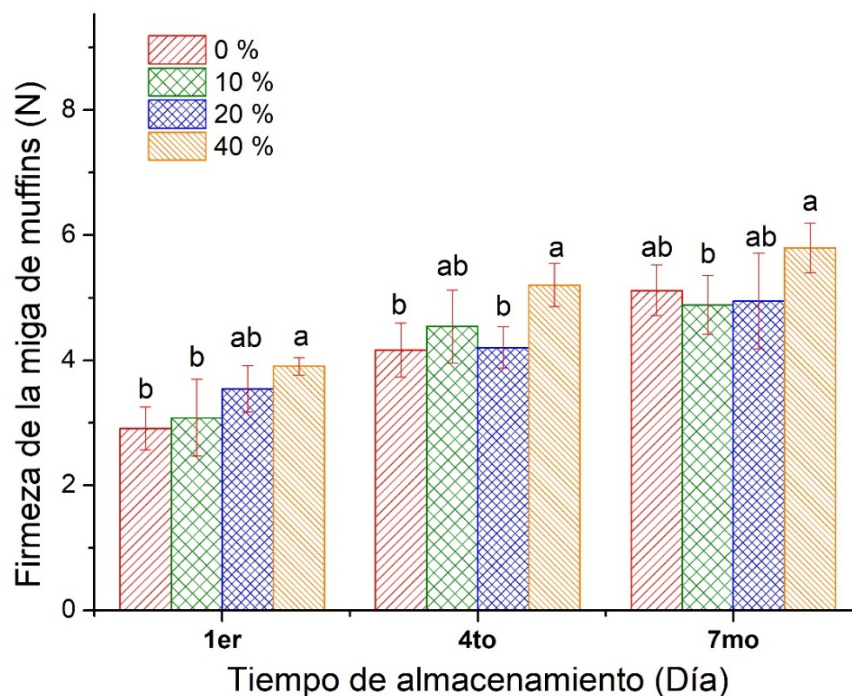


FIGURA 7.8. Firmeza de la miga de muffins en función de nivel de sustitución de polvo de pulpa de café, agrupados por día de almacenamiento. Los valores de medias (columnas con barras de error estándar) con la misma letra en el mismo día de almacenamiento no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, Tukey).

TABLA 7.10 Coeficientes de correlación de Pearson entre los indicadores tradicionales de cualidades de horneado y parámetros de los barridos de frecuencia y temperatura inicial de gelatinización

	$G'\omega_1$	a	$G''\omega_1$	b	$\tan \delta$	T_0
Peso	ns	ns	0.57+	-0.59*	ns	-0.60*
Altura	-0.73**	0.63*	-0.71*	0.78**	0.86**	0.78**
Volumen	-0.85**	0.70*	-0.83**	0.76**	0.78**	0.78**
Firmeza	0.75**	ns	0.73**	-0.84**	-0.88**	-0.79**

*, ** son significativos a $p < 0.05$ y 0.01 , respectivamente; + indica significancia a $p < 0.06$; y ns = no significativo; $G'\omega_1$ y $G''\omega_1$ ω_1 son los coeficientes de los módulos elásticos y viscosos a 1 Hz de frecuencia; a = exponente del coeficiente del módulo elástico; b = exponente del coeficiente del módulo viscoso; $\tan \delta (G''/G')$ = ángulo de fase a 1 Hz de frecuencia tomada de las curvas típicas de los barridos de frecuencia; T_0 = temperatura inicial de gelatinización de las rampas de temperatura.

8. CONCLUSIONES

La sustitución parcial de la harina de trigo por PPC afecta las propiedades reológicas de la masa, el gluten y batidos. La absorción de agua en el farinógrafo aumentó en un 1.7 % en el nivel de sustitución de PPC al 5 %. La recuperación elástica de gluten, en prueba de recuperación por compresión, disminuyó cuando aumentaron los niveles de PPC y se correlacionó positivamente ($r = 0.91$, $p < 0.0001$) con el volumen de pan. De manera similar, hubo un aumento en los módulos elásticos y la viscosidad en estado estacionario tanto en el gluten como en la masa debido a la mayor adición de fibra. En este caso, ambos se correlacionaron negativamente (TABLA 7.10) con el volumen de pan ($r = -0.93$, $p < 0.0001$). Con una sustitución del 5 % de PPC, la fibra dietética aumentó en un 89 % en comparación con el tratamiento control en pan. Con respecto a los muffins, al 40 % sustitución, el contenido de fibra aumentó 6.8 veces en comparación con los batidos del tratamiento control, por lo cual podríamos decir que mejoró el aporte nutricional con respecto a la fibra dietética. La firmeza de la miga también aumentó cuando aumentó la sustitución por PPC. Este primer enfoque se ha realizado sin aditivos de masa o pan (emulsionantes, enzimas, entre otros). Los resultados mostraron que el modelo mecánico de Kelvin-Voigt está relacionado con las propiedades viscoelásticas de la masa y el gluten con PPC, además del volumen del pan. Además, el modelo de la ley de potencia se ajustó a los datos experimentales de los barridos de frecuencia.

9. PERSPECTIVAS

De acuerdo con lo observado en el trabajo presente. Se sugiere la evaluación de la aceptación por parte del consumidor usando el nivel máximo, en el caso de este estudio fue del 5 % en pan y 40 % en muffins, además se podrían lograr niveles más altos de sustitución usando aditivos para masa y pan para no afectar las características del producto final y enmascarar los sabores para el sabor terroso en niveles más altos de sustitución en pan y el sabor condimentado en muffins de chocolate. También se sugiere una evaluación sobre el índice glucémico, una determinación de fenoles totales y una evaluación de la actividad antioxidante de los panes y muffins.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AACCI International Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 10-10.03. Optimized straight-dough bread-making method. Approved November 8, 1995. Method 32-07.01. Soluble, insoluble, and total dietary fiber in foods and food products. Approved October 16, 1991. Method 38-12.02. Wet gluten, dry gluten, water-binding capacity, and gluten index. Approved November 8, 2000. Method 54-21.02. Rheological Behavior of flour by farinograph: constant flour weight procedure. Approved January 6, 2011. Method 66-20.01. Determination of granularity of semolina and farina: sieving method. Approved November 3, 1999. <http://methods.aaccnet.org/>
- AIB. (2019). American Institute of Baking standard procedure, muffins firmness and elasticity. En *AIB International*. Manhattan, KS, USA.
- Anil, M. (2007). Using of hazelnut testa as a source of dietary fiber in breadmaking. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 61-67. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.05.003
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (Horwitz, W. y Latimer, G. Eds. 18 ed.). Gaithersburg, Mary Land 20877-2417, USA: AOAC INTERNATIONAL.
- Aydogdu, A., Sumnu, G. y Sahin, S. (2018). Effects of addition of different fibers on rheological characteristics of cake batter and quality of cakes. *Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 667-677. doi:10.1007/s13197-017-2976-y
- Baldino, N., Laitano, F., Lupi, F. R., Curcio, S. y Gabriele, D. (2018). Effect of HPMC and CMC on rheological behavior at different temperatures of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flours. *European Food Research and Technology*, 244(10), 1829-1842. doi:<https://doi.org/10.1007/s00217-018-3096-2>
- Barnes, H. A. (2000). *A handbook of elementary rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Aberystwyth Wales The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
- Bisen, P., Sinha, N., Dixit, M., Jadhav, I., Srivastava, D., Kolli, V. y Emerald, M. (2016). Therapeutic and Preventive Potential of Functional Food and Cancer. *Journal of Cancer Science and Research*, 1. doi:10.4172/2576-1447.1000e101
- Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A. y Soldán, M. (2017). Utilization of waste from coffee production. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 25(40), 91-101. doi:10.1515/rput-2017-0011

- Boita, E. R. F., Oro, T., Bressiani, J., Santetti, G. S., Bertolin, T. E. y Gutkoski, L. C. (2016). Rheological properties of wheat flour dough and pan bread with wheat bran. *Journal of Cereal Science*, 71, 177-182. doi:10.1016/j.jcs.2016.08.015
- Bonnand-Ducasse, M., Della Valle, G., Lefebvre, J. y Saulnier, L. (2010). Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties. *Journal of Cereal Science*, 52(2), 200-206.
- Bozdogan, N., Kumcuoglu, S. y Tavman, S. (2019). Investigation of the effects of using quinoa flour on gluten-free cake batters and cake properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 683-694.
- Chapman, S. J., Mulvaney, S. J., Chinnaswamy, R., Rayas-Duarte, P. y Allvin, B. (2012). Large deformation stress relaxation and compression-recovery of gluten representing different wheat classes. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 366-372. doi:10.1016/j.jcs.2012.01.012
- Chompoorat, P., Hernández-Estrada, Z. J., Mulvaney, S. J., Payton, M. E., Lavine, B. K., Fasasi, A. y Rayas-Duarte, P. (2018). Comparison of rheological properties of wet gluten: Creep-recovery and biaxial compression. *LWT - Food Science and Technology*, 98, 197-203. doi:10.1016/j.lwt.2018.08.036
- Chompoorat, P., Kantanet, N., Hernandez-Estrada, Z. J. y Rayas-Duarte, P. (2020). Physical and Dynamic Oscillatory Shear Properties of Gluten-Free Red Kidney Bean Batter and Cupcakes Affected by Rice Flour Addition. *Foods*, 9(5). doi:10.3390/foods9050616
- Chompoorat, P., Rayas-Duarte, P., Hernandez-Estrada, Z. J., Phetcharat, C. y Khamsee, Y. (2018). Effect of heat treatment on rheological properties of red kidney bean gluten free cake batter and its relationship with cupcake quality. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4937-4944. doi:10.1007/s13197-018-3428-z
- Chouaibi, M., Rezig, L., Boussaid, A. y Hamdi, S. (2019). Insoluble tomato-fiber effect on wheat dough rheology and cookies' quality. *Italian Journal of Food Science*, 31(1).
- Deka, S. C., Seth, D. y Hulle, N. R. S. (2019). *Technologies for Value Addition in Food Products and Processes*. Boca Raton FL USA: CRC Press.
- Dobraszczyk, B. J. y Morgenstern, M. P. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229-245. doi:10.1016/s0733-5210(03)00059-6
- Duangjai, A., Suphrom, N., Wungrath, J., Ontawong, A., Nuengchamngong, N. y Yosboonruang, A. (2016). Comparison of antioxidant, antimicrobial activities

and chemical profiles of three coffee (*Coffea arabica* L.) pulp aqueous extracts. *Integrative Medicine Research*, 5(4), 324-331. doi:10.1016/j.imr.2016.09.001

Edwards, N., Dexter, J., Scanlon, M. y Cenkowski, S. (1999). Relationship of creep-recovery and dynamic oscillatory measurements to durum wheat physical dough properties. *Cereal Chemistry*, 76(5), 638-645.

Esquivel, P. y Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46(2), 488-495. doi:10.1016/j.foodres.2011.05.028

FAO. (2021). World food situation. Consultado en <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>

FAOSTAT. (2019, 10-12-2020). Wheat production statistics. Consultado en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

Faubion, J. M. y Hosney, R. C. (1990). The viscoelastic properties of wheat flour doughs. En Faridi, H. y Faubion, J. M. (Eds.), *Dough rheology and baked product texture* (pp. 29-66): Van Nostrand Reinhold.

Fernandes, A. S., Mello, F. V. C., Thode Filho, S., Carpes, R. M., Honorio, J. G., Marques, M. R. C., . . . Ferraz, E. R. A. (2017). Impacts of discarded coffee waste on human and environmental health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 141, 30-36. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.03.011

Fu, Z.-q., Che, L.-m., Li, D., Wang, L.-j. y Adhikari, B. (2016). Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 324-331. doi:10.1016/j.lwt.2015.10.052

Gemechu, F. G. (2020). Embracing nutritional qualities, biological activities and technological properties of coffee byproducts in functional food formulation. *Trends in food science & technology*, 104, 235-261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.005>

Girard, A. L., Castell-Perez, M. E., Bean, S. R., Adrianos, S. L. y Awika, J. M. (2016). Effect of Condensed Tannin Profile on Wheat Flour Dough Rheology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(39), 7348-7356. doi:10.1021/acs.jafc.6b02601

Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W., Courtin, C., Gebruers, K. y Delcour, J. (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in food science & technology*, 16(1-3), 12-30.

Guglielmetti, A., Fernandez-Gomez, B., Zeppa, G. y del Castillo, M. D. (2019). Nutritional quality, potential health promoting properties and sensory perception of an improved gluten-free bread formulation containing inulin, rice protein and

bioactive compounds extracted from coffee byproducts. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(2).

- Han, W., Ma, S., Li, L., Zheng, X. y Wang, X. (2019). Gluten aggregation behavior in gluten and gluten-starch doughs after wheat bran dietary fiber addition. *LWT-Food Science and Technology*, 106, 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.051>
- Heimbach, J. T., Marone, P. A., Hunter, J. M., Nemzer, B. V., Stanley, S. M. y Kennepohl, E. (2010). Safety studies on products from whole coffee fruit. *Food and Chemical Toxicology*, 48(8-9), 2517-2525. doi:10.1016/j.fct.2010.06.025
- Hernández-Estrada, Z. J., Rayas-Duarte, P. y Cárdenas, J. d. D. F. (2017). Creep Recovery of Wet Gluten and High-Molecular-Weight Glutenin Subunit Composition: Relationship with Viscoelasticity of Dough and Breadmaking Quality of Hard Red Winter Wheat. *Cereal Chemistry* 94(2), 223-229. doi:10.1094/cchem-03-16-0049-r
- Hernández-Estrada, Z. J., Rayas-Duarte, P., Figueroa, J. D. C. y Morales-Sánchez, E. (2014). Creep recovery tests to measure the effects of wheat glutenins on doughs and the relationships to rheological and breadmaking properties. *Journal of Food Engineering*, 143, 62-68. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.034
- Hesso, N., Garnier, C., Loisel, C., Chevallier, S., Bouchet, B. y Le-Bail, A. (2015). Formulation effect study on batter and cake microstructure: Correlation with rheology and texture. *Food Structure*, 5, 31-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foostr.2015.03.002>
- Huang, Z., Wang, J. J., Chen, Y., Wei, N., Hou, Y., Bai, W. y Hu, S. Q. (2020). Effect of water-soluble dietary fiber resistant dextrin on flour and bread qualities. *Food Chem*, 317, 126452. doi:10.1016/j.foodchem.2020.126452
- ICO. (2020, 10 02 2021). Crop year production by country. Consultado en <http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>
- ISO. (2008). Determination of the caffeine content using high performance liquid chromatography (HPLC) En *Coffee and coffee products* Geneva, Switzerland: ISO International Standards.
- Janissen, B. y Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 110-117. doi:10.1016/j.resconrec.2017.10.001
- Kirbaş, Z., Kumcuoglu, S. y Tavman, S. (2019). Effects of apple, orange and carrot pomace powders on gluten-free batter rheology and cake properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 914-926.

- Krishnan, J. M., Deshpande, A. P. y Kumar, P. B. S. (2010). *Rheology of Complex Fluids* (Deshpande, A. P., Krishnan, J. M. y Kumar, P. B. S. Eds. 1 ed.): Springer, New York, NY.
- Kulp, K. y Jr, G. P. J. (2000). *Handbook of cereal science and technology* (2 ed.). 270 Madison Avenue, New York, NY 10016: CRC Press.
- Kumar, S. y Krishnan, V. (2017). Phytochemistry and functional food: The needs of healthy life. *Journal of Phytochemistry and Biochemistry*, 1, 103. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/321805692_Phytochemistry_and_Functional_Food_The_Needs_of_Healthy_Life
- Magoni, C., Bruni, I., Guzzetti, L., Dell'Agli, M., Sangiovanni, E., Piazza, S., . . . Labra, M. (2018). Valorizing coffee pulp by-products as anti-inflammatory ingredient of food supplements acting on IL-8 release. *Food Research International*, 112, 129-135. doi:10.1016/j.foodres.2018.06.026
- Menard, K. P. (1999). *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction*. 1999 (2 ed.). 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press
- Mironeasa, S. y Codina, G. G. (2019). Dough Rheological Behavior and Microstructure Characterization of Composite Dough with Wheat and Tomato Seed Flours. *Foods*, 8(12). doi:10.3390/foods8120626
- Mironeasa, S., Iuga, M., Zaharia, D. y Mironeasa, C. (2018). Rheological Analysis of Wheat Flour Dough as Influenced by Grape Peels of Different Particle Sizes and Addition Levels. *Food and Bioprocess Technology*, 12(2), 228-245. doi:10.1007/s11947-018-2202-6
- Moore, M. M., Schober, T. J., Dockery, P. y Arendt, E. K. (2004). Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal Chemistry*, 81(5), 567-575. doi:10.1094/CCHEM.2004.81.5.567
- Murthy, P. S. y Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58. doi:10.1016/j.resconrec.2012.06.005
- Murthy, P. S. y Naidu, M. M. (2010). Recovery of Phenolic Antioxidants and Functional Compounds from Coffee Industry By-Products. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), 897-903. doi:10.1007/s11947-010-0363-z
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S. y Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661-672. doi:10.1007/s11947-011-0565-z

- Nawrocka, A., Szymanska-Chargot, M., Mis, A., Wilczewska, A. Z. y Markiewicz, K. H. (2017). Aggregation of gluten proteins in model dough after fibre polysaccharide addition. *Food Chem*, 231, 51-60. doi:10.1016/j.foodchem.2017.03.117
- NOM-247-SSA1-, N. O. M. (2008). Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. *Métodos de prueba*.
- Ontawong, A., Boonphang, O., Pasachan, T., Duangjai, A., Pongchaidecha, A., Phatsara, M., . . . Srimaroeng, C. (2019). Hepatoprotective effect of coffee pulp aqueous extract combined with simvastatin against hepatic steatosis in high-fat diet-induced obese rats. *Journal of Functional Foods*, 54, 568-577. doi:10.1016/j.jff.2019.02.011
- Orrego, D., Zapata-Zapata, A. y Kim, D. (2018). Optimization and Scale-Up of Coffee Mucilage Fermentation for Ethanol Production. *Energies*, 11(4). doi:10.3390/en11040786
- Parada, A. y Araya, M. (2010). El gluten: Su historia y efectos en la enfermedad celíaca. *Revista médica de Chile*, 138(10), 1319-1325. Consultado en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872010001100018&nrm=iso
- Pequeno, D. N. L., Hernandez-Ochoa, I. M., Reynolds, M., Sonder, K., Molero-Milan, A., Robertson, R., . . . Asseng, S. (2021). Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054070. doi:10.1088/1748-9326/abd970
- Peressini, D. y Sensidoni, A. (2009). Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. *Journal of Cereal Science*, 49(2), 190-201. doi:10.1016/j.jcs.2008.09.007
- Preston, K. R. y Williams, P. C. (2003). Analysis of wheat flours. En Caballero, B., Trugo, L. y Finglas, P. (Eds.), *Encyclopedia of food sciences and nutrition* (2 ed., pp. 6601). Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Ramirez-Coronel, M. A., Marnet, N., Kolli, V. K., Roussos, S., Guyot, S. y Augur, C. (2004). Characterization and estimation of proanthocyanidins and other phenolics in coffee pulp (*Coffea arabica*) by thiolysis- high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(5), 1344-1349. doi:10.1021/jf035208t
- Ramirez-Coronel, M. A., Torres Mancera, M. T., Augur, C. y Saucedo-Castañeda, G. (2007). *Estudio del contenido de ácidos hidroxinámicos de la pulpa del café para su biotransformación*. Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Av. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra Secc, Iztapalapa, 09340 Ciudad

de México, CDMX. Retrieved from https://smbb.mx/congresos%20smbb/morelia07/TRABAJOS/Area_II/Carteles/CII-61.pdf

- Ramirez-Martinez, J. R. (1988). Phenolic compounds in coffee pulp: quantitative determination by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 43(2), 135-144. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740430204>
- Remes-Troche, J., Uscanga-Domínguez, L., Aceves-Tavares, R., de la Barca, A. C., Carmona-Sánchez, R., Cerda-Contreras, E., . . . Milke-García, M. (2018). Clinical guidelines on the diagnosis and treatment of celiac disease in Mexico. *Revista de Gastroenterología de México (English Edition)*, 83(4), 434-450. doi:10.1016/j.rgmexen.2018.09.007
- Rodríguez-Sandoval, E., Fernández-Quintero, A. y Cuvelier, G. (2009). Stress relaxation of reconstituted cassava dough. *LWT - Food Science and Technology*, 42(1), 202-206. doi:10.1016/j.lwt.2008.03.007
- Rodríguez, E. P. (2012). Industria Alimentaria. Parámetros industriales de la calidad del trigo y de la harina. Consultado en <https://edgardopedullarodriguez.wordpress.com/tag/alveograma/>
- Ronda, F., Pérez-Quirce, S., Angioloni, A. y Collar, C. (2013). Impact of viscous dietary fibres on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: A fundamental and empirical rheological approach. *Food Hydrocolloids*, 32(2), 252-262. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.01.014
- Ronda, F., Pérez-Quirce, S. y Villanueva, M. (2017). Rheological properties of gluten-free bread doughs: relationship with bread quality. En Ahmed, J., Ptaszek, P. y Basu, S. (Eds.), *Advances in food rheology and its applications* (pp. 297-334): Woodhead Publishing.
- Rosas-Sanchez, G. A., Hernandez-Estrada, Z. J., Suarez-Quiroz, M. L., Gonzalez-Rios, O. y Rayas-Duarte, P. (2021). Coffee Cherry Pulp by-Product as a Potential Fiber Source for Bread Production: A Fundamental and Empirical Rheological Approach. *Foods*, 10(4). doi:10.3390/foods10040742
- Saghafi, Z., Naeli, M. H., Bahmaei, M., Tabibiazar, M. y Zargaraan, A. (2019). Zero-trans cake shortening: effects on batter, texture and sensory characteristics of high ratio cake. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4), 3040-3048. doi:<https://doi.org/10.1007/s11694-019-00226-0>
- Sakhare, S. D. y Prabhasankar, P. (2017). Effect of Roller Mill Processed Fenugreek Fiber Addition on Rheological and Bread Making Properties of Wheat Flour Doughs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4). doi:10.1111/jfpp.13012

- Sanz, T., Salvador, A. y Hernández, M. J. (2017). Creep–Recovery and Oscillatory Rheology of Flour-Based Systems. En Ahmed, J., Ptaszek, P. y Basu, S. (Eds.), *Advances in Food Rheology and Its Applications* (pp. 277-295). Duxford: Woodhead Publishing.
- Sayaslan, A. (2004). Wet-milling of wheat flour: industrial processes and small-scale test methods. *LWT-Food Science and Technology*, 37(5), 499-515. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.01.009>
- Scheuer, P. M., Francisco, A., Miranda, M. Z. y Limberger, V. M. (2011). Trigo: características e utilização na panificação. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 13(2), 211-222. doi:10.15871/1517-8595/rbpa.v13n2p211-222
- Seydi, A., Mehmet, Ş., Aysun, G. A., Sümerya, H. y Seyfi, T. (2015). Relationships between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. *Journal of Bahri Dagdas Crop Research*, 3(1), 14-18. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/323485590_Relationships_between_Farinograph_Parameters_and_Bread_Volume_Physicochemical_Traits_in_Bread_Wheat_Flours/link/5c41c09a458515a4c72f4146/download
- Shewry, P. R., Halford, N. G., Belton, P. S. y Tatham, A. S. (2002). The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 357(1418), 133-142. doi:10.1098/rstb.2001.1024
- Singh, J. P., Kaur, A., Shevkani, K. y Singh, N. (2015). Influence of jambolan (*Syzygium cumini*) and xanthan gum incorporation on the physicochemical, antioxidant and sensory properties of gluten-free eggless rice muffins. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(5), 1190-1197. doi:10.1111/ijfs.12764
- Singh, S., Chauhan, E. S., Agarwal, S. y Rajora, T. (2020). Development of iron rich muffin and its acceptability evaluation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(1), 104-107. Consultado en <https://www.phytojournal.com/archives/2020/vol9issue1/PartB/8-6-249-517.pdf>
- Sissons, M. (2016). GlutoPeak: A Breeding Tool for Screening Dough Properties of Durum Wheat Semolina. *Cereal Chemistry Journal*, 93(6), 550-556. doi:10.1094/cchem-03-16-0063-r
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. 2807 Still Valley Dr. East Lansing, MI 48823 USA: Freeman Press.
- Torres-Mancera, M. T., Cordova-López, J., Rodríguez-Serrano, G., Roussos, S., Ramírez-Coronel, M., Favela-Torres, E. y Saucedo-Castañeda, G. (2011). Enzymatic extraction of hydroxycinnamic acids from coffee pulp. *Food*

Technology and Biotechnology, 49(3), 369-373. Consultado en <https://hrcak.srce.hr/71067>

- Wirkijowska, A., Zarzycki, P., Sobota, A., Nawrocka, A., Blicharz-Kania, A. y Andrejko, D. (2020). The possibility of using by-products from the flaxseed industry for functional bread production. *LWT-Food Science and Technology*, 118, 108860. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108860>
- Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F. y Toreti, A. (2017). Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064008. doi:10.1088/1748-9326/aa723b
- Zhou, Y., Dhital, S., Zhao, C., Ye, F., Chen, J. y Zhao, G. (2021). Dietary fiber-gluten protein interaction in wheat flour dough: Analysis, consequences and proposed mechanisms. *Food Hydrocolloids*, 111. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106203

11. ANEXO

Article

Coffee Cherry Pulp by-Product as a Potential Fiber Source for Bread Production: A Fundamental and Empirical Rheological Approach

Gustavo Armando Rosas-Sánchez ^{1,2} , Zorba Josué Hernández-Estrada ^{1,*}, Mirna Leonor Suárez-Quiroz ¹, Oscar González-Ríos ¹ and Patricia Rayas-Duarte ^{2,*}

¹ Tecnológico Nacional de México/IT de Veracruz, Calz. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, 91860 Veracruz, Mexico; armando.rosag@gmail.com (G.A.R.-S.); mirna.sq@veracruz.tecnm.mx (M.L.S.-Q.); oscar.gr@veracruz.tecnm.mx (O.G.-R.)

² Robert M. Kerr Food and Agricultural Products Center, Biochemistry and Molecular Biology Department, Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078, USA

* Correspondence: zorba.he@veracruz.tecnm.mx (Z.J.H.-E.); pat_rayas-duarte@okstate.edu (P.R.-D.)

Abstract: Effects of substituting of wheat flour with coffee cherry pulp powder (CCPP) (coffee by-product as fiber source) at 0, 1.2, 2.3, and 4.7% dry basis (0, 1.25, 2.5, and 5% wet basis) on dough and gluten rheological properties and baking quality were investigated. Rheological properties were analyzed during mixing, compression recovery, and creep-recovery. A rheological approach was adopted to study the viscoelasticity of dough enriched with fiber. The data obtained were analyzed with the Kelvin–Voigt model and the parameters were correlated to bread volume and crumb firmness to assess the effect of incorporating CCPP. A decrease in gluten’s elastic properties was attributed to the water-binding and gelling properties of CCPP. Stiffness of dough and crumb firmness increased as the level of CCPP increased and bread volume decreased. Stiffer dough corresponded with lower compliance values and higher steady state viscosity compared to the control. A follow-up study with 5% CCPP and additives is recommended to overcome the reduction in elastic recovery and bread volume.

Keywords: coffee pulp; by-products; rheological characterization; viscoelasticity; creep recovery; wheat; gluten



Citation: Rosas-Sánchez, G.A.; Hernández-Estrada, Z.J.; Suárez-Quiroz, M.L.; González-Ríos, O.; Rayas-Duarte, P. Coffee Cherry Pulp by-Product as a Potential Fiber Source for Bread Production: A Fundamental and Empirical Rheological Approach. *Foods* **2021**, *10*, 742. <https://doi.org/10.3390/foods10040742>

Academic Editor: Francesca Venturi

Received: 26 February 2021

Accepted: 27 March 2021

Published: 1 April 2021

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Coffee is a popular beverage and arguably one of the most traded commodities in the world. Due to the high demand for coffee, large amounts of by-products such as pulp, silver skin, and parchment are generated. According to the International Coffee Organization, in 2019, about 10 million tons of fresh coffee were produced globally. It implies the generation of approximately 3 million tons of coffee cherry pulp (CCP) as a by-product and represents a severe environmental problem. Additionally, CCP contains fiber, minerals, amino acids, and polyphenolic compounds potentially beneficial for human nutrition [1]. Several studies have analyzed CCP’s chemical composition, reporting that the dried material has about 10% crude protein, 21% crude fiber, 8% ash, and 44% nitrogen-free extract; these values change according to coffee variety, location, and agricultural practices [2]. Furthermore, hydroxycinnamic acids as chlorogenic, caffeic, and ferulic acid in CCP are of interest for their antioxidant properties, which neutralize excess free radicals to prevent cell damage from free radicals [3,4].

On the other hand, bakery products are highly consumed worldwide, usually elaborated with refined flours, deficient dietary fiber, and other nutrients [5]. So, CCP could be used as an ingredient in fiber-deficient bakery products. Bakery products are technologically demanding, and changes in their formulation or process could affect their quality.

Fiber modifies the rheological properties of dough and bread quality [6]. It is well known that the food matrix's viscoelasticity or rheological behavior is related to the composition, structure, and stability; therefore, the rheological characterization of a food matrix and its components is overriding for predicting food quality [7].

In the breadmaking process, the dough is subjected to different deformation types during mixing, fermentation, rolling and shaping, proofing, and baking [8], and even when we chew it. This is why, rheological studies are helpful research tools to determine the dough's behavior and estimate the interrelations between flour composition, ingredients functionality, process parameters, and loaf characteristics [8].

Empirical tests conducted with the farinograph, alveograph, and extensograph are widely used in the baking industry as tools to predict baking quality while fundamental rheological tests continue probing it [9–13]. The creep recovery test measures the material's viscoelasticity by applying constant stress during a determined time [14]. Many researchers have tried to understand gluten and dough's viscoelastic behavior by modeling experimental data using the Burgers model with Maxwell and Kelvin elements [10,12,13,15–17]; the model's values were correlated with breadmaking quality [6,13]. Because of the complexity of the protein network in gluten, the viscoelastic behavior for a breadmaking quality can change among wheat cultivars, new bread formulations, and storage.

Creep and recovery tests have been widely used to measure the impact of dietary fiber on the viscoelastic behavior of rice flour doughs [18], the effect of high molecular weight glutenin subunits in gluten and its relationship with the quality of bread [13], rheological, and functional properties of red bean flour of gluten-free batter for cupcakes [17]. Other authors investigated the effect of flour substitution by bran with different particle sizes on dough rheology. They reported a significant effect of substitution level and a minor effect of particle size [19]. In general, fiber added to flour affects the gluten-starch interaction, reduces swelling of starch granules and its availability for gelatinization, compels gas cells to expand, and adversely affects dough viscoelastic behavior constraining dough availability to trap gas [20]. It is of interest to assess the CCPP by-product in food applications and specifically in baked products. By assessing the influence of CCPP in gluten and non-gluten components of dough, a comparison can be made on the changes in dough's viscoelasticity and stiffness, both essential attributes in the baking process [13]. Thus, the objective of this study was to investigate the effect of CCPP on the wheat dough and gluten rheological properties and baking quality without any other additives.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Decaffeinated CCPP (Pulphari) was obtained from Grupo Techver S.A. de C.V. (Veracruz, Mexico). Commercial Spring wheat flour (enriched, bleached) was donated by Shawnee Milling Company (Shawnee, OK, USA).

The particle size of CCPP was further reduced with an impact-type mill (Kitchen Mill, Blendtec, Orem, UT, USA), sieved (screen number 100) to obtain a more homogeneous powder then stored in closed containers at room temperature until needed for analyses. In total, three levels of wheat flour substitution by CCPP were used 0, 1.25, 2.5, and 5% wet basis (0, 1.2, 2.3, and 4.7% dry basis). These levels were selected from results of preliminary experiments with levels up to 30% CCPP. At CCPP substitution levels greater than 5%, the bread had a grassy and earthy aftertaste, and in samples with substitution levels greater than 10%, the dough was difficult to handle.

2.2. Flour and CCPP Analysis

CCPP and wheat flour were evaluated according to the Association of Official Agricultural Chemists (now AOAC International) Official Methods [21] for protein (920.87), moisture (925.10), ash (923.03), and fat (945.16). Soluble and insoluble dietary fiber were evaluated by the American Association of Cereal Chemists International (AACCI) Official Method 32-07.01 [22] and AOAC 991.43 [21]. The proximate composition of flour was

provided by Shawnee Milling Co. (Shawnee, OK, USA). The particle size of CCPP flour was analyzed with AACCI method 66-20.01 [22] to obtain particles lower than 150 μm . Flour blends were thoroughly mixed, and their rheological behavior determined by AACCI Approved Method 54-21.02 [22] to obtain water absorption at 500 Brabender Units (BU) of consistency, development time, stability time, and mix tolerance index during mixing using a Farinograph-E (C.W. Brabender Instruments, South Hackensack, NJ, USA). High values of development and stability times are key indicators of dough strength.

Caffeine Concentration in CCPP

Caffeine was analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC) Shimadzu (Model LC-20AD/T LPGE Kit Shimadzu Co., Kyoto, Japan) using the method of the International Organization for Standardization (ISO) 20481 [23], and an aqueous extraction of 1 ± 0.001 g of CCPP in 250 mL of water. The mixture was heated in a water bath for 20 min at 90 °C and filtered through 0.20 μm nylon membrane (SUNSri, Wilmington, NC, USA). The mobile phase was 24% methanol and 76% water (*v/v*) at a flow rate of 1.0 mL/min, and the injection volume was 10 μL , using a RP-18 (Reverse Phase) column with isocratic elution and the absorbance recorded at 272 nm with an UV detector. The caffeine content was calculated with anhydrous caffeine ($\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}_2\text{N}_4$) as external standard (Fermont Chemical Company, Monterrey, Nuevo Leon, Mexico).

2.3. Sample Preparation for Rheology Test

2.3.1. Gluten Samples Preparation

According to AACCI Approved Method 38-12.02 [22], the extraction of wet gluten was carried out with a Glutomatic System (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) model 2200 with 20 g NaCl/L aqueous solution. Briefly, a 10-g flour sample was made into a dough; starch and other components were removed by washing the dough with the salt solution. The wet gluten obtained was at its intrinsic water-binding capacity.

2.3.2. Dough Sample Preparation

The dough was prepared at constant water absorption using the value of flour without CCPP obtained in the farinograph. Samples were prepared in a modified Mixograph (National Manufacturing, Lincoln, NE, USA) equipped with a 10 g bowl and mixed for 4 min.

2.4. Compression-Recovery, Bi-Axial Deformation

Gluten samples were shaped as previously reported [17] using a Perten Centrifuge 2015 at $2430 \times g$ for 1 min (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden). A compression-recovery based on biaxial deformation was performed using a gluten compression-relaxation (Gluten CORE) Analyzer (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden) with the following conditions: velocity start 20 mm/s, compression rate 4 mm/s, target force 0.5 N, target force compression 8 N, compression time 5 s, target force recovery 0.2 N, and recovery time 55 s. Gluten elastic recoverability was reported as elastic recovery in percentage.

2.5. Dough and Gluten Sample Loading for Creep and Recovery Test

Freshly extracted gluten and prepared dough samples with different substitution levels of CCPP were relaxed under a press of 2.5 kg top plate with a 2.5 mm gap for 40 min at room temperature as reported [13]. A 25 mm gluten and dough disc were loaded into an AR1000 rheometer (TA Instruments, New Castle, DE, USA). A parallel hatched plate (diameter = 25 mm) geometry was used with a 2.5 mm gap, and the temperature was kept constant at 25 °C. The gluten and dough discs were retrimmed, and the edges covered with mineral oil to prevent moisture loss during the test. The constant stress of 100 Pa was applied for 100 s in the creep phase, and the strain was recorded in the recovery phase (without stress) during 100 s to measure the deformation response of gluten and dough samples (within the linear viscoelastic region).

2.6. Modeling of Viscoelastic Properties of Bread Dough and Gluten

An analog mechanical model composed of the concepts of springs (Hookean bodies) and dashpots (fluid bodies) was used to study the viscoelastic behavior of bread dough and gluten. The Kelvin–Voigt generalized model of six elements was used to describe experimental data:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma_0}{G_0} + \frac{\sigma_0}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) + \frac{\sigma_0}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_0} t \quad (1)$$

where $\gamma(t)$ is the strain as a function of time, σ_0 is the applied stress, G_0 is the elastic modulus for the Hookean body response; G_1 and G_2 are elastic moduli of the first and second retarded elastic response (first and second Kelvin–Voigt elements, respectively). η_0 is the steady state viscosity [13]. $\lambda_1 = \eta_1/G_1$ and $\lambda_2 = \eta_2/G_2$ are the first and second retardation time required to achieve 63.21% of deformation in the expected creep of the specific Kelvin–Voigt element. The η_1 and η_2 are the viscous response of the first and second retarded elastic deformation, respectively, of the Kelvin–Voigt element's dashpot. In terms of shear compliance:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = J_0 + J_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) + J_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}\right) + \frac{t}{\eta_0} \quad (2)$$

where $J(t)$ is the compliance (1/Pa), J_0 is the compliance at zero time, J_1 and J_2 are the compliances in the first and second retarded elastic response, respectively. After removing the shear stress, the recovery curve was analyzed with a similar equation for recovery compliance $J_r(t)$; as there is no viscous flow in the recovery phase, the equation only has five elements [13].

$$J_r(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = J_{r0} + J_{r1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_{r1}}}\right) + J_{r2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_{r2}}}\right) \quad (3)$$

where $J_r(t)$ is the compliance (1/Pa) at the recovery phase, J_{r0} is the compliance at zero time at the recovery phase, J_{r1} and J_{r2} are the compliance in the first and second retarded elastic response at the recovery phase and λ_{r1} , λ_{r2} are the first and second retarded elastic response at the recovery phase.

2.7. Bread Baking Quality

AACC Approved Method 10-10.03 [22] for optimized bread-baking test for evaluating wheat flour quality was carried out with 1-pound loaves. Loaf height, weight, and volume were measured 1 h after baking. Volume was measured by rapeseed displacement following Approved Method 10-05.01 [22]. Bread crumb firmness was measured on days 1, 4, and 7 of storage at room temperature (25 °C) according to the American Institute of Baking (now AIB International) Standard Procedure for White Pan Bread [24] using 25% of height compression in two bread slices of 12.5 mm thickness. A 25 mm round probe and 10 g force of compression were used.

2.8. Statistical Analysis

Creep recovery curves were fitted with Origin Pro 9.1 software (OriginLab, Northampton, MA, USA) using nonlinear regression analyses. Analysis of variance, multiple means comparison ($p < 0.05$, Tukey), and Pearson's correlations were performed with JMP Pro 14.0.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Wheat Flour and CCPP Analysis

Table 1 contains the proximate and caffeine analyses of CCPP and wheat flour. CCPP total dietary fiber was 44% (10% soluble fiber and 34% insoluble fiber) and caffeine 0.04% (Appendix A Figure A1, shows an example of a chromatogram for caffeine content analysis).

The CCPP substitutions yielded flour blends with a significant increase in dietary fiber (by 22, 44, and 89%) and ash (by 3.6, 7.1, and 14.3%) for 1.25, 2.5, and 5% levels, respectively, compared to wheat flour control.

Table 1. Coffee cherry pulp powder (CCPP) and wheat flour proximate and caffeine analyses *.

Compounds	CCPP (g/100 g)	Wheat Flour (g/100 g)
Moisture	6.1 ± 0.0	12.6
Protein	9.7 ± 0.1	11.7
Dietary fiber	44.5 ± 0.6	2.37
Ash	4.2 ± 0.1	1.09
Lipids	1.5 ± 0.0	<1.0
Caffeine ***	0.04 ± 0.0	n.a.
Total carbohydrates **	78.7	73.5

* Means of two independent analysis. n.a. = not analyzed. ** Total carbohydrates were calculated by difference.

*** Appendix A Figure A1.

3.2. Water Absorption and Mixing Properties

Table 2 shows farinograph results of doughs with different levels of substitution of CCPP. The percentage of water absorption (WA) for dough formation increased by 1.7% at the last level of CCPP substitution (5%) compared to the control. Changes in the water absorption are due to the increase in fiber content; the flour with 5% of CCPP had a 4.5% increase in total dietary fiber. These results agree with other reports with similar trends when wheat bran [25] and commercial insoluble tomato fiber [26] were added to wheat flour. Anil [6] suggested that this was explained by hydroxyl groups in the structure of fiber-forming more interaction with water via hydrogen bonds by adding hazelnut fiber in bakery products. The development and stability times are values that indicate the dough's strength; high values suggest strong doughs. In contrast to Anil's results [6], the addition of CCPP significantly decreased development and stability times (Tukey, $p < 0.05$) by 30 and 48%, respectively. Our results agree with Boita and collaborators [25], who reported a significant decrease in development time and stability, and increased mixing tolerance index with wheat bran. This may be explained in part by fiber hindering the formation of disulfide bonds between wheat proteins resulting in reduced molecular size [27], weakening their cohesion, and decreasing gluten development. The highest Mixing Tolerance Index (in BU) is on samples with the higher concentration of added CCPP (5%). High values of Mixing Tolerance Index are related to weak doughs [28].

Table 2. Mixing properties and water absorption of flour blends *.

CCPP Substitution Level (% Wet Basis)	Water Absorption (%)	Development Time (min)	Stability Time (min)	Mixing Tolerance Index (BU)	Time to Break Down (min)
0 (Control)	62.1 ± 0.1 a	11.0 ± 1.7 a	16.3 ± 1.7 a	19.7 ± 3.2 a	18.9 ± 1.7 a
1.25	62.2 ± 0.1 a	9.4 ± 0.5 ab	9.8 ± 0.8 b	39.7 ± 4.0 b	12.5 ± 0.8 b
2.5	62.6 ± 0.1 b	8.4 ± 0.1 ab	8.7 ± 0.2 b	53.0 ± 2.6 c	11.1 ± 0.4 bc
5	63.8 ± 0.1 c	7.7 ± 0.3 b	8.2 ± 0.1 b	63.3 ± 5.7 c	9.8 ± 0.3 c

* Mean values ($n = 3 \pm$ standard deviation) within a column followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$, Tukey).

3.3. Compression-Recovery

Figure 1 shows results from compression-recovery test for the extracted gluten of doughs with different CCPP substitution levels. The elastic recovery, calculated as the ratio of the total height recovered to the compressed height [29], decreased significantly ($p < 0.05$) by 4, 8, and 17% (1.25, 2.5, and 5% of CCPP, wet basis, respectively). Changes of greater magnitude in gluten elastic recovery compared to the mixing farinograph parameters suggest a larger effect of fiber in gluten than dough. Appendix B Table A1 shows the Pearson's correlation coefficients, with their respective p -values, between the rheological and bread

quality parameters. Elastic recovery was positively correlated ($r = 0.91, p < 0.0001$) with bread volume.

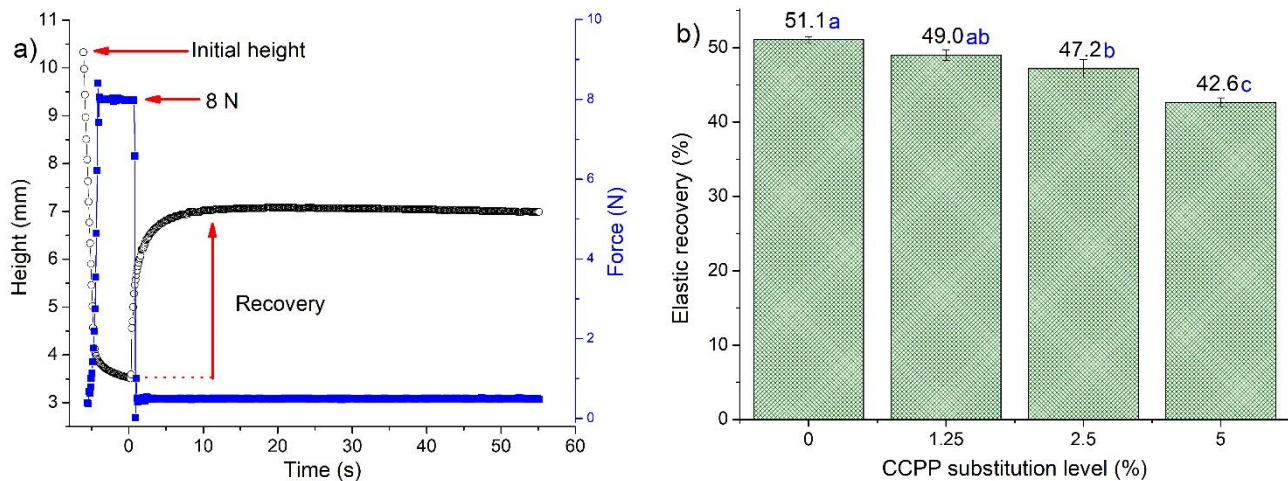


Figure 1. The elastic recovery of gluten from dough containing coffee cherry pulp powder (CCPP). (a) Typical compression-recovery curve. (b) Means (columns with standard error bar) with the same letter are not significantly different ($p < 0.05$, Tukey).

3.4. Creep-Recovery Test

Table 3 shows the estimated regressed parameters of the generalized Kelvin–Voigt model for the creep and recovery tests of dough and gluten with different substitution levels of CCPP. The fitting of experimental creep data by the Kelvin–Voigt model has an average R^2 of 0.96. The pure elastic component (G_0) in the creep phase is 1.7 and 2.8 times higher for wet gluten and dough, respectively, when 5% of CCPP was added to flour, compared with the controls. Similar trends were found by Mironaesa and collaborators [15] using grape peel fiber of different sizes on wheat dough rheology, in which the compliance associated with the pure elastic element decreased. Another study evaluated the effect of incorporating tomato seed flour in dough samples, finding that the pure elastic element's compliance decreased with the increased addition of tomato seed flour [15]. These observations can be explained in part by the reduction in disulfide bonds and molecular size of high molecular size aggregates, as reported with the addition of fiber to gluten and gluten–starch systems [27]. On the other hand, Hernandez-Estrada and collaborators [13] reported that non-gluten components mainly affect the purely elastic component, which provides firmness to the matrix.

G_1 and G_2 values increased 1.8 and 1.6 times, respectively, for gluten. A bigger increase was observed for G_1 and G_2 values for dough, which increased 3.6 and 3.8 fold, respectively, at 5% CCPP (wet basis) substitution compared to the control. The steady state viscosity increased 1.7 times when the CCPP substitution reached 5%. A higher value on elastic moduli indicates that more stress is needed to deform the sample, and, therefore, samples with higher substitution levels are stiffer than control. This can be seen graphically in Figure 2, where the curves were built with the Kelvin–Voigt model's average values. Samples with higher substitution levels have lower compliance and higher resistance to deformation than other levels. It was observed in both gluten and dough. The maximum strain in dough decreased 73% with 5% of CCPP compared to the control, in contrast to 41% decrease in gluten. Maximum deformation was lower in gluten compared to that of dough, and this could be attributed in part to a possible portion of the fiber that was solubilized and removed during the isolation of gluten, as suggested by other researchers [30]. Interestingly, the curves for gluten control and 1.25% CCPP overlapped while this was not observed in dough (Figure 2). The CCPP fiber might have more interaction with the carbohydrate fraction than the protein fraction, and the maximum strain can be evidence of that, as well as 1.25% has not reached the limit of measurable differences in gluten deformation.

Table 3. Estimated regressed parameters of the Kelvin–Voigt model for extracted gluten and dough with coffee cherry pulp powder (CCPP) substitution *.

Substitution Level	Gluten				Dough			
	0%	1.25%	2.5%	5%	0%	1.25%	2.5%	5%
Parameters	Creep Phase (Gluten)				Creep Phase (Dough)			
G_0 (Pa) $\times 10^3$	1.5 \pm 0.1 c	1.5 \pm 0.1 c	2.2 \pm 0.1 b	2.6 \pm 0.2 a	10.8 \pm 0.4 c	13.1 \pm 1.3 c	17.8 \pm 0.7 b	30.6 \pm 2.1 a
G_1 (Pa) $\times 10^3$	1.2 \pm 0.1 c	1.2 \pm 0.1 c	1.7 \pm 0.1 b	2.1 \pm 0.2 a	4.8 \pm 0.3 d	6.3 \pm 1.0 c	8.9 \pm 0.6 b	17.3 \pm 0.9 a
G_2 (Pa) $\times 10^3$	1.1 \pm 0.1 c	1.0 \pm 0.0 c	1.5 \pm 0.1 b	1.7 \pm 0.1 a	7.1 \pm 0.5 c	9.2 \pm 1.9 c	13.5 \pm 0.9 b	26.6 \pm 2.3 a
η_0 (Pa) $\times 10^5$	1 \pm 0.1 a	1 \pm 0.1 a	1.4 \pm 0.1 b	1.7 \pm 0.1 c	1.5 \pm 0.1 a	2.1 \pm 0.3 a	3.2 \pm 0.1 b	6.1 \pm 0.5 c
Max strain (%)	34.2 \pm 2.3 a	34.3 \pm 0.8 a	24.0 \pm 1.3 b	20.1 \pm 1.7 c	13.4 \pm 0.8 a	10.4 \pm 1.8 b	6.9 \pm 0.4 c	3.6 \pm 0.3 d
	Recovery Phase (Gluten)				Recovery Phase (Dough)			
Gr_0 (Pa) $\times 10^3$	1.3 \pm 0.1 c	1.3 \pm 0.1 c	1.8 \pm 0.1 b	2.2 \pm 0.2 a	5.5 \pm 0.1 c	6.9 \pm 0.8 c	9.5 \pm 0.6 b	17.5 \pm 1.3 a
Gr_1 (Pa) $\times 10^3$	1.1 \pm 0.1 c	1.1 \pm 0.1 c	1.6 \pm 0.1 b	1.9 \pm 0.2 a	4.0 \pm 0.1 c	5.2 \pm 0.8 c	7.9 \pm 0.6 b	16.6 \pm 1.1 a
Gr_2 (Pa) $\times 10^3$	1.1 \pm 0.1 c	1.1 \pm 0.0 c	1.6 \pm 0.1 b	1.8 \pm 0.2 a	3.5 \pm 0.2 c	4.5 \pm 0.7 c	6.4 \pm 0.3 b	12.1 \pm 0.8 a
Final strain (%)	8.4 \pm 0.6 a	8.0 \pm 0.7 a	5.9 \pm 0.7 b	5.0 \pm 0.5 b	6.3 \pm 0.5 a	4.8 \pm 1 b	3.0 \pm 0.1 c	1.6 \pm 0.2 d
Recovery (%)	75.4 \pm 2.3 a	76.7 \pm 2.3 a	75.6 \pm 2.1 a	74.9 \pm 2.1 a	53 \pm 1.4 b	54 \pm 1.9 ab	55 \pm 0.6 a	54 \pm 1.2 ab

* Mean values ($n = 5 \pm$ standard deviation) in the same row and same material (gluten or dough) followed by different letter are significantly different ($p < 0.05$, Tukey). Creep test at 100 Pa of shear stress for 100 s; G_0 = instantaneous shear modulus; G_1, G_2 = retarded shear moduli; η_0 = steady state viscosity; Gr_0, Gr_1, Gr_2 stands for instantaneous and retarded shear moduli respectively in the recovery phase. 0, 1.25, 2.5, 5% (wet basis) of CCPP substitution levels.

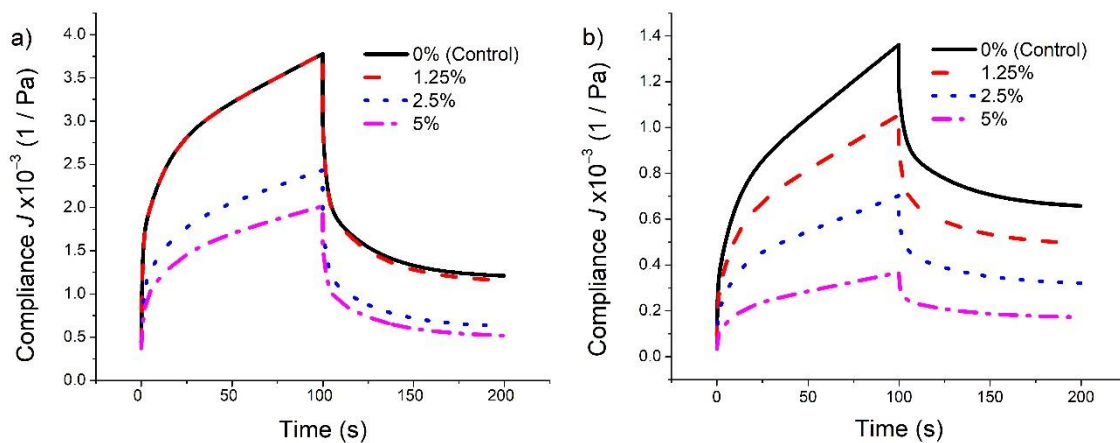


Figure 2. Creep-recovery curves for extracted gluten (a) and dough (b) with different levels of coffee cherry pulp powder (CCPP) substitution plotted from averages of estimated regressed parameters of Kelvin-Voigt model. 0, 1.25, 2.5, and 5% of CCPP wet basis.

When the average elastic moduli ($G_0, G_1,$ and G_2) were compared, the dough presented a value two times higher than gluten since starch provides stiffness to the dough, as indicated in other reports [13]. The changes in dough deformation were inversely related to the CCPP levels used. As the level of CCPP increased, the deformation decreased as observed in an increase in elastic moduli, suggesting stiffer dough. Similar trends were reported by other authors [16]. Comparing the recovery magnitude: gluten recovered 1.4 times more than dough since gluten proteins provide the elasticity (recoverability capacity) and starch the dough’s stiffness. CCPP levels did not affect the recovery of gluten in the creep recovery test. Besides, the CCPP level in dough only affected its recovery at the 2.5 level compared to the control. The lack of a trend on recovery by fiber addition has been reported [15,16].

Besides significant differences in maximum strain and their respective reduction with CCPP fiber (Table 3), gluten and dough preserved their remarkable spring back to return to their original shape in the creep and recovery test conditions. In contrast, when analyzed with a large deformation performed with a compression recovery test using 8 N, the gluten recovery showed a significant decreasing trend. It suggests that a large deformation is more selective within this study and the levels of CCPP (Figure 1). The stiffness increase could

be related to the water retention properties of the CCPP fiber, which possibly decreases the free water in gluten and dough, decreasing particle movements in the structure.

3.5. Bread Volume and Crumb Firmness

Table 4 shows the breadmaking parameters obtained with the AACCI standard method 10-10.03 [22]. As the substitution levels of CCPP increased (1.25, 2.5, and 5% of CCPP wet basis), the bread loaf volume decreased (8.7, 21, and 36%, respectively). Compliance values of creep-recovery test were positively correlated ($r = 0.90$, $p < 0.0001$), with bread volume, in contrast to the elastic moduli (G_0 , G_1 , G_2), and the steady state viscosity (η_0) in the dough ($r = -0.95$) and gluten ($r = -0.93$), which were negatively correlated ($p < 0.001$) with bread volume (Appendix B). A significant decrease in bread volume was observed even at the lowest substitution level (1.25% CCPP). A low concentration of CCPP also affected the dough's rheological properties, such as weakening of the gluten network and increasing the system stiffness. That implies less expansion of dough with CCPP substitution treatments compared to the control. Wheat flour substitution by CCPP has a similar effect on bread volume as that reported for whole grain flour and the incorporation of dietary fiber from different sources. Dietary fiber has been attributed to dilute the protein network and weaken the gluten matrix formation [5,6,25,26,31]. A qualitative darkening of bread crust and crumb increased as the CCPP substitution level increased (Figure 3). Dark bread color is commonly reported with the addition of fiber [6]. This is also common in most specialty bread loaves whose characteristics are expected to differ from most white flour bread loaves.

Table 4. Bread performance parameters *.

CCPP Substitution Level (% Wet Basis)	Height (mm)	Weight (g)	Volume (cm ³)	Specific Volume (cm ³ /g)
0 (Control)	127 ± 5 a	736 ± 4 a	3056 ± 108 a	4.14 ± 0.1 a
1.25	118 ± 3 a	739 ± 3 a	2804 ± 87 b	3.79 ± 0.1 b
2.5	106 ± 5 b	735 ± 12 a	2408 ± 98 c	3.28 ± 0.1 c
5	91 ± 2 c	737 ± 1 a	2007 ± 45 d	2.72 ± 0.1 d

* Mean values ($n = 2 \pm$ standard deviation) within a column followed by different letter are significantly different ($p < 0.05$, Tukey).

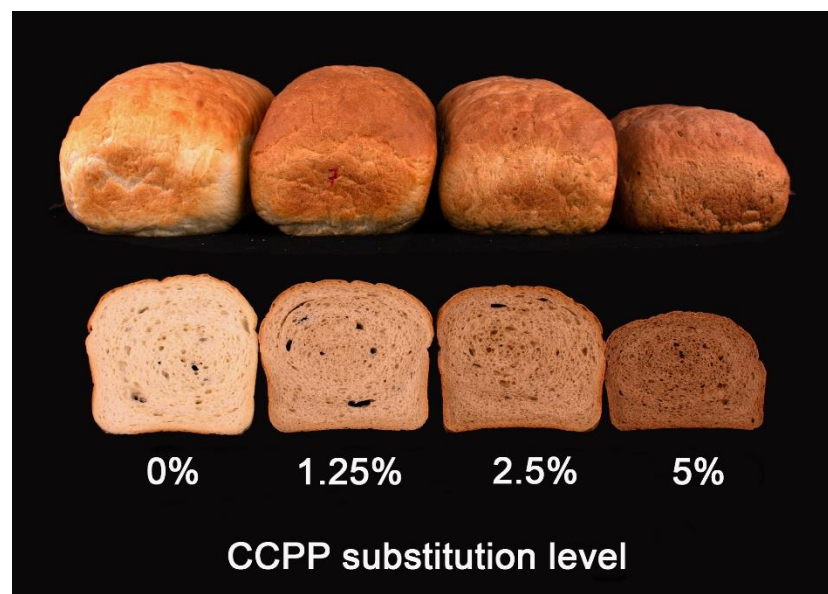


Figure 3. Bread loaves with different levels of coffee cherry pulp powder (CCPP) substitution.

Figure 4 shows the crumb firmness results according to the AACCI standard procedure 74-09.01 at the 1st, 4th, and 7th day of storage. Firmness increased significantly 59% at

the maximum substitution level on the 1st day of storage. These results agree with a 54% increase in crumb firmness with cane sugar bagasse fiber was substituted at 5% in wheat flour [32]. The firmness increased 55 and 36% on the 4th and 7th day of storage, respectively. The results show an adverse effect of CCPP on crumb firmness and bread volume due to high fiber content. Sakhare and Prabhasankar [33] reported that fenugreek fiber addition decreased volume and significantly increased crumb firmness. Our results agree with trends on bread crumb firmness increase by bran reincorporation [25]. Some authors suggest that fiber interferes with the starch–gluten matrix resulting in a weakened dough to capture fermentation gas bubbles, decreasing bread volume, and increasing crumb firmness [20,25,33].

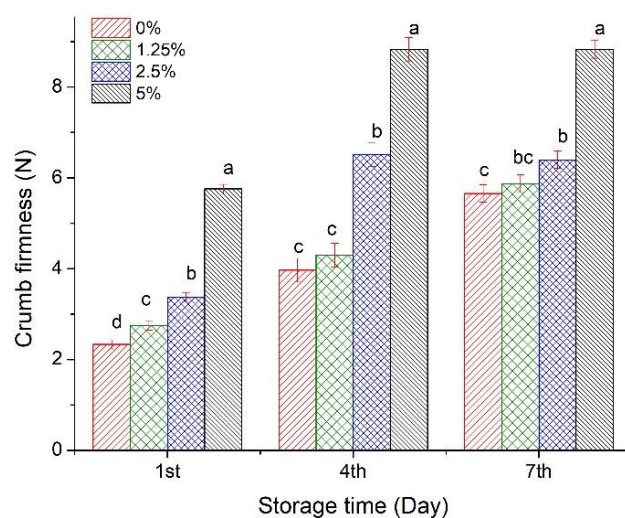


Figure 4. Bread crumb firmness as a function of coffee cherry pulp powder substitution level grouped by storage time. Means (columns with standard error bar) with the same letter and within the same storage day group are not significantly different ($p < 0.05$, Tukey).

4. Conclusions

The partial substitution of wheat flour by CCPP affects the rheology of the dough and gluten. The water absorption in the farinograph increased by 1.7% in the 5% CCPP substitution level. The elastic recovery of gluten, compression recovery test, decreased when the CCPP levels increased and it was positively correlated ($r = 0.91$, $p < 0.0001$) with bread volume. Similarly, there was an increase in the elastic moduli and the steady state viscosity in both gluten and dough due to the increased fiber addition. In this case, both were negatively correlated (Appendix B) with bread volume ($r = -0.93$, $p < 0.0001$). The firmness of the crumb also increased when CCPP increased. This first approach has been performed without dough or bread additives (emulsifiers, enzymes, etc.), so more research should be done using dough and bread improvers to take advantage of the coffee pulp in the baking process. Consumer acceptance evaluation is suggested using the maximum level, in the case of this study was 5%, but higher levels might be achieved using dough and bread improving agents and masking flavors for the earthy after taste at higher levels of substitution. At 5% CCPP substitution, dietary fiber increased by 89% compared to the control. Our results demonstrate that the mechanical model used can quantitatively represent dough and gluten's viscoelastic properties with CCPP and their correlation to bread volume.

Author Contributions: Conceptualization, validation, and formal analysis Z.J.H.-E., M.L.S.-Q., and O.G.-R.; supervision, review and editing, Z.J.H.-E., P.R.-D.; Writing original draft preparation, visualization and investigation, G.A.R.-S.; funding acquisition, P.R.-D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Oklahoma State University, and the U.S. Department of Agriculture–National Institute of Food and Agriculture (USDA–NIFA).

Acknowledgments: This work is supported by Hatch grant no. OKL03091 from the United States Department of Agriculture (USDA) National Institute of Food and Agriculture. Thanks to the National Council for Science and Technology (in Spanish: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT) for the financial support with the fellowship for Gustavo Armando Rosas-Sánchez, and to Techver for granting the coffee pulp powder for this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

CCP	Coffee cherry pulp
CCPP	Coffee cherry pulp powder
CONACyT	National Council for Science and Technology
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
WA	Water absorption
MTI	Mixing Tolerance Index
ER	Elastic recovery
USDA	United States Department of Agriculture

Appendix A. HPLC Caffeine Determination

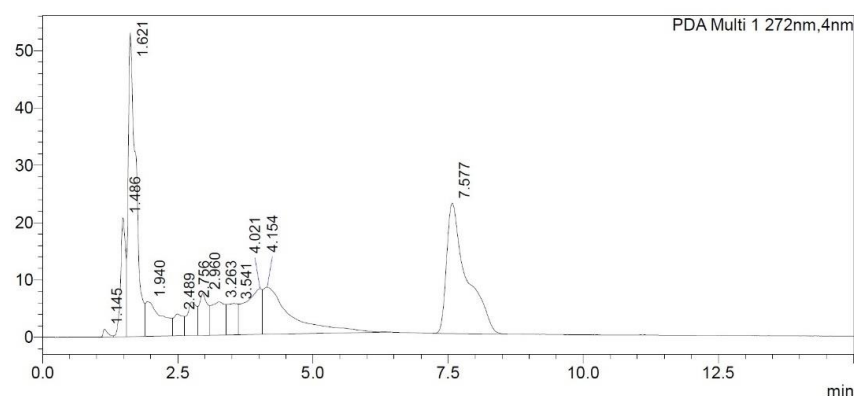


Figure A1. Chromatogram for caffeine, caffeine peak at 7.58 min.

Appendix B. Pearson's Correlation

Table A1. Pearson's correlation coefficients (r) between traditional quality indicators and elastic recovery with creep parameters of dough and gluten ^x.

Parameters	Gluten											
	J_0	G_0	J_1	G_1	λ_1	J_2	G_2	λ_2	η_0	η_1	η_2	ER
Development time	0.64 *	-0.69 *	0.66 *	-0.69 *	ns	0.73 **	-0.72 **	ns	-0.73 **	-0.66 *	-0.70 *	0.76 **
Stability time	0.64 *	-0.63 *	0.65 *	-0.63 *	ns	0.71 *	-0.66 *	ns	-0.66 *	-0.60 *	-0.64 *	0.72 **
Firmness (Day 1)	-0.86 **	0.90 ***	-0.85 **	0.89 ***	ns	-0.85 **	0.87 **	0.65*	0.87 **	0.89 ***	0.89 ***	-0.89 **
Mixing tolerance	-0.89 ***	0.88 **	-0.90 ***	0.87 **	ns	-0.90 ***	0.87 **	0.62*	0.85 **	0.87 **	0.88 **	-0.87 **
Weight	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Volume	0.94 ***	-0.94 ***	0.94 ***	-0.93 ***	-0.57 +	0.92 ***	-0.92 ***	-0.70*	-0.91 ***	-0.93 ***	-0.93 ***	0.91 ***
Water absorption	-0.85 **	0.90 ***	-0.85 **	0.90 ***	ns	-0.87 **	0.89 ***	0.59*	0.90 ***	0.88 **	0.90 ***	-0.91 ***
Elastic recovery	0.89 **	-0.92 ***	0.89 ***	-0.91 ***	ns	0.89 **	-0.90 ***	-0.66*	-0.89 **	-0.91 ***	-0.91 ***	1

Table A1. Cont.

Dough												
Parameters	J_0	G_0	J_1	G_1	λ_1	J_2	G_2	λ_2	η_0	η_1	η_2	ER
Development time	0.75 **	−0.70 *	0.73 **	−0.69 *	ns	0.70 *	−0.68 *	ns	−0.70 *	−0.69 *	−0.67 *	0.76 **
Stability time	0.78 **	−0.64 *	0.78 **	−0.63 *	0.65 *	0.76 **	−0.63 *	ns	−0.65	−0.61	−0.61	0.72 **
Firmness (Day 1)	−0.90 ***	0.99 ***	−0.87 **	0.99 ***	−0.68 *	−0.86 **	0.98 ***	ns	0.98 ***	0.97 ***	0.99 ***	−0.89 **
Mixing tolerance	−0.95 ***	0.87 **	−0.94 ***	0.86 **	−0.77 **	−0.93 ***	0.86 **	ns	0.87 **	0.85 **	0.84 **	−0.87 **
Weight	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Volume	0.98 ***	−0.95 ***	0.97 ***	−0.94 ***	0.82 **	0.95 ***	−0.94 ***	ns	−0.95 ***	−0.92 ***	−0.93 ***	0.91 ***
Water absorption	−0.91 ***	0.97 ***	−0.87 **	0.97 ***	−0.72 *	−0.86 **	0.96 ***	ns	0.97 ***	0.94 ***	0.98 ***	−0.91 ***
Elastic recovery	0.89 ***	−0.91 ***	0.87 **	−0.90 ***	0.65 *	0.84 **	−0.89 **	ns	−0.90 ***	−0.88 **	−0.90 ***	1

^x Creep test at 100 Pa of shear stress for 100 s. *, **, and *** are significant at $p < 0.05$, 0.01 and 0.0001 , respectively; + indicates significant at $p < 0.06$; and ns = not significant. G_0 = instantaneous shear modulus; G_1 , G_2 = retarded shear moduli; J_0 = instantaneous compliance; J_1 , J_2 = retarded elastic compliance; η_1 , η_2 = viscous response associated to retardation time λ_1 and λ_2 , respectively; η_0 = steady state viscosity; Mixing Tolerance = Mixing tolerance index, development time and stability time at 500 BU in farinograph test. ER = Elastic recovery from compression-recovery test.

References

- Esquivel, P.; Jiménez, V.M. Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Res. Int.* **2012**, *46*, 488–495. [CrossRef]
- Braham, J.E.; Bressani, R. *Coffee Pulp Composition, Technology, and Utilization*; International Development Research Centre: Ottawa, ON, Canada, 1979.
- Murthy, P.S.; Madhava Naidu, M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *66*, 45–58. [CrossRef]
- Magoni, C.; Bruni, I.; Guzzetti, L.; Dell'Agli, M.; Sangiovanni, E.; Piazza, S.; Regonesi, M.E.; Maldini, M.; Spezzano, R.; Caruso, D.; et al. Valorizing coffee pulp by-products as anti-inflammatory ingredient of food supplements acting on IL-8 release. *Food Res. Int.* **2018**, *112*, 129–135. [CrossRef] [PubMed]
- Bonnand-Ducasse, M.; Della Valle, G.; Lefebvre, J.; Saulnier, L. Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties. *J. Cereal Sci.* **2010**, *52*, 200–206. [CrossRef]
- Anil, M. Using of hazelnut testa as a source of dietary fiber in breadmaking. *J. Food Eng.* **2007**, *80*, 61–67. [CrossRef]
- Deka, S.C.; Seth, D.; Hulle, N.R.S. *Technologies for Value Addition in Food Products and Processes*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019.
- Faubion, J.M.; Hosoney, R.C. The viscoelastic properties of wheat flour doughs. In *Dough Rheology and Baked Product Texture*; Faridi, H., Faubion, J.M., Eds.; Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1990; pp. 29–66.
- Dobraszczyk, B.J.; Morgenstern, M.P. Rheology and the breadmaking process. *J. Cereal Sci.* **2003**, *38*, 229–245. [CrossRef]
- Edwards, N.; Dexter, J.; Scanlon, M.; Cenkowski, S. Relationship of creep-recovery and dynamic oscillatory measurements to durum wheat physical dough properties. *Cereal Chem.* **1999**, *76*, 638–645. [CrossRef]
- Fu, Z.-Q.; Che, L.-M.; Li, D.; Wang, L.-J.; Adhikari, B. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough. *LWT-Food Sci. Technol.* **2016**, *66*, 324–331. [CrossRef]
- Girard, A.L.; Castell-Perez, M.E.; Bean, S.R.; Adrianos, S.L.; Awika, J.M. Effect of Condensed Tannin Profile on Wheat Flour Dough Rheology. *J. Agric. Food Chem.* **2016**, *64*, 7348–7356. [CrossRef]
- Hernández-Estrada, Z.J.; Rayas-Duarte, P.; Cárdenas, J.d.D.F. Creep Recovery of Wet Gluten and High-Molecular-Weight Glutenin Subunit Composition: Relationship with Viscoelasticity of Dough and Breadmaking Quality of Hard Red Winter Wheat. *Cereal Chem. J.* **2017**, *94*, 223–229. [CrossRef]
- Steffe, J.F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*; Freeman Press: East Lansing, MI, USA, 1996.
- Mironeasa, S.; Codina, G.G. Dough Rheological Behavior and Microstructure Characterization of Composite Dough with Wheat and Tomato Seed Flours. *Foods* **2019**, *8*, 626. [CrossRef]
- Mironeasa, S.; Iuga, M.; Zaharia, D.; Mironeasa, C. Rheological analysis of wheat flour dough as influenced by grape peels of different particle sizes and addition levels. *Food Bioprocess Technol.* **2019**, *12*, 228–245. [CrossRef]
- Chompoorat, P.; Rayas-Duarte, P.; Hernandez-Estrada, Z.J.; Phetcharat, C.; Khamsee, Y. Effect of heat treatment on rheological properties of red kidney bean gluten free cake batter and its relationship with cupcake quality. *J. Food Sci. Technol.* **2018**, *55*, 4937–4944. [CrossRef]
- Ronda, F.; Pérez-Quirce, S.; Angioloni, A.; Collar, C. Impact of viscous dietary fibres on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: A fundamental and empirical rheological approach. *Food Hydrocoll.* **2013**, *32*, 252–262. [CrossRef]
- Jin, X.; Lin, S.; Gao, J.; Wang, Y.; Ying, J.; Dong, Z.; Zhou, W. How manipulation of wheat bran by superfine-grinding affects a wide spectrum of dough rheological properties. *J. Cereal Sci.* **2020**, *96*, 103081. [CrossRef]
- Ghoshal, G.; Shivhare, U.S.; Banerjee, U.C. Rheological properties and microstructure of xylanase containing whole wheat bread dough. *J. Food Sci. Technol.* **2017**, *54*, 1928–1937. [CrossRef]

21. Association of Official Analytical Chemist (AOAC). *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 18th ed.; AOAC: Gaithersburg, MD, USA, 2005.
22. AACCI. *International Approved Methods of Analysis*, 11th ed.; Available online: <http://methods.aaccnet.org/toc.aspx> (accessed on 10 August 2020).
23. ISO. *Coffee and Coffee Products-Determination of the Caffeine Content Using High Performance Liquid Chromatography (HPLC)*; Reference Method ISO 20481; ISO International Standards: Geneva, Switzerland, 2008.
24. AIB. White Pan Bread Firmness Measurement. In *AIB Standard Procedure*; AIB International: Manhattan, KS, USA, 2006. Available online: <https://www.aibinternational.com/Portals/0/AIBTextureAnalysisProcedures.pdf> (accessed on 8 October 2020).
25. Boita, E.R.F.; Oro, T.; Bressiani, J.; Santetti, G.S.; Bertolin, T.E.; Gutkoski, L.C. Rheological properties of wheat flour dough and pan bread with wheat bran. *J. Cereal Sci.* **2016**, *71*, 177–182. [[CrossRef](#)]
26. Chouaibi, M.; Rezig, L.; Boussaid, A.; Hamdi, S. Insoluble tomato-fiber effect on wheat dough rheology and cookies' quality. *Ital. J. Food Sci.* **2019**, *31*, 1–18.
27. Han, W.; Ma, S.; Li, L.; Zheng, X.; Wang, X. Gluten aggregation behavior in gluten and gluten-starch doughs after wheat bran dietary fiber addition. *LWT-Food Sci. Technol.* **2019**, *106*, 1–6. [[CrossRef](#)]
28. Wirkijowska, A.; Zarzycki, P.; Sobota, A.; Nawrocka, A.; Blicharz-Kania, A.; Andrejko, D. The possibility of using by-products from the flaxseed industry for functional bread production. *LWT-Food Sci. Technol.* **2020**, *118*, 108860. [[CrossRef](#)]
29. Chapman, S.J.; Mulvaney, S.J.; Chinnaswamy, R.; Rayas-Duarte, P.; Allvin, B. Large deformation stress relaxation and compression-recovery of gluten representing different wheat classes. *J. Cereal Sci.* **2012**, *55*, 366–372. [[CrossRef](#)]
30. Zhou, Y.; Dhital, S.; Zhao, C.; Ye, F.; Chen, J.; Zhao, G. Dietary fiber-gluten protein interaction in wheat flour dough: Analysis, consequences and proposed mechanisms. *Food Hydrocoll.* **2021**, *111*, 106203. [[CrossRef](#)]
31. Peressini, D.; Sensidoni, A. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. *J. Cereal Sci.* **2009**, *49*, 190–201. [[CrossRef](#)]
32. Sangnark, A.; Noomhorm, A. Effect of dietary fiber from sugarcane bagasse and sucrose ester on dough and bread properties. *LWT-Food Sci. Technol.* **2004**, *37*, 697–704. [[CrossRef](#)]
33. Sakhare, S.D.; Prabhasankar, P. Effect of Roller Mill Processed Fenugreek Fiber Addition on Rheological and Bread Making Properties of Wheat Flour Doughs. *J. Food Process. Preserv.* **2017**, *41*, e13012. [[CrossRef](#)]