



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

PROPIEDADES REOLÓGICAS EN MASA Y SU RELACIÓN EN CONTENIDO DE ACEITE EN TORTILLA CHIP

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO PROFESIONAL DE:**

QUÍMICA FARMACOBIOLOGA

P R E S E N T A

MARISOL RENTERIA GARCIA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Alfonso Topete Betancourt



Morelia, Michoacán, agosto del 2022

Dedicatoria

Con todo mi amor para lo más sagrado que Dios me dio, mis padres: Miguel Rentería Cisneros y Olivia García Fabela. Quienes son el motor de vida y me apoya en cada decisión que tomo. No hay palabras para agradecerles su amor incondicional, los amo.

A mi persona porque cada que el mundo le dice no, contesta sí puedo. Querida yo: Sé que tienes miedo, pero lo vas a lograr.

Con cariño

Marisol

Agradecimientos

A Dios por permitirme seguir adelante y poder lograr una más de mis metas. A mi padre Miguel Rentería Cisneros y mi madre Olivia García Fabela por darme la vida, compartir su felicidad conmigo y siempre brindarme lo mejor de ustedes.

A mi casa de estudios la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en cuyas aulas y en conjunto con los catedráticos me otorgaron los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

A mis directores de tesis, el Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores y el Dr. Alfonso Topete Betancourt, por la confianza depositada en mí para desarrollar este trabajo, por su tiempo y dedicación para atender todas las dudas e inquietudes que surgieron, por compartir su conocimiento y proporcionarme los medios para llevar a cabo los experimentos.

Al comité sinodal, Dr. José Octavio Rodiles López, M.C. María Esther Tadeo González, M.C. Rosa María García Martínez, M.C. Diana Maya Cortés y D.E. Rafael Zamora Vega por sus acertadas correcciones, sugerencias y mejoras realizadas a la presente.

A al M.I.C.C.F. Elvira Ramos López por compartirme su conocimiento, por su apoyo, por sus consejos y brindarme su amistad.

A Octavio García Rebollo, por su paciencia, por todos los días de apoyo para terminar en tiempo mis experimentos, por sus consejos y alegrar mis días.

A mis compañeros y amigos: Areli Chávez Barajas, Andrés Guerra Reyes, Eric Eduardo Pérez Zavala, Montserrat Juárez Serrano y Alfredo Ruiz Reyes. Por hacerme amenas las tardes de estrés, por cada aventura que vivimos juntos y por su amistad.

A todos ustedes muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Índice de gráficas	v
Resumen	vi
Abstract.....	vii
I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1. Maíz	1
1.2. Origen	2
1.3. Tipos de maíz.....	4
1.4. Usos	6
1.5. Producción	7
1.6. Anatomía del grano	10
1.6.1. Pericarpio	10
1.6.2. Endospermo	11
1.6.3. Germen.....	11
1.6.4. Pedicelo o piloriza	11
1.7. Composición química del grano	12
1.7.1. Almidón	12
1.7.2. Proteínas	13
1.7.3. Grasas	13
1.7.4. Fibra	13
1.7.5. Azúcares libres	13

1.8.	Nixtamalización	14
1.8.1.	Factores que influyen en el proceso de nixtamalización.....	15
1.8.2.	Tipos de nixtamalización.....	16
1.8.3.	Efectos de la nixtamalización sobre el pericarpio	16
1.8.4.	Efectos de la nixtamalización en el endospermo	17
1.9.	Almidón	18
1.9.1.	Gelatinización	20
1.9.2.	Retrogradación.	22
1.9.3.	Complejos de amilosa-lípido	23
1.9.4.	Digestibilidad del almidón	23
1.10.	Molienda	24
1.11.	Horneado	24
1.12.	Tortillas de maíz.....	24
1.13.	Freído.....	25
1.13.1.	Tortillas chips	26
1.14.	Propiedades reológicas.....	26
1.15.	Análisis de perfil de textura	27
II.	JUSTIFICACIÓN	28
III.	HIPÓTESIS.....	29
IV.	OBJETIVOS	29
4.1.	Objetivo general	29
4.2.	Objetivos específicos	29

V. MATERIAL Y MÉTODOS	30
5.1. Material	30
5.2. Métodos	30
5.2.1. Nixtamalización tradicional	30
5.2.2. Molienda	31
5.2.3. Elaboración de harina.....	32
5.2.4. Humedad de la harina, masa y totopos	34
5.2.5. Preparación de tortillas chips.....	35
5.2.6. Determinación de extracto etéreo.....	37
5.2.7. Análisis del perfil de textura (TPA) en masa de los cuatro tratamientos de nixtamalización.....	40
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
6.1. Nixtamalización	43
6.2. Harinas.....	46
6.3. Tortillas chips	47
6.4. Extracto etéreo en tortillas chips	47
6.5. Análisis del perfil de textura (TPA)	49
VII. CONCLUSIONES	55
VIII.BIBLIOGRAFÍA.....	56

Índice de figuras

Figura 1. a) Centeotl, Dios azteca del maíz (Murillo-Godínez, 2019) y b) Yum Kaak, Dios del maíz y la vegetación en la cultura maya (Membrillo, 2020).....	2
Figura 2. Contraste entre el teocintle (superior izquierda) y el maíz (inferior derecha) que se encuentra actualmente (Hernández-Cumplido, 2019).	3
Figura 3. Estructura del grano de maíz (Benítez-Cardoza, 2006).	10
Figura 4. Estructura espacial y de Haworth de la amilosa y amilopectina (Curiosoando.com, 2017).	19
Figura 5. a) Tortilla de maíz (Mier, 2016) y b) Tortilla chip (Williams, 2020).....	25
Figura 6. a) Maíz de Sinaloa, México, utilizado para cocción térmico-alcalina, b) Cocimiento de granos de maíz.....	30
Figura 7. Nixtamal lavado y cuantificación del nejayote después del reposo de 16 horas.	31
Figura 8. Molino de piedras ARENAS.	32
Figura 9. Deshidratación de la masa en Horno de Secado.	32
Figura 10. a) Molienda de harinas y b) Tamizado de las harinas en malla del No. 60.	33
Figura 11. a) Harina de maíz nixtamalizada 60 min, b) Harina de maíz nixtamalizada 45 min, c) Harina de maíz nixtamalizada 35 min y d) Harina de maíz nixtamalizada 20 min.....	33
Figura 12. Horno Felisa.	34
Figura 13. a) Tortilladora manual de rodillos y b) Tortilla chip cruda.	36
Figura 14. a) Horneado de tortilla chip y b) Freído de tortilla chip.	37
Figura 15. a) Trituración de totopos y b) Cartuchos de papel filtro.	37
Figura 16. Extracción Soxhlet.....	38
Figura 17. Eliminación de éter en rotavapor.....	39
Figura 18. a) Compactación de la masa con rodillo metálico y b) Obtención de cilindro de masa al retirar el molde.....	40
Figura 19. Texture Analyzer.	41
Figura 20. Curva modelo de TPA: C= compresión, d: descompresión.....	43

Figura 21. Representación esquemática de los cambios que experimentan los gránulos de almidón durante la gelatinización (López, 1994).	45
Figura 22. Tortillas chips.....	47

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación taxonómica del maíz.	1
Tabla 2. Oferta y demanda internacional de maíz (estimación 2019/2020).	8
Tabla 3. Flujo comercial	9
Tabla 4. Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz (%).	12
Tabla 5. Propiedades generales de algunos gránulos de almidón y sus pastas... ..	20
Tabla 6. Condiciones y Tiempos de nixtamalización de grano comercial.	31
Tabla 7. Temperatura de gelatinización en muestras tratadas a distintos tiempos de cocinado del grano de maíz.	46
Tabla 8. Humedad de las harinas obtenidas de los diferentes tiempos de nixtamalización.....	46
Tabla 9. Extracto etéreo en tortilla chip.....	48
Tabla 10. Propiedades de textura de la masa rehidratada a 61% con diferentes tiempos de nixtamalización.	54

Índice de gráficas

Gráfica 1. Participación de la producción mundial de maíz 2019/2020-Estimación (secretaría de agricultura y desarrollo rural, ASERCA y CIMA, 2020).....	7
Gráfica 2. Absorción de agua por el almidón maíz durante la nixtamalización y molienda.....	44
Gráfica 3. Dureza en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización.....	49
Gráfica 4. Adhesividad en masa tratada a diferentes tiempos de nixtamalización.....	51
Gráfica 5. Cohesividad en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización..	52
Gráfica 6. Elasticidad en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización. ...	53

Resumen

El maíz es el cereal más importante en México y se consume principalmente como tortilla, a través de un proceso conocido como nixtamalización. Otra forma de consumo de maíz en nuestro país es como botanas, donde se ha mostrado un crecimiento del 58% por parte de los consumidores. La demanda de los productos fritos de maíz, conocidos como tortillas chips, ha aumentado en un 31.8% desde el 2013. Debido al alto consumo de tortillas chips, es importante aumentar su calidad nutricional. Los alimentos fritos representan un factor de riesgo para la salud, pues promueven el aumento de la obesidad y enfermedades cardíacas. Este trabajo se enfocó en estudiar el efecto del tiempo de nixtamalización respecto a la gelatinización del almidón, y su relación entre las propiedades reológicas de la masa y la absorción de aceite en tortillas chips. Obteniendo como resultado que, a los 20 min de nixtamalización del maíz, la tortilla chip contiene 18,92% de extracto etéreo, mientras que a los 60 min de nixtamalización el extracto etéreo aumentó a 26.98%. La absorción de aceite es directamente proporcional al tiempo de nixtamalización. Se encontró que las propiedades reológicas de la masa (dureza, adhesividad, cohesividad, elasticidad y resiliencia) se afectan significativamente ($p < 0.05$) por el tiempo de nixtamalización de maíz. Por lo que el análisis de perfil de textura podría usarse como herramienta para medir indirectamente la gelatinización de la masa y ayudar a controlar la absorción de aceite en tortillas chips durante la fritura.

Palabras clave: Nixtamalización, totopos, gelatinización, almidón, grasa.

Abstract

Corn is the most important cereal in Mexico and its consumed mainly as tortilla, through a process known as nixtamalization. Another form of corn consumption in our country is as snacks, where a growth of 58% has been shown by consumers. Demand for fried corn products, known as tortilla chips, has been increasing by 31.8% since 2013. Due to high consumption of tortilla chips, it's important to increase their nutritional quality. The fried foods represent a risk factor for health, because promotes an increase in obesity and heart disease. This work focused on study the nixtamalization time effect respect to starch gelatinization, and its relationship between the rheological properties of the dough and oil absorption in tortilla chips. Obtaining as a result that at 20 min of nixtamalization of the corn, the tortilla chips contain 18.92% of ethereal extract, while 60 min of nixtamalization the ethereal extract increased to 26.98%. The oil absorption is directly proportional to the nixtamalization time. It was found that the rheological properties of the dough (hardness, adhesiveness, cohesiveness, elasticity and resilience) are significantly affected ($p < 0.05$) by the corn nixtamalization time. Therefore, the texture profile analysis might be used as a tool to measure indirectly the dough gelatinization as well as helps to control the oil absorption in tortilla chips during the deep frying.

I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. Maíz

El maíz es el grano obtenido de la especie *Zea mays* L. (Norma Mexicana NMX-FF-034-1995-SCFI). La palabra maíz de origen indígena caribeño, significa "lo que sustenta la vida" (Martínez-Guardia et al., 2016). El maíz, pertenece a la familia de las *Gramíneae* (tabla 1), subfamilia *Panicoideae*, y tribu *Andropogoneae*; incluye siete géneros: *Zea* (como teocintle), *Tripsacum* (arrocillo o maicillo), *Coix*, *Chionachne*, *Sclerchne*, *Polytoca* y *Trilobachne* (Castro-López, 2019).

Tabla 1. Clasificación taxonómica del maíz.

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	
Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Liliopsida</i>
Subclase:	<i>Commelinidae</i>
Orden:	<i>Poales</i>
Familia:	<i>Poaceae</i> (<i>Gramíneae</i>), cereales
Subfamilia:	<i>Panicoideae</i>
Tribu:	<i>Andropogoneae</i>
Género:	<i>Zea</i>
Especie:	<i>Z. mays</i>
Nombre científico	
<i>Zea mays</i> L	
Nombre común	
Maíz	

Fuente: Contreras-Gallegos, (2013).

1.2. Origen

El *Zea mays* L. es originario del continente americano, la evidencia arqueológica sobre la existencia de este cereal indica que tiene aproximadamente 5,000 años de antigüedad. Representaciones de la planta de maíz o sus partes en esculturas, códices, cerámicas prehistóricas, así como estudios a fósiles encontrados, indican que el maíz tuvo su origen geográfico en la República Mexicana, en el valle de Tehuacán, Puebla y al norte de Oaxaca. También indica que en México ocurrió su domesticación y posterior dispersión a otras regiones del continente, hacia el norte hasta Canadá y hacia el sur hasta Argentina. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano fue introducido en Europa a través de España (Cárcamo-Escobar et al., 2018).

La importancia del maíz en la sociedad mesoamericana era tal que muchas de sus ceremonias eran ofrecidas deidades como Centeotl (Dios azteca del maíz), Yum Kaax o Nal (Dios del maíz y la vegetación en la cultura maya), Pitao Cozobi (Deidad zapoteca del maíz) y Cohuy (deidad del maíz mixteca) (UNAM, 2017).



Figura 1. a) Centeotl, Dios azteca del maíz (Murillo-Godínez, 2019) y b) Yum Kaax, Dios del maíz y la vegetación en la cultura maya (Membrillo, 2020).

Evidencia arqueológica y molecular (botánica, genética y citología) reporta que el maíz, tal y como lo conocemos en la actualidad evolucionó de un progenitor silvestre que existió hace 8,000 años. Se cree que el progenitor silvestre extinto del maíz fue el teocintle, el cual fue domesticado al sur de México hace aproximadamente 6,600-9,000 A.C. (Cárcamo-Escobar et al., 2018).

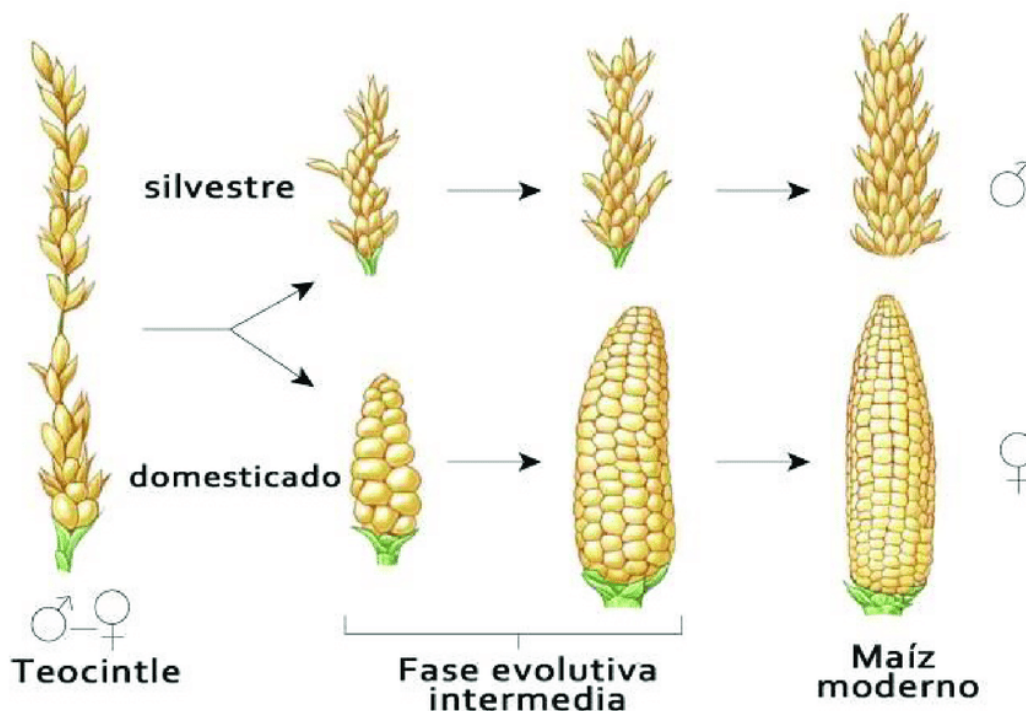


Figura 2. Contraste entre el teocintle (superior izquierda) y el maíz (inferior derecha) que se encuentra actualmente (Hernández-Cumplido, 2019).

En la actualidad el origen botánico del maíz gira en torno a dos hipótesis: la primera hace referencia a que el teocintle es el antecesor silvestre del maíz, y/o un tipo primitivo de teocintle es el antecesor silvestre común del maíz y del mismo teocintle; la segunda versión asegura que el maíz es un híbrido natural entre el teocintle y una *Gramíneae* afín ya extinta, la cual se caracterizaba por ser una planta que producía el grano en forma de espiga. La variedad y evolución del maíz se produjo en dos etapas: la primera fue domesticación, en la cual otras civilizaciones a parte de las mesoamericanas accedieron más fácilmente a la

obtención de esta *Gramíneae*; la segunda etapa que fue de mejoramiento tuvo como objetivo central mejorar el rendimiento, calidad del grano y su rápida adaptación al ecosistema. Las migraciones humanas, las mutaciones, la selección natural o artificial, el aislamiento y la endogamia, y el cruzamiento entre variedades diferentes facilitaron encontrar cultivos de maíz por todo el continente americano y prácticamente en todo el mundo (Cárcamo-Escobar et al., 2018).

1.3. Tipos de maíz

El maíz es una planta anual, dotado de un sistema radicular fibroso, con 45 diferentes razas (Méndez-Montealvo et al., 2005), ha tenido un proceso de selección y mejoramiento que ha generado muchos tipos maíz por ejemplo, el maíz duro, dulce, reventador, baby, dentado, harinoso, ceroso y los maíces opacos con proteínas de alta calidad.

El maíz tiene una gran variabilidad en el color del grano, la textura, la composición y la apariencia. Puede ser clasificado en distintos tipos de acuerdo con: a) la constitución del endospermo y del grano; b) el color del grano; c) el ambiente en que es cultivado; d) la madurez, y e) su uso. La primera clasificación del maíz, de acuerdo con la variación dentro del grano, la hizo Sturtevant de manera artificial, basado en la textura o estructura del endospermo y consideró siete grupos (Paliwal, 2001; Acosta, 2009):

1. **Maíz tunicado (*Zea mays tunicata*)**. El grano puede tener diversos tipos de endospermo. Este maíz se identifica por la presencia de glumas o túnica bien desarrolladas que cubren el grano. No es de valor comercial, aunque es de valor como material genético y citogenético.
2. **Maíz reventador o palomero (*Zea mays everta*)**. Se caracteriza por presentar granos pequeños con endospermo cristalino, constituido preferentemente por

almidón córneo. Es capaz de explotar cuando es sometido al calor. Da lugar a las llamadas cotufas o palomitas.

3. **Maíz duro o cristalino (*Zea mays indurata*).** Los granos de este tipo de maíz son redondos, duros y suaves al tacto. El endospermo está constituido de almidón duro córneo con solo una pequeña parte de almidón suave en el centro del grano. Los maíces duros son preferidos para alimento humano y para hacer fécula de maíz ("maicena"). Una parte importante del área sembrada con maíces cristalinos es cosechada para ser consumida como mazorcas verdes o como alimento animal.
4. **Maíz harinoso (*Zea mays amylacea*).** El endospermo de los maíces harinosos está compuesto de un almidón muy blando, que se raya fácilmente con la uña aun cuando el grano no esté maduro y listo para cosechar. Estos maíces son casi únicamente usados como alimento humano y algunas razas se utilizan para la preparación de platos especiales y bebidas.
5. **Maíz dentado (*Zea mays indentata*).** El endospermo del maíz dentado tiene más almidón suave que los del tipo cristalino, y el almidón cristalino está limitado solo a la periferia del grano. Cuando el grano se comienza a secar, el almidón suave en la parte superior del grano se contrae y produce una pequeña depresión. Esto da la apariencia de un diente y de aquí su nombre. Muchos maíces dentados cultivados tienen granos de color blanco, preferidos para el consumo humano o tienen granos amarillos, preferidos para alimento animal. Ambos tipos son importantes para alimento animal y para usos industriales.
6. **Maíz dulce (*Zea mays saccharata*).** Este tipo de maíz se cultiva principalmente para consumir las mazorcas aún verdes, ya sea hervidas o asadas. En el momento de la cosecha el grano tiene cerca de 70% de humedad y no ha comenzado aún el proceso de endurecimiento. Los granos tienen un alto contenido de azúcares y son de sabor dulce.

7. Maíz ceroso (*Zea mays cerea*). Su nombre se debe a que su endospermo tiene un aspecto opaco y ceroso. El almidón está compuesto principalmente de amilopectina. En los últimos años la química de la amilopectina de este maíz ha sido estudiada en detalle para fines industriales ya que su composición es distinta de la amilopectina de los maíces duros o dentados.

1.4. Usos

Debido a su gran diversidad genética los maíces no tienen la misma composición química, presentan diferencias en sus propiedades y en su utilización final. Así, el maíz puede utilizarse en la producción de hojuelas para desayuno y botanas, para la fabricación de harinas nixtamalizadas, para la industria molinera-tortillera y para aislamiento de almidón, el cual es materia prima en diversas industrias (Méndez-Montealvo et al., 2005). En México el sistema agroindustrial del maíz se encuentra clasificado de la siguiente manera (Tovar-Benítez, 2008):

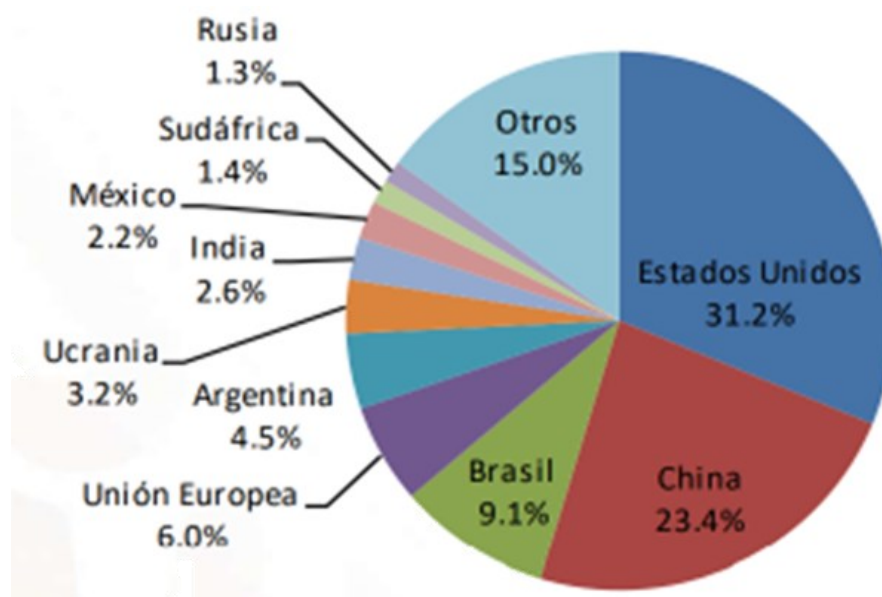
- 1) Fabricación de tortillas
- 2) Molienda de nixtamal
- 3) Industria para la fabricación de harina de maíz nixtamalizado
- 4) Fabricación de almidones, féculas, levaduras y productos similares, incluyen los siguientes 16 productos (insumos de las industrias química, papelera, farmacéutica, panificadora, entre otras): 1. Glucosa, 2. Glucosa sólida, 3. Color caramelo, 4. Almidón sin modificar, 5. Almidón modificado, 6. Miel de maíz, 10. Aceite refinado, 11. Salvado preparado, 12. Pasta de germen, 13. Gluten de maíz, 14. Agua de cocimiento, 15. Ácido graso de maíz y 16. Dextrosa.
- 5) Frituras de maíz (palomitas, fritos de maíz, golosinas, entre otros)
- 6) Hojuelas de maíz

Las tres primeras clases de industrias integran la industria de la tortilla, que es la que mayor cantidad de maíz consume con aproximadamente un 71.3%. La

industria que se dedica a la fabricación de derivados (almidones, féculas, levadura y productos similares) participa con el 6.1%; el resto está conformado por otros derivados como piensos y forrajes para alimentación animal, detergentes, explosivos, fotografías, películas plásticas, insecticidas, etanol, bebidas alcohólicas, alcohol industrializado, aditivos para gasolina, entre otros. Más de 800 productos que usa la humanidad son derivados del maíz. Los productos de maíz nixtamalizado son alimentos básicos en México y América Central y algunos, como las tortillas y chips de tortillas, han ganado popularidad en el mundo.

1.5. Producción

El maíz es el cultivo más importante de México, desde el punto de vista alimentario, económico, político y social, aunque cabe señalar que de acuerdo a una estimación del 2019/2020 (gráfica 1) Estados Unidos es el principal productor de maíz en el mundo, seguido de China, con una participación de 31.2% y 23.4%, respectivamente, y en tercer lugar Brasil, que contribuye con 9.1%, mientras que México participa en octavo lugar con 2.2%.



Gráfica 1. Participación de la producción mundial de maíz 2019/2020-Estimación (secretaría de agricultura y desarrollo rural, ASERCA y CIMA, 2020).

Tabla 2. Oferta y demanda internacional de maíz (estimación 2019/2020).

Año	OFERTA		DEMANDA				
	Inventarios iniciales	Producción	Import.	Export.	Consumo Forrajero	Consumo Total	Inventarios Finales
Mundial 19'/20'	320,940	1,113,022	169,028	165,929	709,275	1,133,890	303,171
Estados unidos	56,410	347,782	1,143	43,817	144,152	308,371	53,147
China	210,319	260,770	7,000	20	190,000	279,000	199,069
Brasil	5,190	101,000	1,200	36,000	57,000	67,000	4,390
Unión Europea	7,762	66,631	21,000	3,600	62,000	83,500	8,293
Argentina	2,368	50,000	5	33,500	10,300	15,000	3,873
Ucrania	1,291	35,887	20	32,000	3,300	4,500	698
India	1,346	28,500	400	500	17,200	28,400	1,346
México	5,089	25,000	17,300	700	26,500	44,500	2,189
Otros	31,165	197,452	120,960	15,792	198,823	303,619	30,166
Variación							
Mundial (%)	-6.0%	-0.9%	3.7%	-8.3%	1.0%	0.7%	-5.5%

Secretaría de agricultura y desarrollo rural, ASERCA y CIMA (2020).

En el mercado internacional, México es el mayor importador de maíz grano, seguido por Japón con adquisiciones similares.

La producción del maíz se divide en blanco y amarillo. El maíz blanco se destina principalmente al consumo humano, mientras que la producción de maíz amarillo se dirige a la industria de alimentos balanceados para la producción pecuaria.

A nivel mundial, el maíz amarillo presenta el mayor porcentaje de superficie sembrada y volumen de producción, en contraste con México, donde el maíz blanco ocupa el primer lugar. De acuerdo con cifras del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), el 54.5% del maíz blanco se produce en cuatro estados: Sinaloa, Jalisco, Michoacán y México (estados con mayor volumen

de producción de maíz), y el 59.0% de la producción de maíces de otros colores se concentra en México y Chiapas.

Comercio exterior 2019. México es deficitario en la producción de maíz grano amarillo, que impone la necesidad de adquirir significativas cantidades en el mercado externo. Por otra parte, se reconoce una suficiencia interna en la de grano blanco, incluso con excedentes para la exportación (SIAP, 2021).

Origen-destino comercial. Los principales oferentes internacionales del cereal de México son Estados Unidos (14 millones 252 mil 683 toneladas en 2019 y 14.7 millones de toneladas en 2020); y Brasil (un millón 817 mil 827 toneladas en 2019 y 1.3 millones de toneladas en 2020). Por el contrario, Venezuela, Guatemala y El Salvador destacan como destino de las exportaciones mexicanas con 633 mil, 91 mil y 67 mil toneladas, respectivamente en 2020 (SIAP, 2021).

En 2020 se registró un récord histórico en producción de maíz en México al alcanzar 27 millones 425 mil toneladas, lo que significó 0.7% más que en 2019 (27,228,242 toneladas), ocupando el octavo lugar en ranking mundial de producción de maíz (SIAP, 2021).

Tabla 3. Flujo comercial

México	Importaciones	Exportaciones	Saldo	Importaciones	Exportaciones
Variación (%) 2018-2019					
Volumen toneladas	16,070,511	798,141	-15,272,370	-5.3	-3.0
Valor millones de dólares	2,857	189	-2,668	-2.8	-5.2
Variación (%) 2019-2020					
Volumen toneladas	15,963,180	979,613	-14,983,567	-0.7	22.7
Valor millones de dólares	2,782	225	-2,557	-2.6	19.0

Secretaría de agricultura y desarrollo rural, SIAP (2021).

■ Aumenta, ■ Disminuye.

1.6. Anatomía del grano

El grano tiene cuatro estructuras físicas fundamentales: pericarpio (cáscara o salvado), endospermo, germen, pedicelo o pedículo (pico) (Benítez-Cardoza, 2006), como se observa en la figura 3.

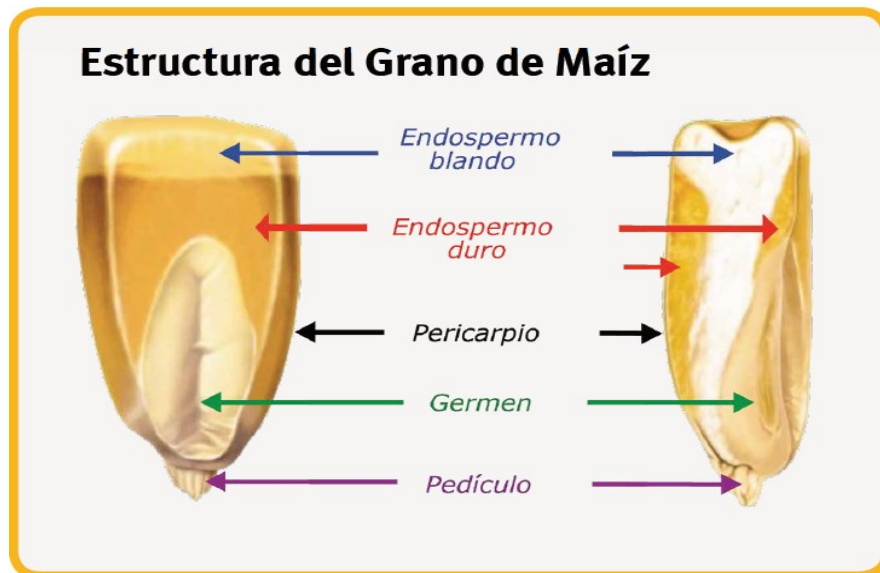


Figura 3. Estructura del grano de maíz (Benítez-Cardoza, 2006).

1.6.1. Pericarpio

El pericarpio, estructura exterior del grano que representa entre 3.4 y 9.5% del peso total del grano. Está compuesto principalmente por hemicelulosa (50-67%), celulosa (23-40%), lignina (0.1-1.3%) y proteínas (~ 2.4%). El pericarpio es una estructura no uniforme cubierta por una capa cerosa y comprende tres zonas principales: la zona I abarca el pedicelo; la zona II el germen y la zona III el endospermo. La celulosa forma fibras largas y transversales, mientras que las hemicelulosas forman fibras más cortas que atraviesan las fibras de celulosa. El grosor del pericarpio varía de 25-100 μm y los granos blandos tienen un pericarpio más delgado que los granos duros (Santiago-Ramos et al., 2018).

1.6.2. Endospermo

Comprende del 68.3-87.4% del peso seco del grano y consiste en dos tejidos, endospermo almidonado y aleurona. La aleurona es una capa de células que rodean el endospermo almidonado y es rica en fibra, proteínas, lípidos, vitaminas y minerales. Hay dos tipos de endospermo: duro o vítreo y blando o harinoso, que difieren en tamaño, morfología y grado de compactación de los gránulos de almidón. Los gránulos de almidón están rodeados por una matriz de proteínas, que es más densa en el endospermo duro que en el blando. El endospermo funciona como reserva energética a la planta durante su desarrollo. Químicamente el endospermo está compuesto por 90% de almidón y 7% en proteínas acompañadas de aceites, minerales y otros compuestos (Castro-López, 2019).

1.6.3. Germen

Es el embrión u órgano reproductor del grano y está compuesto por plúmula, radícula y escutelo. El escutelo constituye el 90% del germen y funciona como almacén de nutrientes y hormonas que son movilizados por enzimas sintetizadas en la etapa inicial de germinación hacia la plúmula. Todas las células del embrión y el escutelo son potencialmente activadas metabólicamente durante una hidratación. El germen constituye aproximadamente el 11% del peso del grano y químicamente está compuesto por aproximadamente un 35-40% del contenido total de lípidos encontrados en el grano (Yahuaca-Juárez, 2013).

1.6.4. Pedicelo o piloriza

Constituye un 0.8% del peso total del grano y es la parte que se une al olote, con una estructura esponjosa, adaptada para la rápida absorción de agua. Está compuesto de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, consta de una capa exterior de abscisión con la función de sellar la punta del grano maduro. A esta capa le sigue una serie de células parenquimatosas en forma de estrella, unidas entre sí por medio de sus puntas formando una estructura frágil y porosa (Yahuaca-Juárez, 2013).

1.7. Composición química del grano

El maíz presenta la composición química y estructural de la tabla 4. El endospermo está en su mayor parte compuesto por almidón, mientras que la mayor parte de las grasas, azúcares y contenido proteico se encuentran en el germen.

Tabla 4. Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz (%).

Composición (%)	Pericarpio	Endospermo	Germen	Pedicelo
Almidón	7.3	87.6	8.3	5.3
Proteínas	3.7	8.0	18.4	9.1
Extracto etéreo	1.0	0.8	33.2	3.8
Fibra cruda	86.7	2.7	8.8	78.6
Cenizas	0.8	0.3	10.5	1.6
Azúcares	0.34	0.62	10.8	1.6
% Materia seca	83.0	11.0	5.2	0.8

Fuente: Paliwal, (2001).

1.7.1. Almidón

Dentro de la composición química del maíz, el almidón es el principal constituyente, alcanzando niveles de 80-84% del peso total del grano en base seca y es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores, constituyendo una fuente de energía principalmente para el hombre (Tovar-Benítez, 2008). Químicamente el almidón está compuesto por dos polisacáridos: amilosa y amilopectina.

1.7.2. Proteínas

Constituyen aproximadamente el 10.3% del grano y se encuentran básicamente en el germen. La principal proteína en el maíz es una prolamina denominada zeína. La distribución proteica general del grano de maíz es de ~5% de albúminas y globulinas, ~44% de prolaminas, ~28% de glutelinas y el resto ~17% es una fracción de zeína con enlaces disulfuro. En las proteínas del grano de maíz, los dos aminoácidos limitantes son lisina y triptófano, no obstante, tiene un alto contenido de leucina. Cerca de la mitad de las proteínas del maíz están compuestas por zeína, la cual tiene un bajo contenido de aminoácidos esenciales, especialmente lisina y triptófano; esta deficiencia ha sido superada en el MPC que es el cereal de mayor valor nutrimental (Valderrábano-Amador, 2005).

1.7.3. Grasas

El aceite del grano de maíz se encuentra mayoritariamente en el germen, y viene determinado genéticamente, en valores que van del 3 al 18%. Tiene un bajo nivel de ácidos grasos saturados, como el palmítico y esteárico, con valores medios del 11% y 2%, respectivamente. En cambio, contiene niveles elevados del ácido graso esencial linoleico, con un valor medio del 24% (Sánchez-Ortega, I., 2014).

1.7.4. Fibra

La fibra dietética es el cuarto componente mayoritario localizándose fundamentalmente en el pericarpio y en la piloriza. La fibra insoluble está en mayor proporción que la fibra soluble, mientras que los granos enteros tendrán mayor cantidad de fibra que los granos descascarados (Sánchez-Ortega, I., 2014).

1.7.5. Azúcares libres

Los azúcares libres en el grano de maíz constituyen del 1 al 3%, siendo la sacarosa el azúcar de más alta proporción.

1.8. Nixtamalización

La nixtamalización (del náhuatl, *nextli*, cal de cenizas; y *tamalli*, masa cocida de maíz) es el principal proceso de transformación del maíz para su consumo (Escalante-Aburto et al., 2013) y fue primeramente utilizado por las culturas mesoamericanas (v, gr, Aztecas, Mayas) para la manufactura de muchos alimentos típicos que fueron y son el sustento principal de los pueblos mexicanos y centroamericanos (tortillas, tortillas chips, botanas, atoles, entre otros) (Vélez-Medina, 2004).

La importancia de la nixtamalización para la nutrición humana es innegable, al aumentar la disponibilidad de niacina, lisina (por medio de la desnaturalización de la fracción de las glutelinas, permitiendo una mayor digestibilidad de las mismas) y triptófano, aumentando el contenido de calcio, que en su conjunto han contribuido a prevenir pelagra, raquitismo y osteoporosis en México, Centroamérica y algunas sociedades estadounidenses (Kadir et al., 2019).

La nixtamalización es el proceso en el cual los granos, generalmente maíz, son cocidos con agua y cal para formar nixtamal (Vélez-Medina, 2004). La cal actúa en los componentes de la pared celular del grano de maíz y convierte la hemicelulosa en gomas solubles. La nixtamalización gelatiniza el almidón, saponifica parte de los lípidos, libera niacina y solubiliza parte de las proteínas que rodean los gránulos de almidón. Adicionalmente, debido al pH las cadenas de glucosa a partir de la amilosa y la amilopectina se cargan negativamente, lo cual ayuda a disminuir la retrogradación (Méndez-Montealvo et al., 2005).

Después de cocer el maíz con la cal, el producto obtenido, llamado nixtamal, se lava con agua para eliminar el exceso de cal, éste se moltura en molinos de piedra para obtener una pasta suave y cohesiva conocida como masa. La masa obtenida es una mezcla constituida por los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) mezclados con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo, proteínas y lípidos. Todos

estos componentes forman una malla compleja heterogénea dentro de una fase acuosa continua (Bello-Pérez et al., 2002).

El almidón, el componente principal del grano de maíz, cuando es cocido, sufre gelatinización y retrogradación procesos que se rigen por las características físicas del grano y las condiciones de elaboración. Además, el almidón interactúa con el calcio durante la cocción y con arabinoxilanos y lípidos durante la molienda y estas interacciones son relevantes para mejorar la característica viscoelástica de masa y la textura de tortilla (Preciado-Ortiz et al., 2018), que son las propiedades reológicas que se analizarán en este trabajo para predecir la absorción de aceite en la elaboración de tortillas chips.

1.8.1. Factores que influyen en el proceso de nixtamalización

Los cambios químicos en el maíz por la nixtamalización son el resultado de pérdidas de ciertas estructuras físicas del grano, así como también de pérdidas y modificaciones de compuestos químicos inducidos por factores que influyen en el proceso de nixtamalización como:

- Tiempo
- Temperatura de cocimiento
- Tipo y concentración de cal
- Características físicas y químicas del maíz como tipo de endospermo
- Estructura del grano, dureza, homogeneidad en tamaño, porcentaje de grano dañado, relación amilosa-amilopectina
- Frecuencia de agitación durante el cocimiento
- Procedimientos de lavado y reposo
- Gelatinización

Para obtener una tortilla de calidad, es importante controlar las condiciones del proceso de nixtamalización (Yahuaca-Juárez, 2013).

1.8.2. Tipos de nixtamalización

Hay dos tipos de industrias que procesan maíz para la producción de tortilla, la industria de masa y tortilla (MTI), y la industria de harina de masa seca o nixtamalizada (NFI). Ambos cocinan granos de maíz en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el proceso de “nixtamalización”. En el MTI, luego de cocinarse los granos se maceran varias horas en la solución de cocción para permitir el recocado del almidón, luego se enjuagan y muelen para obtener una masa que finalmente se moldea para producir tortillas (Preciado-Ortiz et al., 2018).

Actualmente se dispone de procesos alternativos a la nixtamalización tradicional (NT), como la nixtamalización por extrusión (NE) y la nixtamalización fraccionada (NF), que al igual que en la NT, los granos de maíz son sometidos a un tratamiento térmico-alcalino en presencia de exceso o limitada cantidad de agua. También se encuentra la nixtamalización seca y la nixtamalización ecológica (EP) donde se utilizan las sales de calcio a diferencia de la NT que utiliza hidróxido de calcio y la nixtamalización clásica, la cual se lleva a cabo con cenizas de madera.

El desarrollo de estos procesos alternativos se debe a que la NT requiere de largos periodos de tiempo y el uso de gran cantidad de agua, así como a la pérdida de fibra con la degradación del pericarpio y la pérdida de la fracción de proteínas solubles, que da como subproducto al líquido denominado "nejayote" cuyo pH es elevado y contiene gran cantidad de material orgánico, al cual es contaminante y se le han encontrado pocos usos. Los procesos alternos se enfocan a la reducción de tiempo de proceso y de efluentes contaminantes (Escalante-Aburto et al., 2013).

1.8.3. Efectos de la nixtamalización sobre el pericarpio

Debido a que el pericarpio es la capa externa de la estructura del grano, sufre los primeros cambios durante la nixtamalización. En la nixtamalización con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, estos cambios ocurren en dos etapas: la primera etapa es rápida y consiste en la solubilización del almidón y lípidos, mientras que la segunda etapa es más lenta y

consiste en la hidrólisis y solubilización de componentes estructurales del pericarpio. El uso de agentes de cocción alcalinos produce una alta concentración de iones OH⁻, lo cual da como resultado un medio alcalino que hidroliza enlaces éster de la estructura celulosa-hemicelulosa-lignina. Debido al efecto del medio alcalino la capa más externa del pericarpio nixtamalizado se caracteriza por tener una superficie rugosa o una estructura similar corrugada con numerosos microporos, degradación, disolución o eliminación parcial de los componentes del pericarpio. Además, se presenta una pérdida de la capa cerosa y aumentos en los diámetros de los componentes de la fibra, lo que indica absorción de agua e hinchamiento (Martínez et al., 2001; Campechano-Carrera et al., 2012).

En la NT, entre el 6.4 y el 25.0% de la hemicelulosa del pericarpio de maíz se solubiliza y se pierde en la solución de cocción. Las hemicelulosas solubilizadas comprenden principalmente azúcares neutros (84.2%), como arabinosa (0.54-34.4%), xilosa (49.0-64.23%), galactosa (1.10-5.6%), glucosa (0.4-5.10%) y manosa (0.60%), con trazas de ácido glucurónico (6.6-8.60%), proteínas (4.5-5%), cenizas (5.10%) y los ácidos ferúlicos, diferúlico y triferúlico. Las trazas de lignina se eliminan parcialmente de la matriz de fibra y se lixivian en la solución de cocción juntas, con trazas de proteína.

En el pericarpio surge la interacción del calcio con los componentes del mismo pericarpio, acumulando el calcio en formas de racimos de CaCO₃, sin embargo, en tiempos prolongados el contenido de calcio se reduce debido a la solubilización y lixiviación de los componentes del pericarpio en la solución de cocción (Valderrama-Bravo et al., 2010).

1.8.4. Efectos de la nixtamalización en el endospermo

La cocción alcalina no altera la estructura de la aleurona. El primer cambio que tiene lugar en el endospermo durante la cocción y el remojo es la absorción de agua. La difusión del agua depende en gran medida de tres factores: 1) permeabilidad del pericarpio; 2) las características físicas del grano, principalmente dureza y grado de compactación de los gránulos de almidón, y 3)

variables de nixtamalización. El pericarpio forma una barrera para la entrada de agua; por tanto, su hidrólisis potencia el proceso de hidratación. Por otro lado, los granos blandos permiten que el agua se difunda rápidamente debido al empaquetamiento suelto de los gránulos de almidón, en comparación con los granos duros, que tienen una matriz proteica muy densa que rodea los gránulos de almidón (Santiago-Ramos et al, 2018).

1.9. Almidón

El almidón es un polímero cuya estructura molecular se basa en la unión de moléculas de glucosa que están unidas entre ellas mediante enlaces α -D-(1-4) y/o α -D-(1-6), que forman sus dos macromoléculas principales: la amilosa, polímero lineal que puede llegar a tener ramificaciones, con grado de polimerización de 100 a 1000 unidades de D-glucosa con enlaces α - (1-4) y la amilopectina, un polímero ramificado con aproximadamente un 5% de ramificaciones, con grado de polimerización de aproximadamente 40.000 unidades de glucosa unidas con α - (1-6). Las cadenas de amilopectina forman dobles hélices que contribuyen a la estructura semicristalina de los gránulos de almidón.

El almidón es único entre los carbohidratos que ocurren en la naturaleza en forma de gránulos constituidos por regiones amorfas y semicristalinas. Es reconocida la gran importancia que tiene la organización física de estos gránulos en su funcionalidad y por tanto en el comportamiento de los productos alimenticios con formulaciones ricas en almidón.

Por su tamaño y complejidad, el gránulo de almidón crudo no es digerible por el organismo humano debido a su estructura semicristalina, por lo cual se deben utilizar procesos calor-humedad para transformarlo, obteniéndose un almidón gelatinizado (Pineda-Gómez et al., 2010).

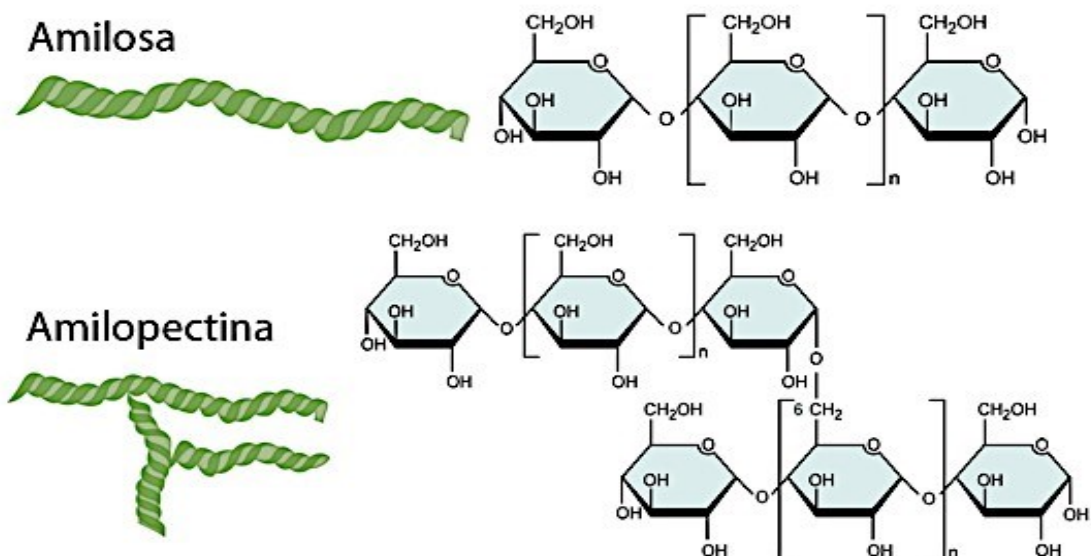


Figura 4. Estructura espacial y de Haworth de la amilosa y amilopectina (Curiosoando.com, 2017).

La estructura del almidón está integrada por capas concéntricas de amilosa y amilopectina distribuidas radialmente en las que se alternan regiones amorfas y semicristalinas. Estos cuerpos son birrefringentes, es decir, tienen dos índices de refracción, por lo cual cuando se irradian con luz polarizada desarrollan la típica “cruz de Malta” debido a las regiones cristalina y amorfa. El fenómeno de birrefringencia que presentan los gránulos de almidón indica un alto orden dentro del gránulo sin hacer referencia a ninguna forma cristalina. El carácter cristalino de los gránulos de almidón surge de la organización de las moléculas de la amilopectina (específicamente a partir de las cadenas de la amilopectina estructuradas en racimos), mientras que la región amorfa está conformada por los puntos de ramificación de la amilopectina y por la amilosa (Tupa-Valencia, 2019).

La concentración de amilosa y amilopectina está regida por factores genéticos típicos de cada cereal. También influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos (tabla 5), principalmente por su capacidad de hidratación y gelatinización.

Tabla 5. Propiedades generales de algunos gránulos de almidón y sus pastas.

	Almidón de maíz común	Almidón de maíz ceroso	Almidón de papa	Almidón de yuca	Almidón de trigo
Tamaño del gránulo (Eje mayor, μm)	2-30	2-30	5-100	4-35	2-55
Amilosa (%)	28	<2	21	17	28
Temperatura de gelatinización ($^{\circ}\text{C}$) (a)	62-80	63-72	58-65	52-65	52-85
Viscosidad relativa	Media	Media-alta	Media - baja	Alta	Baja
Reología de la pasta (b)	Corta	Larga (cohesiva)	Muy larga	Larga (cohesiva)	Corta
Claridad de la pasta	Opaca	Muy ligeramente turbia	Clara	Clara	Clara
Tendencia de gelificar/retrogradar	Alta	Muy baja	Media a baja	Media	Alta
Lípidos (%GS)	0.8	0.2	0.1	0.1	0.9
Proteínas (%GS)	0.35	0.25	0.1	0.1	0.4
Fósforo (%GS)	0	0	0.08	0	0
Sabor	Cereal ligero	Limpio	Ligero	Insípido	Cereal ligero

Fuente: Valderrábano-Amador (2005).

- a) Desde la temperatura inicial de gelatinización hasta completar la formación de la pasta.
- b) Para la descripción del flujo largo y corto.

1.9.1. Gelatinización

El almidón es insoluble en agua fría, sin embargo, cuando se calienta en presencia de agua comienza un proceso lento de absorción de agua en las zonas intercelulares amorfas, que son las menos organizadas y las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni rígidos como en las áreas

cristalinas. Conforme se incrementa la temperatura, se retiene más agua y el gránulo empieza a hincharse y a aumentar de volumen, una vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la cristalina inicia un proceso semejante. El producto final generalmente consta de una dispersión de componentes moleculares y/o gránulos hinchados y/o gránulos lixiviados en el medio acuoso. El proceso descrito es llamado gelatinización y es una transición de un estado ordenado a uno desordenado. Esto se manifiesta con la pérdida de la birrefringencia.

La gelatinización es una de las transiciones más importantes del almidón la cual tiene gran impacto en el procesamiento, calidad y estabilidad de los productos basados en almidón.

Durante la nixtamalización los perfiles de temperatura se pueden dividir en dos regiones, la primera que incluye la etapa de cocción y los primeros minutos de maceración, y la segunda que comprende el resto de la fase de remojo. Las temperaturas de cocción son normalmente más altas que la temperatura de gelatinización del almidón de maíz ($> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$), y la temperatura permanece más alta durante los primeros minutos de remojo. Estas condiciones causan una gelatinización completa en la parte externa del endospermo, que comprende del 10 a 20% del endospermo completo, mientras que en el 80% restante, que comprende las capas internas del endospermo, el almidón se gelatiniza parcialmente. En la Región 2, los granos de maíz cocidos permanecen en la solución de cocción, pero la temperatura desciende por debajo de la temperatura de gelatinización del almidón. Por tanto, en esta etapa, las condiciones son adecuadas para el recocado: un exceso de agua; mucho tiempo y temperaturas de subgelatinización. El recocado ocurre en los gránulos de almidón internos que representan casi el 80.0% del endospermo total y no están gelatinizados. En este proceso, el almidón sufre una reorganización molecular de las cadenas de almidón en la fase amorfa, mejorando su estructura cristalina. (Santiago-Ramos et al., 2018).

Los estudios de Valderrama-Bravo et al., (2010) revelaron que en la nixtamalización tradicional con Ca(OH)_2 , el calcio se difunde en la estructura del endospermo por percolación y, al igual que en el pericarpio, este proceso depende de la temperatura y del tiempo de maceración. A medida que aumentan la temperatura y el tiempo de maceración, también aumentan la hidrólisis y solubilización de los componentes del pericarpio y se forman micro agujeros; a través del cual el calcio se difunde al endospermo.

1.9.2.Retrogradación.

En la retrogradación del almidón las cadenas moleculares del polímero gelatinizado comienzan a reorganizarse para formar nuevamente una estructura ordenada. El proceso es acompañado por un incremento gradual de la rigidez, dándose la formación de un gel, y posteriormente se inicia la separación de fases entre el polímero y el solvente (sinéresis). Un gel es un sólido elástico con un sistema de dos fases: una fase continua sólida y una fase dispersa. La fase continua está compuesta por polímeros de amilosa. En el enfriamiento del almidón gelatinizado se forman puentes de hidrógeno intermitentes entre las moléculas de amilosa que se reorganizan formando el gel. Las moléculas, de la amilopectina del gránulo de almidón tienen menos tendencia que la amilosa a reorganizarse, debido a que las moléculas altamente ramificadas no forman fácilmente enlaces o geles. La poca reorganización de la amilopectina se da predominantemente en las ramas cortas ultraperiféricas. A medida que la retrogradación ocurre la pasta se vuelve opaca. Con el tiempo este gel, que ha sido enfriado y mantenido en reposo, produce más asociación de tipo cristalino procedente de la amilosa y se manifiesta claramente la pérdida de agua contenida en la fase continua (Tupa-Valencia, 2019).

La retrogradación es generalmente una propiedad indeseable en geles de almidón porque afecta profundamente la calidad, aceptabilidad, y la vida útil de

productos que contienen este polímero, principalmente en la industria de alimentos.

1.9.3. Complejos de amilosa-lípido

Los complejos de amilosa-lípidos están presentes de forma natural en el almidón de maíz. Se clasifican como complejos de tipo I. Después de cocinar y remojar, se han reportado tres fenómenos para los complejos nativos de lípidos y amilosa Tipo I: 1) lixiviación; 2) la formación de nuevos complejos y 3) la transformación en complejos de Tipo II. En primer lugar, la gelatinización parcial del almidón mejora la lixiviación de los complejos de amilosa-lípido presentes en las capas externas del endospermo. En segundo lugar, se forman nuevos complejos de amilosa-lípido principalmente de tipo II entre los lípidos libres y la amilosa lixiviada debido a la gelatinización. En nixtamalización con Ca(OH)_2 es posible que la mayoría de los lípidos unidos con amilosa sean sales de ácidos grasos, producidas por la saponificación. La extensión de las interacciones de Ca-almidón influye en la lixiviación y formación de complejos de amilosa-lípido durante la nixtamalización, lo que reduce la movilidad de las cadenas de almidón y su capacidad para formar complejos. El tercer fenómeno es la transformación del tipo I en complejos de amilosa-lípido de tipo II, que son estructuras más ordenadas. Esto es posible porque, durante la cocción, los complejos nativos se calientan a temperaturas superiores a los 90 °C (Santiago-Ramos et al, 2018).

1.9.4. Digestibilidad del almidón

La digestibilidad del almidón disminuye levemente desde el maíz crudo hasta el nixtamal como resultado de un aumento en el contenido de almidón resistente (RS). Este aumento podría deberse al recocido durante el remojo, lo que aumenta la estructura cristalina del gránulo de almidón y aumenta la formación de complejos de amilosa-lípido. Por lo tanto, el contenido total de RS de nixtamal es

una mezcla de RS Tipo 1 y RS Tipo 5. No se han reportado cambios significativos en el contenido de almidón resistente de nixtamal a masa, pero existen tres tipos de RS: almidón físicamente inaccesible (RS1); complejos de amilosa-lípido (RS5) y almidón retrogradado (RS3) (Villada-Villalobos et al., 2017).

1.10. Molienda

Una vez lavado el nixtamal, se muele para obtener la masa. La molienda se realiza entre dos piedras, donde los granos cocidos se desintegran por compresión y fuerzas de cizallamiento, alcanzando temperaturas superiores a 55 y 85°C, que es superior a la temperatura de gelatinización del almidón de maíz. Esta acción aumenta el daño del almidón y el grado de gelatinización aumenta en un 15% adicional (Villada-Villalobos et al., 2017).

1.11. Horneado

La masa se moldea en tortillas, posteriormente mediante horneado se deshidrata para reducir la humedad a 35% promedio, permitiendo que este alimento se conserve fresco durante seis meses sin conservadores (Vélez-Medina, 2004).

En la etapa del horneado aún existe una gran cantidad de humedad, esto induce que el fenómeno de gelatinización, ya que además existe una temperatura mayor a la requerida para iniciar el proceso de gelatinización (Villada-Villalobos et al., 2017).

1.12. Tortillas de maíz

La tortilla fue la industrialización primitiva del maíz; un producto alimentario que tenía la versatilidad de acompañar a los demás alimentos y aún seca era comestible, no se descomponía, además también se consideraba fácil de hidratar.

Fue tan hábil, exitosa y apropiada la creación de la tortilla, que ha perdurado hasta nuestros días, y su producción se ha modernizado para adaptarse a los niveles de progreso de las sociedades modernas. Las tortillas siguen usándose como principio, medio y fin de las comidas, y de su inagotable especie surgirán los llamados “antojitos”, para después llegar a lo que en la actualidad conocemos como “tortilla chips” o botanas a base de tortilla (Vélez-Medina, 2004).

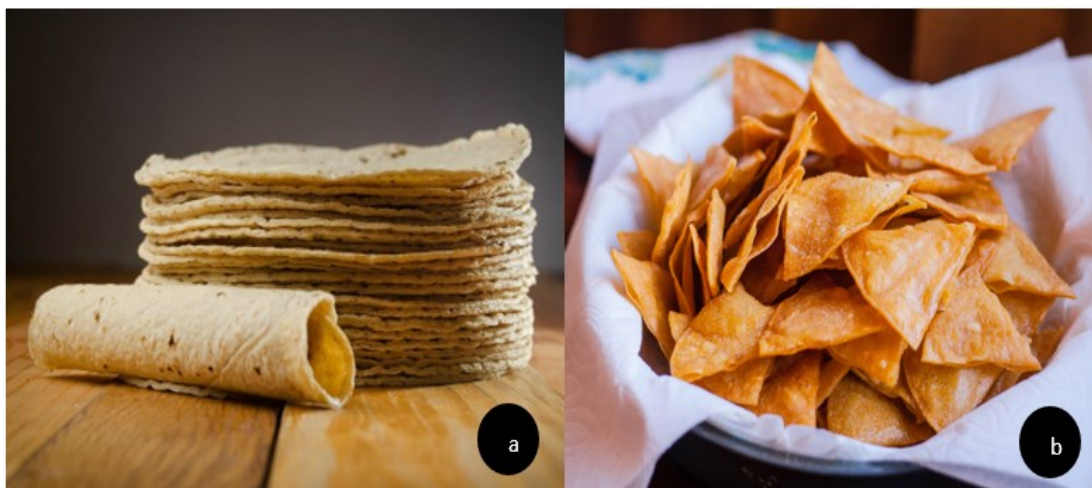


Figura 5. a) Tortilla de maíz (Mier, 2016) y b) Tortilla chip (Williams, 2020).

1.13. Freído

La etapa del freído de los alimentos es uno de los procesos más antiguos de los que se tiene registro, probablemente esta práctica data del siglo VI a. de C, y fue probablemente uno de los primeros procesos técnico - culinarios que permitió prolongar la vida útil de los alimentos (Montes-Olivares et al., 2016).

La fritura es una operación unitaria que se realiza por inmersión, en aceite o grasa comestible a una temperatura superior al punto de ebullición del agua, por lo general 150 a 200 °C. Conserva los alimentos por la destrucción térmica de los microorganismos y la reducción de la actividad de agua (A_w). Con el freído, los alimentos adquieren ciertas características agradables de color, textura y aroma que son consecuencia, de la reacción de Maillard, de la absorción por el alimento de compuestos volátiles presentes y la formación de una corteza crocante, porosa,

aceitosa y un interior húmedo y cocido (Guzmán-Bello et al., 2012). La reacción de Maillard y la caramelización convierte la corteza en dorada, color marrón y le proporciona sabores deseables.

El objetivo del proceso de freído consiste en sellar los alimentos en aceite caliente y obtener las características deseables de los productos fritos como olor, color y crujencia. La cantidad de aceite absorbido es directamente proporcional a la cantidad de humedad perdida (Guzmán-Bello et al., 2012).

Durante el freído de la tortilla, el aceite ocupa más de los espacios vacíos de la estructura de la tortilla, y la evaporación del agua crea espacios, lo cual fuerza más la absorción del aceite dentro de la estructura. La gelatinización adicional del almidón ocurre durante los primeros 10 a 15 segundos del freído (Plascencia-Gonzales, 1998).

1.13.1. Tortillas chips

Los totopos son de origen náhuatl y el término significa dorar o tostar, son elaborados a partir de tortillas de maíz, tienen forma triangular con consistencia crujiente y textura áspera; en el mercado se pueden encontrar horneados o fritos. Pueden ser consumidos solos o acompañados de algún ingrediente como guacamole, frijoles, etc. Forman parte del grupo de los alimentos llamados “snack” (Morales-Martínez, 2020).

1.14. Propiedades reológicas

En la industria alimentaria la reología es el estudio de la deformación y flujo de los materiales, productos intermedios y finales. Su conocimiento es primordial en la investigación e innovación de nuevos alimentos, nos ayuda a mejorar el proceso de elaboración de estos.

La reología se manifiesta mediante las propiedades de textura de un alimento que es lo primero que el consumidor detecta al iniciar la masticación del alimento.

Estas propiedades conforman el mayor atributo de calidad del alimento, de ahí su importancia.

1.15. Análisis de perfil de textura

La textura incluye un número de sensaciones físicas diferentes, siendo más conveniente utilizar el término propiedades texturales que textura. Las propiedades texturales de un alimento son el grupo de características físicas que dependen de los elementos estructurales del material, se perciben por el sentido del tacto, se relacionan con la deformación, desintegración y flujo por la aplicación de una fuerza, y se miden objetivamente como una función de masa, tiempo y distancia (Rodríguez-Sandoval et al., 2005).

El análisis de perfil de textura (con siglas en inglés TPA) es un método que comprime una porción del alimento dos veces en movimientos recíprocos que imitan la acción de la quijada de una persona, obteniéndose siete parámetros texturales de una curva de fuerza-tiempo (Rodríguez-Sandoval et al., 2005). Los parámetros texturales son los siguientes:

- 1. Fracturabilidad:** la fuerza al primer rompimiento significativo en la curva (N).
- 2. Dureza:** la máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión (N). Se define como la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada
- 3. Adhesividad:** el área bajo la curva de fuerza de cualquier pico negativo después del primer ciclo de compresión (J). Representa el trabajo necesario para que el dispositivo se despegue totalmente de la masa.
- 4. Cohesividad:** la razón del área bajo la curva de fuerza positiva de la segunda compresión con respecto a la primera compresión (adimensional). Se define como la resistencia de los enlaces internos que forman el cuerpo del producto.

5. Elasticidad: la altura que recupera el espécimen durante el tiempo entre el final del primer golpe y el comienzo del segundo (m). Es un índice de la recuperación elástica total de material.

6. Gomosidad: el producto de la dureza y la cohesividad (N).

7. Masticabilidad: el producto de la elasticidad y la gomosidad (J).

II. JUSTIFICACIÓN

La demanda por los productos fritos sigue aumentando en México con 31.8% desde el 2013 (Morales-Martínez, 2020). Particularmente en México el 58% de los consumidores prefieren botanas a base de maíz (PROFECO, 2018). Debido a la alta demanda de consumo que tienen las botanas fritas ha surgido la necesidad de investigar cómo mejorar su calidad nutricional y funcional, por lo que una comprensión más clara de los factores que inducen la absorción de aceite, permitirá reducir la cantidad de aceite en el producto final, a su vez que aplicando las propiedades reológicas de la masa se podrá anticipar el comportamiento del producto frito durante el freído, con el objetivo de disminuir su contenido de aceite; La Organización para la Agricultura y los Alimentos y la Organización Mundial de la Salud indican que el alto consumo de alimentos fritos es un factor de riesgo para la salud promoviendo el aumento de obesidad, principalmente por su alta densidad energética que se presenta a expensas de la grasa y por la formación de compuestos tóxicos como la acrilamida relacionada con el desarrollo de algunos tipos de cáncer (Montes-Olivares et al., 2016). Así mismo, a nivel mundial se están cambiando los patrones de consumo por la de productos más sanos, derivado de una mayor preocupación por los consumidores más jóvenes. Por lo que una alternativa es ofrecer productos tradicionales ampliamente aceptados por la población, como son las tortillas chips que tengan menos calorías y que sean de utilidad en la prevención del sobrepeso y obesidad y de las enfermedades que de ahí se derivan.

III. HIPÓTESIS

La gelatinización del almidón de maíz aumenta con el tiempo de nixtamalización y tiene una relación directa con la absorción de aceite en el proceso de freído en la elaboración de tortilla chip.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de las propiedades reológicas de una masa nixtamalizada a diferentes tiempos y su relación con la absorción de aceite en tortillas chips.

4.2. Objetivos específicos

- Obtener harinas con diferentes tiempos de nixtamalización.
- Llevar a cabo pruebas reológicas de perfil de textura (TPA) en las masas obtenidas.
- Determinar el contenido de grasa en las tortillas chips elaboradas con harina nixtamalizada a diferentes tiempos.
- Utilizar el TPA como herramienta para controlar de forma indirecta el grado de gelatinización y absorción de aceite en tortillas chips.

V. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1. Material

Se utilizó maíz blanco comercial (figura 6) cultivado en Sinaloa, México, adquirido en la central de Abastos de la ciudad de Morelia, Michoacán. Se limpió para eliminar grano dañado, basura y cualquier tipo de contaminación. Los reactivos utilizados fueron de grado alimenticio como agua purificada e hidróxido de calcio, grado A.C.S comprado en Materiales y Abastos Especializados S.A. de C.V. Golden Bell Reactivos.

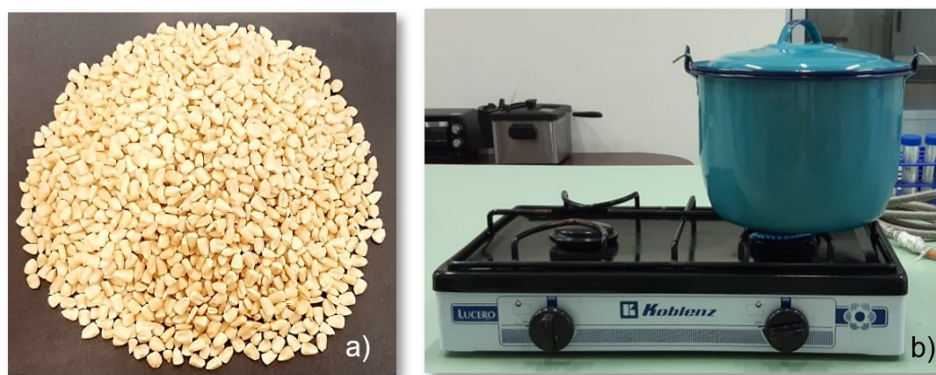


Figura 6. a) Maíz de Sinaloa, México, utilizado para cocción térmico-alkalina, b) Cocimiento de granos de maíz.

5.2. Métodos

5.2.1. Nixtamalización tradicional

Se realizaron cuatro tratamientos de nixtamalización de acuerdo con el proceso utilizado por Topete-Betancourt et al., (2020). Para cada tratamiento se coció 1kg de maíz en una solución de 3L de agua con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 1.0% (p/p) a una temperatura de 94 °C. Cada nixtamalización se llevó a cabo con un tiempo diferente de cocción como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones y Tiempos de nixtamalización de grano comercial.

Tratamiento	Maíz (Kg)	Agua (L)	Ca(OH) ₂ (g)	Tiempo de nixtamalización (min)
T-1	1	3	30	20
T-2	1	3	30	35
T-3	1	3	30	45
T-4	1	3	30	60

Posterior a la cocción, el nixtamal se retiró del fuego y se dejó reposar 16h (tiempo de reposo igual para los cuatro tratamientos) a temperatura ambiente (20 a 25 °C). Se separó el nejayote por decantación para determinar su volumen y el nixtamal se lavó con 2 L de agua tres veces, para eliminar el exceso de hidróxido de calcio.



Figura 7. Nixtamal lavado y cuantificación del nejayote después del reposo de 16 horas.

5.2.2. Molienda

El grano de maíz nixtamalizado se molió con un molino de piedra como se muestra en la figura 8, de la marca ARENAS para obtener una masa blanda y húmeda.



Figura 8. Molino de piedras ARENAS.

5.2.3. Elaboración de harina

Los cuatro lotes de masas con diferentes tiempos de nixtamalización se deshidrataron en un horno de secado (9053A ECOSHEL) con temperatura constante de 50°C por un tiempo de 24 horas (figura 9).



Figura 9. Deshidratación de la masa en Horno de Secado.

Las muestras deshidratadas se molieron por separado en una licuadora (Hot Spot Profesional de 3 velocidades) y se hicieron pasar por malla del No. 60 (250 μ m) DAIGGER U.S.A. Standard Testing Sieve A.S.T.M. E-11 Specification,

para obtener una harina fina con tamaño de partícula homogéneo. Las harinas se almacenaron en bolsas de plástico para su posterior análisis (figura 11).

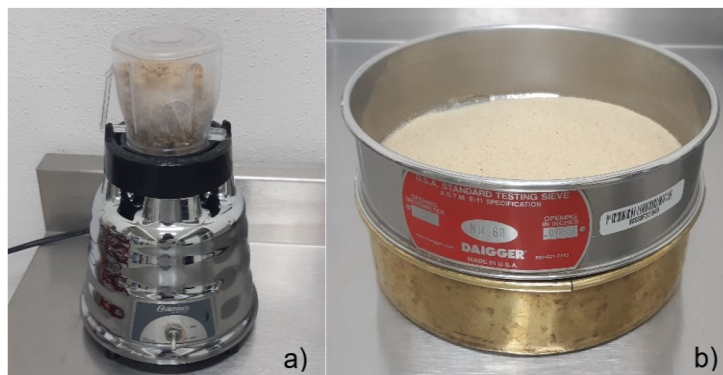


Figura 10. a) Molienda de harinas y b) Tamizado de las harinas en malla del No. 60.



Figura 11. a) Harina de maíz nixtamalizada 60 min, b) Harina de maíz nixtamalizada 45 min, c) Harina de maíz nixtamalizada 35 min y d) Harina de maíz nixtamalizada 20 min.

5.2.4. Humedad de la harina, masa y totopos

Se determinó la humedad según el método de referencia AOAC (32.1.03) gravimétrico, el cual consiste en el secado de la muestra en estufa durante 3 h a 100-105°C. Las determinaciones se realizaron en un horno Felisa, figura 12.



Figura 12. Horno Felisa.

CÁLCULOS

Los cálculos de humedad se expresaron en base a la fórmula 1 para harina y totopos, mientras que se usó a la fórmula 2 para el caso de la masa rehidratada.

Fórmula 1. Contenido de humedad en base seca: es el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca.

$$\%H_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} (100)$$

Donde:

% H_{bs}= Humedad base seca

m_{H₂O}= masa de agua dentro del material

m_s = masa seca

100=constante

Fórmula 2. Contenido de humedad en base húmeda: es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} (100)$$

Donde:

$\% H_{bh}$ = Humedad base húmeda

m_h = masa total

m_{H_2O} = masa de agua dentro del material

100=constante

5.2.5. Preparación de tortillas chips

Se utilizó la fórmula 3 para rehidratar la harina ajustando su humedad a 61%.

Fórmula 3.

$$\delta_{H_2O} = m_h \frac{(\%H_f - \%H_{i1})}{(100 - \%H_f)}$$

(Martínez-López et al., 2010).

Donde:

δ_{H_2O} = Masa de agua que absorbe ($\delta_{H_2O}>0$) o evapora ($\delta_{H_2O}<0$) el material

m_h = Masa total

$\%H_f$ = Humedad final

$\%H_{i1}$ = Humedad inicial

100=constante

La masa rehidratada se dejó reposar 3 min para homogenizar la mezcla en una bolsa de plástico, posteriormente se moldeó en forma de discos aplanados con una tortilladora manual de rodillos Marca González, obteniendo tortillas con un grosor de 0.18 mm. Dichas tortillas se cortaron con un molde triangular (5x5x5 cm). Las tortillas chips producidas con 1.17 g de peso promedio y 0.18 mm de espesor se muestran en la figura 13.

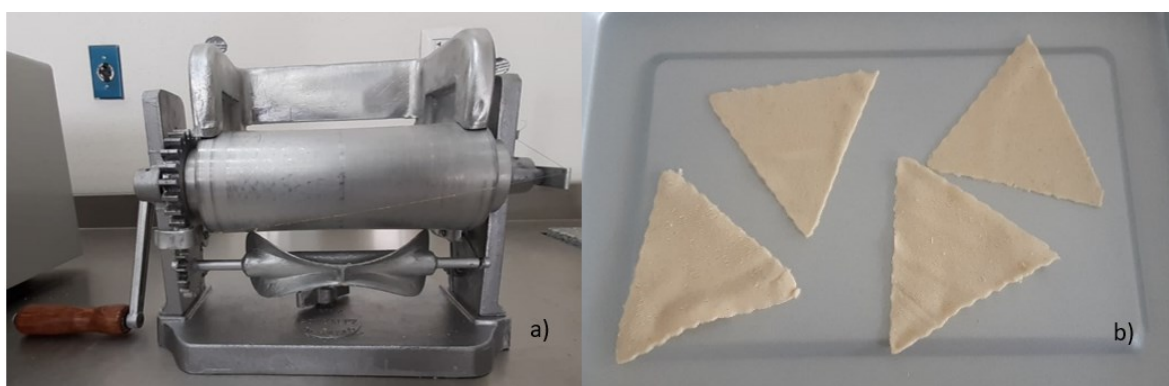


Figura 13. a) Tortilladora manual de rodillos y b) Tortilla chip cruda.

Las tortillas chips se cocinaron en un horno tostador (T-fal, modelo: OF3108MX) a 230 °C durante 2 min 30 s (30 s, 30 s, 30 s, por cada lado), enseguida se dejaron reposar 15 min hasta alcanzar la temperatura ambiente. Para el freído se usaron lotes de aproximadamente 14 g de tortillas chips cocinadas, dichos lotes se sumergieron en 2 L de aceite de soya (Nutrilioli) a una temperatura de $180 \pm 5^\circ\text{C}$ por 23 seg en una freidora Hamilton Beach. Terminado el freído los totopos se dejaron 15 min a temperatura ambiente para ser guardados en bolsas de plástico y analizarse al siguiente día.

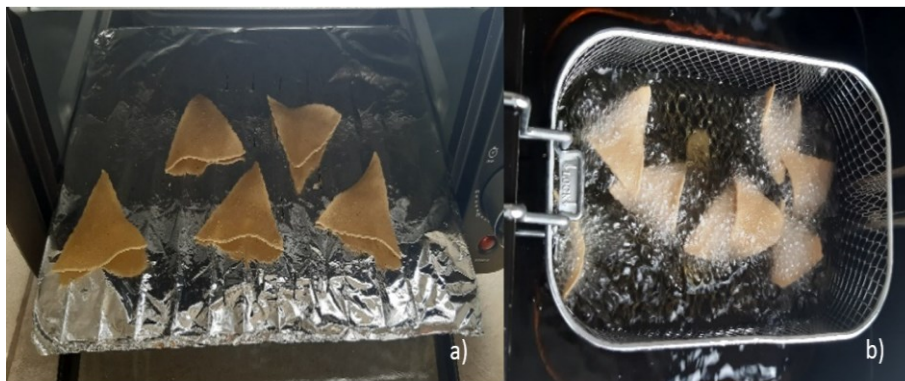


Figura 14. a) Horneado de tortilla chip y b) Freído de tortilla chip.

5.2.6. Determinación de extracto etéreo

La determinación de lípidos se realizó con el método Soxhlet, el cual consiste en:

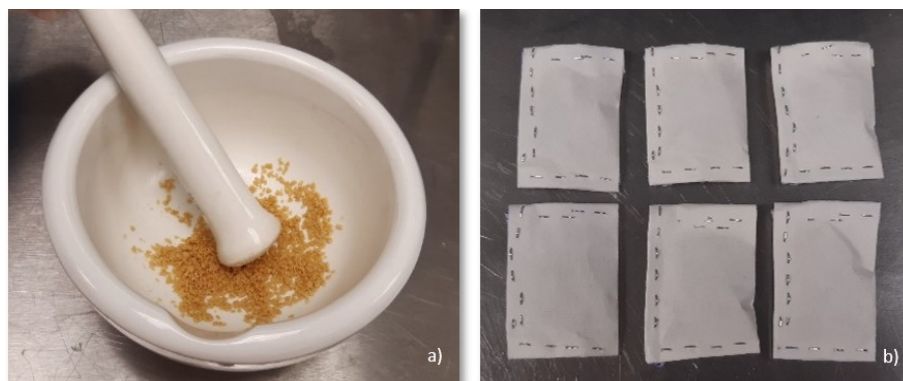


Figura 15. a) Trituración de totopos y b) Cartuchos de papel filtro.

1. Transferir 2 g de muestra molida en el cartucho.
2. Colocar el cartucho dentro del extractor Soxhlet.
3. En la parte inferior ajustar un matraz (llevados previamente a peso constante por calentamiento a 100 – 110°C una hora). Colocar el refrigerante.
4. Añadir éter por el extremo superior del refrigerante en cantidad suficiente para tener 2 o 3 descargas del extractor (alrededor de 250 ml).

5. Hacer circular el agua por el refrigerante y calentar hasta que se obtenga una frecuencia de unas 2 gotas por segundo.



Figura 16. Extracción Soxhlet.

6. Efectuar la extracción durante 4 a 6 h. Suspender el calentamiento, quitar el extractor del matraz y dejar caer una gota de éter del extractor a un papel o vidrio de reloj, si al evaporarse el éter se observa una mancha de grasa, ajustar el Soxhlet de nuevo al matraz y continuar la extracción.
7. Evaporar suavemente el éter del matraz en rotavapor y secar a 100 °C durante 1 h.



Figura 17. Eliminación de éter en rotavapor.

CÁLCULOS

Fórmula 4.

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \frac{W_3 - W_1}{W_2} (100)$$

Donde:

W_1 = Peso constante del matraz.

W_2 = Peso de la muestra.

W_3 = Peso del matraz con extracto etéreo

5.2.7. Análisis del perfil de textura (TPA) en masa de los cuatro tratamientos de nixtamalización

Las masas se prepararon a una humedad de 61% utilizando la fórmula 3 que se muestra en el apartado 5.2.5. Preparación de tortillas chips.

La forma de la muestra de masa se realizó con un molde cilíndrico con una altura de 50 mm y 22 mm de longitud. Se usaron 40 g de masa para rellenar el molde cilíndrico y con un rodillo metálico de 900 g se compactó de forma uniforme la masa eliminando el exceso, para de esta forma obtener un cilindro de masa, como se muestra en la figura 18.

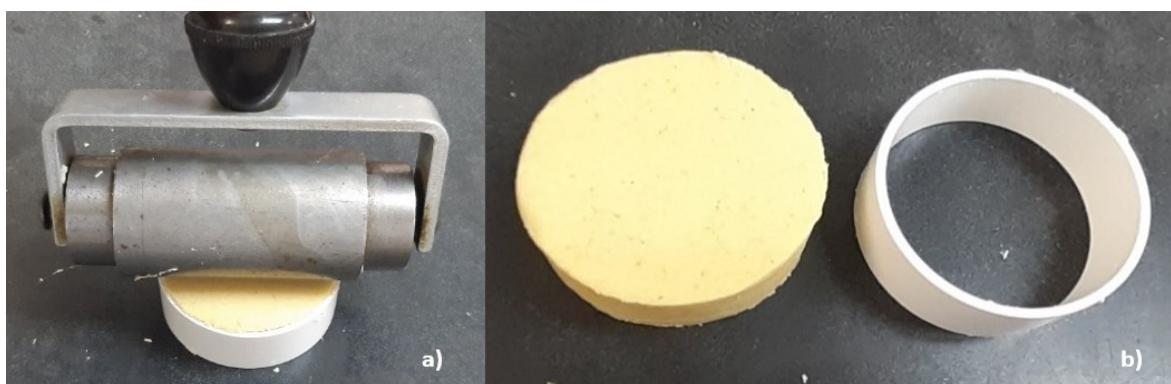


Figura 18. a) Compactación de la masa con rodillo metálico y b) Obtención de cilindro de masa al retirar el molde.

El cilindro de masa obtenido se utilizó para realizar el análisis de perfil de textura en el Texture Analyzer (TexturePro CT V1.7 Build 28, Brookfield Engineering Labs. Inc.) modelo CT3 25K con la sonda TA-18 redondeada (diámetro de 1.2 cm) del TA-RT-KIT, con una deformación del 40%, carga de activación 0.05 N, frecuencia de muestreo 20 puntos/segundo y una velocidad de 1 mm/s, como se muestra en la figura 19. Se realizaron dos ciclos sin tiempo de espera y con una celda de carga de 25000 g. Se examinaron 3 muestras por experimento.



Figura 19.Texture Analyzer.

Se usó el programa Prisma 8 para calcular la dureza, cohesión, elasticidad y adhesividad de la masa mediante gráficas de acuerdo con los datos arrojados por el software utilizado en el texturómetro.

CÁLCULOS

El método utilizado para determinar el TPA de la masa es el reportado por Topete-Betancourt et al., (2020) donde:

De la curva fuerza-tiempo (figura 20) se calcularon los parámetros que a continuación se definen:

Adhesividad (Ad). Área bajo la curva desde el inicio de la retirada del dispositivo hasta que la fuerza llega a cero o se hace constante y representa el trabajo necesario para que el dispositivo se despegue totalmente de la masa.

Ad= área 3

Elasticidad (E). Es un índice de la recuperación elástica total de material, incluyendo la recuperación elástica ideal o instantánea y la recuperación retardada por el comportamiento viscoso. Se calcula como la distancia recuperada por la muestra en el tiempo transcurrido desde el término de la compresión en el primer ciclo y el inicio del segundo en relación con la distancia comprimida.

$$E = \frac{\text{Longitud 2}}{\text{Longitud 1}}$$

Resiliencia (R). Se define como la capacidad de un cuerpo de almacenar energía elásticamente. Se calcula con el área bajo la curva en la descompresión del primer ciclo sobre el área bajo la curva en la compresión de este.

$$R = \frac{\text{Área 5}}{\text{Área 4}}$$

Cohesión (C). Se define como la resistencia de los enlaces internos que forman el cuerpo del producto. Se calcula como el área total bajo la curva del segundo ciclo de compresión sobre el área total bajo la curva en el primer ciclo.

$$C = \frac{\text{Área 2}}{\text{Área 1}}$$

Dureza (D). Se define como la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada y se calcula como la fuerza máxima en el primer ciclo de compresión.

D= fuerza pico 1.

Curva modelo de perfil de textura

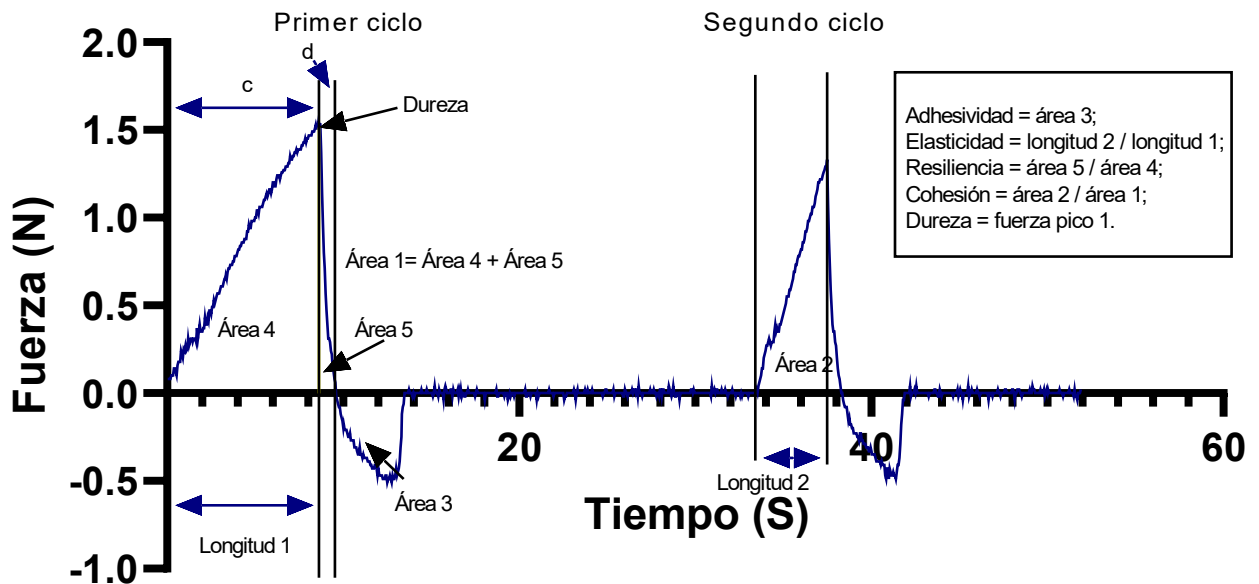


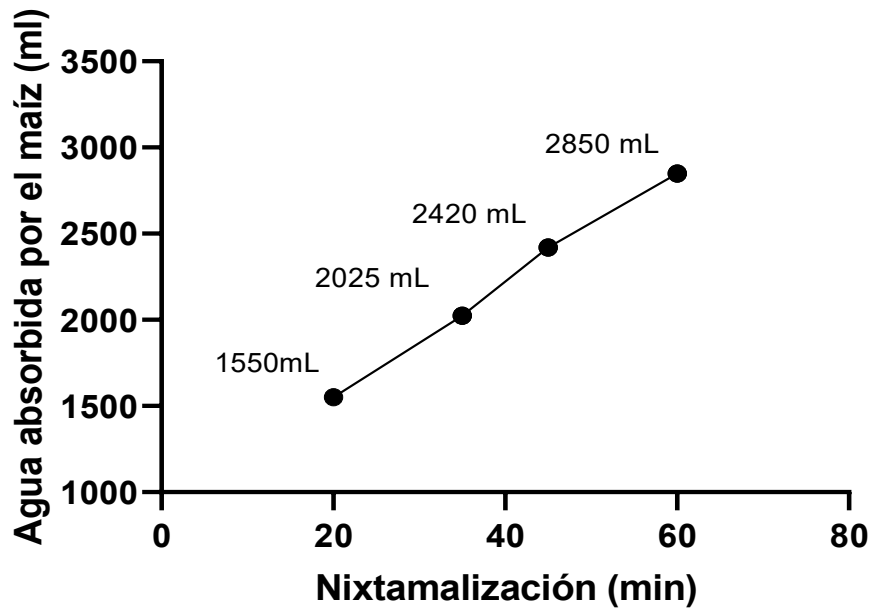
Figura 20. Curva modelo de TPA: C= compresión, d: descompresión.

Se utilizó un modelo estadístico completamente aleatorio, los resultados obtenidos del TPA se analizaron con las herramientas estadísticas de ANOVA y Tukey en el programa JMP Trial 16.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Nixtamalización

Los distintos tratamientos de nixtamalización a diferentes tiempos de cocimiento (gráfica 2) muestran que al incrementar el tiempo de nixtamalización existe una tendencia ascendente en la absorción de agua debido principalmente al comportamiento que tiene el almidón de maíz parcialmente gelatinizado de enlazar agua con sus grupos hidroxilo durante el procesamiento.



Gráfica 2. Absorción de agua por el almidón maíz durante la nixtamalización y molienda.

Estos resultados confirman lo reportado por Arámbula-Villa et al., (2001) y Castillo-Vázquez et al., (2009), donde expresan que, la nixtamalización del maíz provoca que los gránulos de almidón tengan mayor absorción de agua; ya que este efecto se debe a que durante la nixtamalización los gránulos de almidón pierden su estructura por la gelatinización permitiendo que la amilosa y la amilopectina expongan sus grupos hidroxilos, los cuales forman puentes de hidrógeno con el agua presente de la nixtamalización y generan un aumento en la absorción de agua. En el almidón las cadenas están asociadas por sus grupos hidroxilo a través de enlaces de hidrógeno formados por una o más moléculas de H_2O ; por lo tanto, la extensión del proceso de gelatinización depende de la ruptura de estos enlaces de hidrógeno. El $Ca(OH)_2$ presentes en la nixtamalización se disocia en iones OH^- , que pueden penetrar fácilmente el gránulo de almidón a través del pericarpio, creando microporos, degradación, disolución o eliminación parcial de los componentes del pericarpio y rompimiento de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y los grupos hidroxilo de las cadenas de

almidón. Así, se permite una mayor difusión de agua al interior del grano y se potencia el proceso de gelatinización.

En la figura 21 se presenta el efecto de nixtamalización sobre los gránulos de almidón de un maíz. Al iniciar la nixtamalización los almidones de maíz se hidratan e hinchan, conforme incrementar el tiempo de nixtamalización estos pierden su estructura granular generándose la ruptura entre la amilosa y la amilopectina, lo que se conoce como gelatinización y continúan el aumento de temperatura hasta finalizar con una dispersión completa de la amilosa y amilopectina.

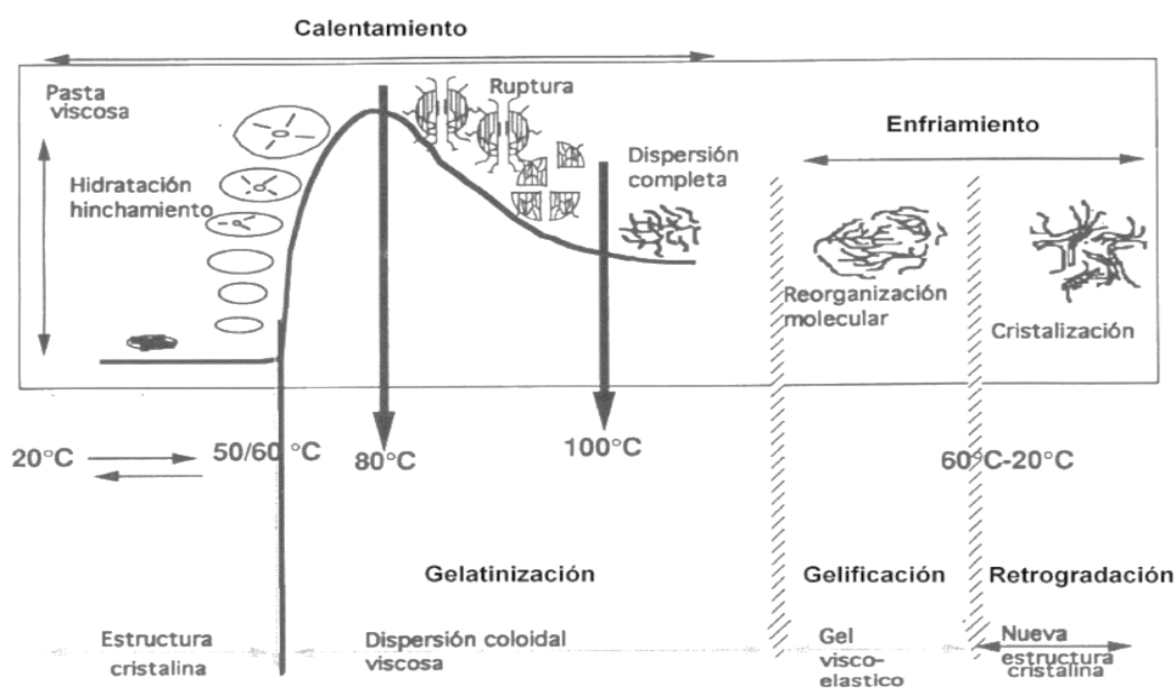


Figura 21. Representación esquemática de los cambios que experimentan los gránulos de almidón durante la gelatinización (López, 1994).

En la tabla 7 se reportan los resultados de Castillo-Vázquez et al., (2009), donde encontró que la temperatura de gelatinización aumenta conforme incrementa el tiempo de nixtamalización del maíz. Es decir, la gelatinización de maíz se afecta por los tiempos de nixtamalización.

Tabla 7. Temperatura de gelatinización en muestras tratadas a distintos tiempos de cocinado del grano de maíz.

Concentración de Ca(OH)_2 (g/100g)	Tiempo (min)	Temperatura de gelatinización ($^{\circ}\text{C}$)
1	30	72.4 $\pm$ 0.2 ^a
1	45	74.2 $\pm$ 1.8 ^{ab}
1	60	75.1 $\pm$ 1.6 ^b

Castillo-Vázquez et al. (2009).

6.2. Harinas

Se obtuvieron harinas según la NMX-F-046-SCFI-2018, Harinas de maíz nixtamalizado, que indica que una harina debe contener una humedad menor a 12.5%. La humedad de las harinas obtenidas fue de 3.8%, 5.0%, 6.2% y 8.2%, estas humedades fueron bajas, comparadas con las harinas comerciales que están entre 10-12% de humedad (Billeb de Sinibaldi, 2001).

Tabla 8. Humedad de las harinas obtenidas de los diferentes tiempos de nixtamalización.

Tratamiento	Humedad de la harina (%)
T-1	3.8
T-2	5.0
T-3	6.2
T-4	8.2

6.3. Tortillas chips

En la figura 22 se observan las tortillas chips fritas con pequeñas burbujas en su estructura debido a su fritura de 23 seg, tiempo necesario para que el producto adquiriera las propiedades organolepticas deseadas como sabor, olor, color y textura.



Figura 22. Tortillas chips.

6.4. Extracto etéreo en tortillas chips

Las muestras de tortillas chips con más porcentaje de contenido de extracto etéreo fueron las nixtamalizadas a 60 min, mientras que el menor porcentaje de grasa correspondió a las muestras de 20 min de nixtamalización, es decir, a una mayor gelatinización el extracto etéreo en las tortillas chips final aumento y a menor gelatinización, decreció el contenido de extracto etéreo en tortillas chips como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Extracto etéreo en tortilla chip.

Tratamiento	Extracto etéreo (%)
T-1	18.92±0.84 ^d
T-2	22.10±0.33 ^c
T-3	24.23±0.32 ^b
T-4	26.98±0.38 ^a

Media ± SD seguida con la misma letra dentro de la misma columna son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los resultados de contenido de extracto etéreo en las tortillas chips concuerdan con la hipótesis de estudio que describe que la gelatinización aumenta en el almidón de maíz conforme se incrementa su tiempo de nixtamalización y dicho efecto se manifiesta con una mayor capacidad de retención de agua en el almidón, que se relaciona con la elevación de contenido de extracto etéreo en las tortillas chips. E inversamente al disminuir la gelatinización en el almidón de maíz mediante un tiempo corto de nixtamalización, la capacidad de absorción de agua en el almidón decrece y con ello se reduce el contenido de grasa en tortillas chips.

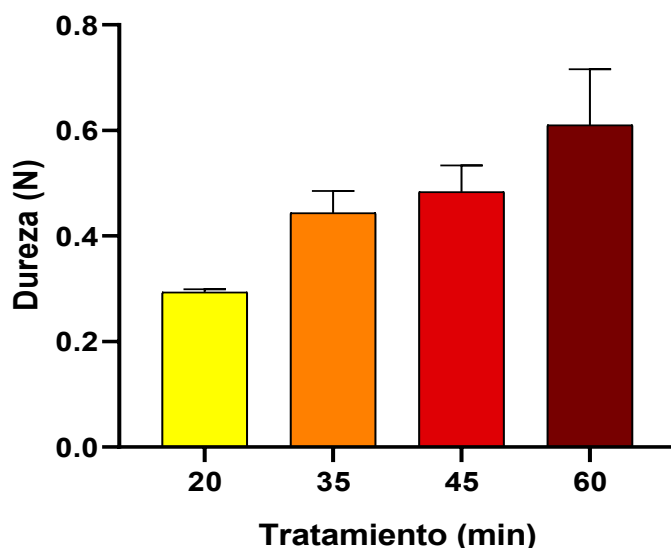
La tendencia de incremento de contenido de extracto etéreo en tortillas chips de acuerdo con sus tiempos de nixtamalización se relaciona con la humedad inicial de la tortilla chip. Es decir, la humedad sale de los alimentos en forma de vapor debido al calor durante la fritura mientras que el aceite se absorbe (Topete-Betancourt et al., 2020). De acuerdo con Morales-Pérez et al., (2011), la ganancia de aceite en productos fritos es mayor cuando el contenido de humedad es alto al inicio del proceso y al freír un alimento que ha sido reducido previamente en su contenido de humedad la absorción de aceite será menor.

6.5. Análisis del perfil de textura (TPA)

Se evaluó la masa a partir del TPA, el cual es un método imitativo que comprende la compresión de dos ciclos o la prueba de dos mordidas que proporciona información útil sobre el comportamiento reológico de la masa por lo que puede correlacionarse bien con los atributos sensoriales sobre la aceptación del producto terminado (Bhattacharya et al., 2006).

6.5.1. Dureza

La dureza (gráfica 3) en la masa correspondiente a 20, 35, 45 y 60 min de nixtamalización fue de 0.29 N, 0.44 N, 0.48 y 0.61 N, respectivamente. A mayor tiempo de nixtamalización se presenta una mayor dureza. Dichos resultados son similares a los reportados por Ramírez-Wong, (2013), donde señalo que las masas con 5 h de reposo de 45 y 65 min de nixtamalización son más duras que una masa nixtamalizada a 25 min. En la presente tesis las masas obtenidas se rehidrataron con la misma cantidad de agua, por lo que el efecto en la dureza se debe al tiempo de nixtamalización y la gelatinización del almidón.



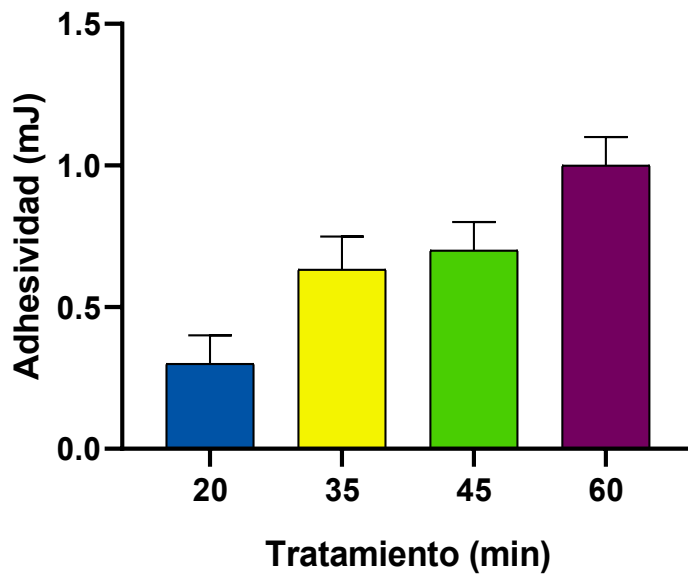
Gráfica 3. Dureza en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización.

6.5.2. Adhesividad

La adhesividad (gráfica 4) en los diferentes tiempos de nixtamalización mostró una tendencia donde la mayor adhesividad correspondió a la nixtamalización de 60 min con 1.0 (mJ), mientras que la masa con nixtamalización de 45 min presento una adhesividad de 0.7 (mJ), la masa de 35 min de nixtamalización una adhesividad de 0.6 (mJ) y 0.3 (mJ) la masa de 20 min de nixtamalización. En los cuatro tratamientos se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$).

Ramírez-Wong, (2013), mencionó la misma tendencia de incremento de adhesividad conforme avanza el tiempo de nixtamalización, señalando que la adhesividad de la masa de maíz fresca se vio afectada significativamente por el tiempo de cocción, el grado de molienda, la interacción del tiempo de cocción y la molienda, el nivel de humedad y la interacción del tiempo de cocción y el nivel de humedad. Por otro lado, independientemente del tiempo de cocción, la adhesividad aumento con el nivel de humedad agregado. Por lo que en este trabajo la causa de dicha tendencia se debió a la variación del tiempo de nixtamalización y la gelatinización. A una mayor gelatinización una mayor adhesividad.

Gasca-Mancera et al., 2007 refiere que la textura de la masa es crítica para el proceso de elaboración de tortilla. Cuando la masa tiene la textura adecuada, es lo suficientemente manejable para adherirse ligeramente a los rodillos laminadores de la máquina tortilladora y separarse adecuadamente, pero si el maíz está sobre-cocido, la masa es pegajosa y se adhiere fuertemente a los rodillos, inadecuada para la formación de la tortilla, es decir, que a un mayor cocimiento del maíz se presenta una mayor adhesividad, como se reporta en los resultados obtenidos.

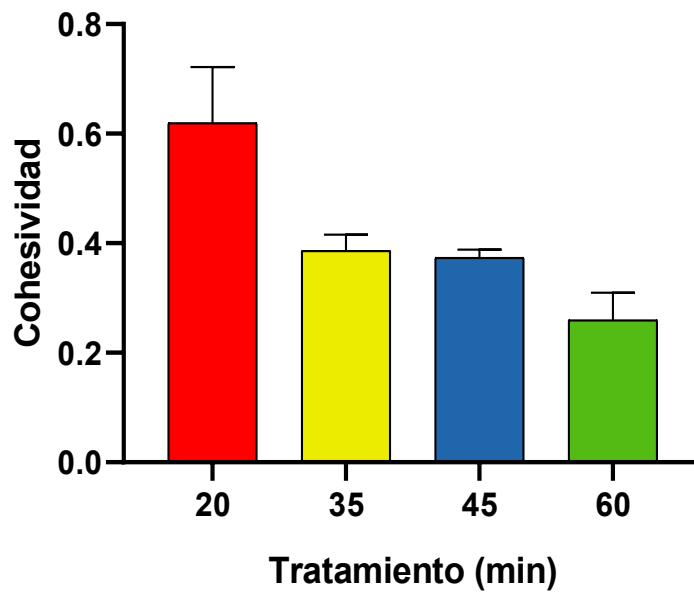


Gráfica 4. Adhesividad en masa tratada a diferentes tiempos de nixtamalización .

6.5.3. Cohesividad

Los valores de cohesividad (gráfica 5) fueron mayores para la nixtamalización de 20 min con 0.62 y conforme aumento el tiempo de nixtamalización la cohesividad decreció, obteniéndose valores de 0.39 y 0.37 de cohesividad en las masas de 35 y 45 min de nixtamalización, respectivamente y 0.23 de cohesividad en la masa de 60 min de nixtamalización. Valores que muestran una diferencia significativa ($p < 0.05$).

La cohesividad es una propiedad relacionada con la retrogradación del almidón, de acuerdo con Topete-Betancourt et al., (2020), una de las razones por las que la masa a mayor tiempo de nixtamalización es menos cohesiva es debido a que presenta los mayores valores de gelatinización en comparación con la masa de menor tiempo de nixtamalización. La masa con alto contenido de gránulos de almidón parcialmente gelatinizados es menos cohesiva debido a que esos granos funcionan como núcleo para la recristalización durante la rehidratación de la masa.

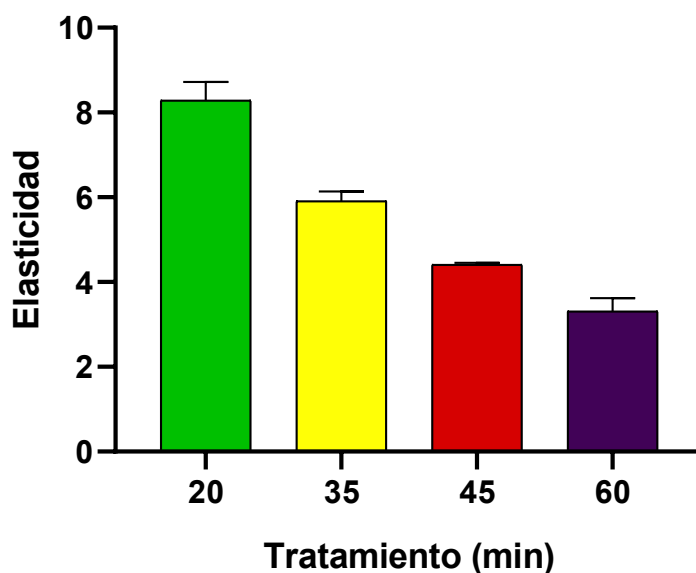


Gráfica 5. Cohesividad en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización.

6.5.4. Elasticidad

La elasticidad (gráfica 6) en las masas con distintos tiempos de nixtamalización presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$). El tiempo de nixtamalización y la gelatinización del almidón de maíz influyen en la elasticidad final de la masa rehidratada. La masa de 20 min de nixtamalización mostró la mayor elasticidad de 8.2 , mientras que las masas de 35 y 45 min de nixtamalización presentaron una elasticidad de 5.91 y 4.41, respectivamente, y la masa de 60 min de nixtamalización correspondió a una elasticidad de 3.31.

La elasticidad es una propiedad reológica de la masa la cual es indeseable, ya que al moldear las tortillas no se desea que estas aumenten (Topete-Betancourt et al., 2020).



Gráfica 6. Elasticidad en masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización.

6.5.5. Resiliencia

La resiliencia de las masas es la capacidad para almacenar energía elástica y se muestra en la tabla 10. No se encontró una diferencia significativa ($p < 0.05$) en los tratamientos de 35, 45 y 60 min de nixtamalización, solo se encontró diferencia respecto a la muestra de 20 min de nixtamalización.

El resumen de los resultados del PTA en masas rehidratadas se muestra en la tabla 10. Se encontró que las propiedades reológicas de la masa se afectaron significativamente ($p < 0.05$) por el tiempo de nixtamalización de maíz, es decir, la dureza, adhesividad, cohesividad, elasticidad y resiliencia de la masa tratada a distintos tiempos de nixtamalización cambiaron.

Tabla 10. Propiedades de textura de la masa rehidratada a 61% con diferentes tiempos de nixtamalización.

Tratamiento	Dureza (N)	Adhesividad (mJ)	Cohesividad	Elasticidad	Resiliencia
T-1	0.29±0.01 ^c	0.3±0.10 ^c	0.62±0.10 ^a	8.2±0.44 ^a	0.03±0.00 ^b
T-2	0.44±0.04 ^{bc}	0.6±0.12 ^b	0.39±0.03 ^b	5.91±0.23 ^b	0.05±0.00 ^a
T-3	0.48±0.05 ^{ab}	0.7±0.10 ^b	0.37±0.02 ^b	4.41±0.04 ^c	0.05±0.01 ^a
T-4	0.61±0.11 ^a	1.0±0.10 ^a	0.23±0.03 ^c	3.31±0.31 ^d	0.05±0.01 ^a

Media ± SD seguida con la misma letra dentro de la misma columna son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

VII. CONCLUSIONES

La gelatinización y absorción de agua en el almidón de maíz incrementan al aumentar el tiempo de nixtamalización, lo que se refleja en un mayor contenido de extracto etéreo en tortillas chips después de la fritura. El contenido de grasa en tortillas chips es directamente proporcional al tiempo de nixtamalización. Se encontró que las propiedades reológicas de la masa (dureza, adhesividad, cohesividad, elasticidad y resiliencia) se afectan significativamente ($p < 0.05$) por el tiempo de nixtamalización del maíz. Por lo que el análisis de perfil de textura podría usarse como herramienta sencilla, económica y rápida para medir indirectamente la gelatinización de la masa y ayudar a controlar la absorción de aceite en tortillas chips durante la fritura.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El maíz en Cuba. *Cultivos tropicales*. 30(2), 00-00.
- Arámbula-Villa, G., Barrón-Ávila, L., González-Hernández, J., Moreno-Martínez, E., & Luna-Bárcenas, G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays L.*) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos latinoamericanos de Nutrición*. 51(2), 187-194.
- Bello-Pérez, L. A., Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Núñez-Santiago, C., & Paredes-López, O. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*. 36(3), 319-328.
- Benítez-Cardoza, C. G. (2006). El maíz: origen, composición química y morfología. *Materiales Avanzados*. 7, 15-20.
- Bhattacharya, S., Narasimha, H.V., & Bhattacharya, S. (2006). Rheology of corn dough with gum arabic: Stress relaxation and two-cycle compression testing and their relationship with sensory attributes. *Journal of Food Engineering*. 74, 89–95.
- Billeb de Sinibaldi, A. C., & Bressani, R. (2001). Característica de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 51(1), 86-94.
- Campechano-Carrera, E. M., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Arámbula-Villa, G., Martínez-Flores, H. E., Jiménez-Sandoval, S. J., & Luna-Bárcenas, J. G. (2012). New ecological nixtamalisation process for tortilla production and its impact on the chemical properties of whole corn flour and wastewater effluents. *International Journal of Food Science & Technology*. 47(3), 564-571.

- Cárcamo-Escobar, J.E., Portillo-Hernández, J.C., & Serrano-Ortiz, L.M. (2018). Evaluación del rendimiento de maíz (*Zea mays*), Var. H-59, bajo diferentes frecuencias de fertilización química, durante la etapa fenológica de desarrollo vegetal a formación de grano. *Universidad de El Salvador*. pp 2-4.
- Castillo-Vázquez, K.C., Ochoa-Martínez, L.A., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Delgado-Licon, E., Gallegos-Infante, J.A., & Morales-Castro, J. (2009). Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 59(4), 425-432.
- Castro-López, M. (2019). Desarrollo de una botana saludable a partir de maíz azul (*Zea mays* L) y chía (*Salvia hispánica* L). *Universidad Autónoma de Sinaloa*. pp 8-11.
- Contreras-Gallegos, E., (2013). Evaluación de la calidad de almidones de diferentes tipos de maíz. *Instituto Politécnico Nacional*. pp 33-35.
- Curiosoando.com. (2017). "¿Qué es el almidón resistente?". *Curioseando*. pp 1.
- Escalante-Aburto, A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P.I., Barrón-Hoyos, J.M., Figueroa-Cárdenas J. de D. & López-Cervantes, J. (2013). La nixtamalización y su efecto en el contenido de antocianinas de maíces pigmentados, una revisión. *Revista fitotecnia mexicana*. 36(4), 0187-7380.
- Gasca-Mancera, J.C. & Casas-Alencáster, N. B. (2007). Adición de harina de maíz nixtamalizado a masa fresca de maíz nixtamalizado. Efecto en las propiedades texturales de masa y tortilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 6(3), 317-328.

- Guzmán-Bello, L., Acevedo-Correa, D., & Granados-Conde, C. (2012). Efecto del escaldado, deshidratación osmótica y recubrimiento en la pérdida de humedad y ganancia de aceite en trozos de papa criolla fritas. *Biotechnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 10(2), 170–176.
- Hernández-Cumplido, J. (2019). Domesticación de las plantas. *UNAM*. pp 1-2.
- Kadir, S., Ahmad, L., & Bait, Y. (2019). Proximate and calcium analysis of nixtamalized corn grits as a raw material of Gorontalo traditional meal, Indonesia. *Nusantara Bioscience*. 11(1), 56-62.
- López, J.M. (1994) estudio del tratamiento térmico extrusión sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Universidad La Gran Colombia, armenia, Colombia*. Pp. 17-23.
- Martínes-López, E. & Lira-Cortez, L. (2010). Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. *Centro Nacional de Metrología de Querétaro*. 1(1), 2-3.
- Martínez, R., Mendoza, S., Reguera, E., Ortiz, P., & de la Luz Martínez, J. (2001). Kinetic approach to nixtamalization of corn pericarp. *Cereal chemistry*, 78(2), 107-110.
- Martínez-Guardia, M., Palacios-Palacios, I. & Medina-Arroyo, H. (2016). Composición química de grano de maíz (*Zea mays*) Chococito de municipio de Quibdó, Chocó, Columbia. *Universidad Tecnológica de Chocó*. 1-2.
- Membrillo, J. (2020). Dios del maíz, la unión de los dioses Olmecas. *Mitología.info*. pp 1-2.
- Méndez-Montealvo, G., Solorza-Feria, J., Velázquez-del-Valle, M., Gómez-Montiel, N., Paredes-López, O. & Bello-Pérez, L. A. (2005). Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México. *Agrociencia*. 39(3), 267-274.

- Mier, R. (2016). ¡Di no a las tortillas chatarra!. *Masdemx.com*. pp 1.
- Montes-Olivares, N., Millar-Manriquez, I., Provoste-Catalina, R., Maturana-Martínez, N., Fernández-Mainegra, D., Morales-Illanes, G. & Valenzuela-Baez, R. (2016). Absorción de aceite en alimentos fritos. *Revista Chilena de Nutrición*. 43(1), 0717-7518.
- Morales-Martínez, L. E. (2020). Evaluación de la vida útil de totopos de maíz con salvado de arroz. *Instituto Politécnico Nacional*. pp 14-15, 19-20, 36-37.
- Morales-Pérez, J. & Vélez-Ruiz, J. F. (2011). Estudio del Efecto Combinado del Secado y Freído en las Propiedades de Tortillas Tostadas. *Información Tecnológica*. 22(2), 55-68.
- Murillo-Godínez, G. (2019). Los dioses mitológicos de la medicina. *Medicina Interna de México*. 35(2), 273-283.
- NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (método soxhlet) en alimentos. Foodstuff-determination of ether extract (soxhlet). Normas Mexicanas. Dirección General de Normas.
- Official Methods of Analysis of AOAC International, Solids (total) and Moisture in Flour – Air Oven Methods (32.1.03), (2016). Chapter 32 (1). *Maryland: USA*.
- Paliwal, R.L. (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Tipos de maíz. *Food & Agriculture Org.* (8), 46-49.
- Pineda-Gómez, P., Coral-Coral D.F., Arciniegas-Vaca M. L., Rorales-Rivera A., & Rodríguez-García M. E. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. *Ingeniería y Ciencia*. 6 (11), 129–141.
- Plascencia-González, (1998). Comportamiento de maíz pigmentado en la elaboración de frituras, empleando el método de nixtamalización

- tradicional y harina instantánea preparada por un proceso hidrotérmico. *Universidad Autónoma de Chapingo*. pp 25-26.
- Preciado-Ortiz, R.E., Vázquez-Carrillo, M.G., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Guzmán-Maldonado, S.H., Santiago-Ramos, D., & Topete-Betancourt, A. (2018). Fatty acids and starch properties of high-oil maize hybrids during nixtamalization and tortilla-making process. *Journal of Cereal Science*. 83, 171-179.
- PROFECO (2018). Estudio, calidad, frituras y botanas. El laboratorio PROFECO (Procuraduría Federal del Consumidor) informa. *Revista del consumidor*. Pp 1-5.
- Ramírez-Wong B. (2013). Tiempos de cocimiento y reposo mínimos de la nixtamalización del maíz para la formación de la masa: efecto en la textura de la tortilla. *Universidad de Sonora*. pp 26-37.
- Rodríguez-Sandoval, E., Fernández-Quintero, A. & Ayala-Aponte, A. (2005). Reología y textura de masas: Aplicaciones en trigo y maíz. *Ingeniería e investigación*. 25(1), 72-78.
- Sánchez-Ortega, I., (2014). Maíz I (*Zea mays*). *REDUCA (Biología)*. 7(2), 00-00.
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Mariscal-Moreno, R. M., Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., & Véles-Medina, J. J. (2018). Physical and chemical changes undergone by pericarp and endosperm during corn nixtamalization-A review. *Journal of Cereal Science*. 81, 108–117.
- Secretaría de agricultura y desarrollo rural, ASERCA y CIMA (2020). Reporte del mercado de maíz. *CIMA, ASERCA, Gobierno de México*. pp 2-16.
- Secretaría de agricultura y desarrollo rural, SIAP (2021). PANORAMA AGROALIMENTARIO 2021. *Gobierno de México*. pp 90-100.

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019). Maíz grano, SIAP. *Gobierno de México, Blog*. pp 1-3.
- Topete-Betancourt, A., Figueroa- Cárdenas J. de D., Sánchez-Morales, E., Arámbula-Villa, G., & Pérez-Robles, J. F. (2020). Evaluación del mecanismo de absorción de aceite y pérdida de agua durante la fritura de totopos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19(1), 409-422.
- Topete-Betancourt, A., Santiago-Ramos, D. & Figueroa-Cárdenas J. de D. (2020). Relaxation tests and textural properties of nixtamalized corn masa and their relationships with tortilla texture. *Food Bioscience*. 33, 100500.
- Tovar-Benítez, T. (2008). Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (*Zea mays L*) obtenido por diferentes métodos de aislamiento. *Universidad autónoma del estado de Hidalgo*. 4-14, 31-32.
- Tupa-Valencia, M.V. (2019). Modificación organocatalítica de almidón para la obtención sostenible de derivados de alto valor agregado. *Universidad de Buenos Aires*. Pp 27-28, 31.
- UNAM (2017). Dioses y culto religioso en Mesoamérica. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 1.
- Valderrábano-Amador, C. R. (2005). Propiedades físicas y fisicoquímicas del grano, nixtamal, masa y tortillas elaboradas con maíz germinado, y la evaluación sensorial de las tortillas. *Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas*. pp 3-10, 13-19.
- Valderrama-Bravo, C., Rojas-Molina, A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Oaxaca-Luna A., Rosa-Rincón, E. & Rodríguez-García, M.E. (2010). Mechanism of calcium uptake in corn kernels during the traditional nixtamalization process: Diffusion, accumulation and percolation. *Journal of Food Engineering*. 98, 126–132.

- Vélez-Medina, J. J. (2004). Caracterización de tostadas elaboradas con maíces pigmentados y diferentes métodos de nixtamalización. *CICATA-Instituto Politécnico Nacional*. pp 11-15.
- Villada-Villalobos, J.A., Sánchez-Sinencio, F., Zelaya-Ángel, O., Gutiérrez-Cortez, E. & Rodríguez-García, M.E. (2017). Study of the morphological, structural, thermal, and pasting corn transformation during the traditional nixtamalization process: From corn to tortilla. *Journal of Food Engineering*. 212, 242-251.
- Williams, M. (2020). Homemade tortilla chips. *Oven & air fryer*. pp 1.
- Yahuaca-Juárez B. (2013). Optimización del proceso térmico-alcalino en función de las transformaciones inducidas en los lípidos del maíz evaluadas con técnicas ópticas y fisicoquímicas. *CICATA-Instituto Politécnico Nacional*. pp 8-11.