



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**



**CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE HARINAS  
DE MAÍZ DE ALMIDÓN RETROGRADADO**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:**

**MARÍA FERNANDA PÉREZ MOLINA**

**ASESORAS:**

**DRA. ELSA GUTIÉRREZ CORTEZ**

**DRA. MARÍA DE LOS ÁNGELES CORNEJO VILLEGAS**

**CAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A Luis, Ximena y Alan las personas más importante de mi vida.*

*A Jorgito Molina de tu Talibana.*



## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	iv
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Generalidades del maíz .....	1
1.2. Estadísticas de producción de maíz en México .....	3
1.3. Características de la materia prima (maíz) para producir masa .....	5
1.4. Proceso de nixtamalización.....	6
1.4.1. Proceso de nixtamalización tradicional.....	9
1.4.2. La masa fresca .....	12
1.4.3. La masa para elaborar tortillas .....	13
1.4.4. La tortilla de masa fresca.....	13
1.4.5. Estadísticas de producción de tortilla .....	19
1.5. Definición y composición química de la harina de maíz nixtamalizado ....	21
1.6. Estadísticas de producción de harinas de maíz nixtamalizado .....	21
1.6.1. Proceso tecnológico de elaboración de harinas de maíz nixtamalizado	22
1.7. Tortilla endurecida.....	23
1.7.1. Elaboración de tostadas por método de secado.....	23
1.8. Características del Almidón.....	23
1.9. Estructura y morfología del almidón.....	24
1.9.1. Amilosa.....	25
1.9.2. Amilopectina .....	26
1.10. Cambios fisicoquímicos en el almidón .....	27
1.10.1. Gelatinización del almidón.....	27



1.10.2.	Fenómeno de Pastificación .....	28
1.10.3.	Fenómeno de Retrogradación .....	29
1.11.	Almidón resistente a enzimas .....	31
1.12.	Métodos de análisis: Fundamentos .....	31
1.12.1.	Molienda.....	31
1.12.2.	Análisis granulométrico .....	33
1.12.3.	Perfil de viscosidad aparente .....	34
1.12.1.	Espectrofotometría de absorción atómica .....	38
1.12.1.	Determinación de color.....	39
1.12.2.	Microscopia electrónica de barrido .....	39
1.12.3.	Capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad .....	41
2.	METODOLOGÍA .....	42
2.1.	Objetivo general .....	42
2.1.1.	Objetivos particulares .....	42
2.2.	Desarrollo experimental .....	45
2.2.1.	Actividades preliminares.....	45
2.2.2.	Molienda y análisis granulométrico.....	45
2.2.3.	Determinación del perfil viscoamilográfico.....	53
2.2.4.	Determinación de la concentración de calcio .....	56
2.2.5.	Determinación de color .....	57
2.2.6.	Microscopía electrónica de barrido alto vacío.....	59
2.2.7.	Índice de solubilidad e índice de absorción de agua .....	61
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
3.1.	Actividades preliminares .....	65



3.2. Objetivo particular 1: Molienda y análisis granulométrico.....	65
3.2.1. Molienda: .....	66
3.2.2. Análisis granulométrico:.....	74
3.3. Objetivo particular 2: Perfil viscoamilográfico.....	78
3.4. Objetivo particular 3: Concentración de calcio .....	81
3.5. Objetivo particular 4: Determinación de color.....	82
3.6. Objetivo particular 5: Morfología .....	83
3.7. Objetivo particular 6: índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua.....	87
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES .....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Grano de maíz y sus partes .....	2
Figura 1.2 Volumen de la producción nacional de maíz 2006-2015.....	4
Figura 1.3 Diagrama de bloques: Proceso de nixtamalización.....	8
Figura 1.4. Proceso de nixtamalización; a) Maíz, b) Maíz cocido y nejayote, c) Nixtamal .....	10
Figura 1.5. Molienda de nixtamal; a) molino de discos piedras volcánicas, b) granulado húmedo masa.....	12
Figura 1.6. Masa fresca; a) Masa, b) Testales. ....	13
Figura 1.7. Elaboración de tortilla; a) Troquelado de la masa, b) Cocción, c) Formación de ampolla.....	16
Figura 1.8. Producción de harina de maíz en México 2003-2010 .....	22



Figura 1.9. Estructura de la molécula de amilosa.....	25
Figura 1.10. Segmento de trisacárido de una molécula de amilosa .....	26
Figura 1.11.Estructura de la molécula de amilopectina.....	27
Figura 1.12. Cambios en la molécula de almidón durante la pastificación en función de la temperatura.....	29
Figura 1.13. Molino Pulvex.....	32
Figura 1.14. Ro-Tap. ....	33
Figura 1.15. Perfil de viscosidad de almidón de maíz, primera y segunda derivada para determinar los puntos críticos .....	34
Figura 1.16. Microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz Región I; a) Punto 1 1500X, b) Punto 1 3500X, c) Punto 2 1500X, d) Punto 2 3500X, e) Punto 3 1500X, f) Punto 3 3500X.....	35
Figura 1.17. Microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz; Región II; a) Punto 5 1500X, b) Punto 5 3500X, c) Punto 6 1500X, d) Punto 6 3500X.....	36
Figura 1.18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz Región III;; a) Punto 7 1500X, b) Punto 7 3500X, c) Punto 8 1500X, d) Punto 8 3500X, e) Punto 9 1500X, f) Punto 9 3500X .....	37
Figura 1.19. Espectrofotómetro de absorción atómica .....	38
Figura 1.20. Microscopio Electrónico de Barrido .....	40
Figura 2.1. Cuadro metodológico del desarrollo experimental .....	44
Figura 2.2. Determinación del tamaño inicial de partícula en tortilla de maíz endurecida.....	45
Figura 2.3. Molienda de tortillas endurecidas; a) Molino Pulvex 200; b) Alimentación de tortillas endurecidas en el equipo.....	46
Figura 2.4. Determinación de voltaje con multímetro .....	47



Figura 2.5. Separación mecánica de las fracciones de tamaño de partícula en Ro-Tap; a) Tamices normalizados utilizados; b) Montaje de la serie de tamices en el equipo .....	50
Figura 2.6. Ejemplo de gráfico diferencial de distribución de partícula.....	51
Figura 2.7. Gráfica acumulativa de FTR y FTP .....	53
Figura 2.8. Reómetro Anton Paar MCR 102 .....	54
Figura 2.9. Prueba de viscosidad aparente en celda de almidón .....	55
Figura 2.10. Determinación de color de harinas de maíz; a) Colorímetro Minolta Modelo CR300; b) Preparación de las muestras; c) Llenado con harina del dispositivo obscuro; d) Colocación del lente .....	58
Figura 2.11. Círculo de color $L^* a^* b^*$ .....	59
Figura 2.12. Microscopio electrónico de barrido; a) Porta muestra; b) Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6060LV.....	60
Figura 2.13. Índice de absorción de agua; a) Preparación de la muestra, b) Enfriamiento de la muestra, c) Geles resultantes de las muestras.....	62
Figura 2.14. Determinación de índice de solubilidad; a) Caja Petri, b) Estufa.....	64
Figura 3.1. Recolección de unidades experimentales; a) Tortilla de nixtamal endurecida, b) Tortilla de harina comercial endurecida.....	65
Figura 3.2. Gráfica de intensidad de corriente del molino en función del tiempo; a) Encendido del equipo, b) Estabilización del equipo, c) Alimentación del material, d) Término de alimentación .....	66
Figura 3.3. Gráfica comparativa de potencia para dos diferentes velocidades de dosificación: tortilla de nixtamal endurecida y tortilla de harina comercial endurecida.....	67
Figura 3.4. Grafica de los efectos principales para potencia en función de la velocidad de dosificación y el tipo de tortilla.....	68



Figura 3.5. Gráfica de las interacciones para la potencia para tortilla de harina comercial y tortilla de nixtamal .....	69
Figura 3.6. Consumo de energía en la molienda para dos velocidades de dosificación de tortilla de nixtamal endurecida y tortilla de harina comercial endurecida.....	70
Figura 3.7. Efectos principales para consumo de energía en función de la velocidad de dosificación y el tipo de tortilla.....	71
Figura 3.8. Gráfico de las interacciones para el consumo de energía para tortilla de harina comercial y tortilla de nixtamal .....	72
Figura 3.9. Eficiencia en la molienda de tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial con dos diferentes velocidades de alimentación .....	73
Figura 3.10. Gráfica de los efectos principales para la eficiencia en función de dos velocidades de dosificación y el tipo de tortilla .....	74
Figura 3.11. Gráfico comparativo de las fracciones de peso total que pasa por los tamices en función de la abertura de las mallas.....	76
Figura 3.12. Viscosidad aparente en función del tiempo en harinas de maíz retrogradadas; HN) Harina de nixtamal, HC) Harina comercial, HTNE) Harina de tortilla de nixtamal endurecida, HTHCE) Harina de tortilla de harina comercial endurecida.....	78
Figura 3.13. Primera derivada del perfil de viscosidad aparente en función del tiempo .....	79
Figura 3.14. Comparación de los picos máximos de viscosidad de harina comercial, harina de nixtamal, harina de tortilla de harina comercial endurecida y harina de tortilla de nixtamal endurecida .....	80
Figura 3.15. Concentración de calcio en harinas de maíz.....	81
Figura 3.16. Micrografía de harina comercial; pg) Paquetes de gránulos, gp) Grupos poliédricos, mp) Matriz proteica.....	83



Figura 3.17. Micrografía de harina de nixtamal; mp) Matriz proteica, ge) Gránulos de almidón esféricos, gp) Gránulos poliédricos, cp) Cuerpos proteicos, cg) Cuerpos grasos .....	84
Figura 3.18. Micrografía de harina de tortilla de harina comercial endurecida; gp) Gránulos poliédricos.....	85
Figura 3.19. Micrografía de harina de tortilla de nixtamal endurecida; gp) Gránulos poliédricos, ge) Gránulos esféricos .....	86
Figura 3.20. Gráfica de índice de absorción de agua en función del tipo de harina .....	87
Figura 3.21. Índice de solubilidad en agua en función del tipo de harina .....	88
<b>Lista de tablas</b>	
Tabla 1.1. Principales entidades productoras de grano de maíz.....	5
Tabla 1.2. Ingesta diaria en gramos .....	14
Tabla 1.3 Composición química promedio de tortillas .....	17
Tabla 1.4. Estructura de costos para elaboración de tortilla con harina de maíz ..	19
Tabla 1.5. Estructura de costos para elaboración de tortilla con masa de nixtamal .....	19
Tabla 1.6. Rendimiento en la Cadena de Producción Maíz-Tortilla.....	20
Tabla 1.7. Composición química de harina de maíz nixtamalizado .....	21
<b>Tabla 1.8. Propiedades fisicoquímicas del almidón de maíz.....</b>	<b>24</b>
Tabla 2.1. Representación tabular del análisis granulométrico .....	52
Tabla 3.1. Llenado de resultados del análisis granulométrico .....	75
Tabla 3.2. Resultados de determinación de color de harinas de maíz. ....	82



### AGRADECIMIENTOS

A mi papá por todo tu esfuerzo para sacarnos adelante, por darnos siempre lo mejor, pero sobre todo por enseñarnos que todo éxito en la vida requiere esfuerzo, dedicación y pasión.

A mi mamá por ser mi apoyo incondicional siempre, por las desveladas conmigo, por el apoyo en las buenas y malas decisiones, en los mejores y en los peores momentos, por cuidarme y quererme más que nadie.

A Ivonne por ser mi hermana, mejor amiga, confidente, mi ejemplo a seguir, por hacer que mantenga siempre los pies en la tierra, por los consejos que siempre me hacen tomar las mejores decisiones por ser como mi segunda mamá y una de las mejores personas que tengo en la vida. A Fer por ser parte de esta familia desde hace 20 años, porque pocas personas me conocen como tú, por los consejos, por la ayuda siempre, por los cuidados y todos los mejores momentos.

A mi hermana Adriana porque me sigue cuidando como nadie más lo hace, por todas esas pláticas, por preocuparte y estar siempre al pendiente de mí, por haberme dado a las tres personas más importantes de mi vida y porque a pesar de todas las malas rachas siempre estás ahí al pie del cañón, por enseñarme que de los errores se aprende.

A los Molina por ser la mejor definición de familia y unidad.

A Jesús, Gabo, Harlan y Félix por enseñarme el verdadero valor de la amistad y la incondicionalidad, por ser mis compañeros de vida y las personas más enfermas que conozco. A Karen, por existir, por ser mi cómplice, por compartir tantas experiencias, por la confianza pero sobre todo por siempre estar.

A Moni por ser mi hermana por elección, no puedo más que dar gracias a la vida por ponerte en mi camino, gracias por estar siempre, por ser la más insoportable pero al mismo tiempo una de las mejores personas que conozco en la vida. A Vale porque de no habernos cursado esta carrera juntas no lo hubiéramos logrado, por ser una de las mejores y más incondicionales amigas que tengo, ahora sé que esta amistad es para toda la vida, gracias por tanto!



A la *Familia Cuauttlanense* (Diego, Lalo, Marco, Gustavo, Roger, Yoyo, Jimena, Claudia y Liz) por hacer de esos 5 años la mejor etapa de mi vida, pero sobre todo por su gran amistad.

A Marco por motivarme, empujarme y apoyarme a concluir este proyecto tan importante, por confiar en mí más que nadie y por enseñarme tantas cosas.

Al Programa Interno de Apoyo para Proyectos de Investigación “PIAPI 1647” Evaluación y diseño de sistemas nanoparticulados para la conservación refrigerada y/o congelada de productos de origen vegetal. Proyecto de investigación interno FES-CUAUTITLÁN

A la M.I. Alicia del Real López, Responsable del Laboratorio de Microscopía CFATA-UNAM campus Juriquilla por el apoyo técnico en la preparación, montaje y observación de las muestras de harina de maíz en el Microscopio Electrónico de Barrido.

A la Dra. María de los Angeles Cornejo Villegas por el apoyo técnico en la caracterización fisicoquímica y propiedades texturales de harinas de maíz y masas en el Laboratorio de Procesos de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos UIM FES-Cuautitlán campo 4.

A las Dras. Elsa y Ángeles por haberme dado la oportunidad de trabajar con ustedes, por compartir sus conocimientos y su tiempo conmigo, este trabajo no hubiera sido posible sin ustedes, por el apoyo que brindan no sólo a mí sino a todos sus alumnos.



## RESUMEN

Tradicionalmente la tortilla es un producto de alto consumo obtenido a partir de harinas de maíz, puesto que es un alimento perecedero de corta vida útil y presentan un rápido endurecimiento. Las propiedades intrínsecas de las harinas con las que se elaboran las tortillas están determinadas por la distribución de tamaño de sus partículas (Almeida-Domínguez et al., 1996; Flores-Farias et al., 2002) y sus propiedades físicas y reológicas se determinan por su grado de gelatinización y cantidad de agua adicionada (Bressani et al. 200; Bello- Pérez et al., 2002; Fernández-Muñoz et al., 2002). Las tortillas recién preparadas son suaves y flexibles, pero después de unas horas se endurecen y son friables; estos cambios son promovidos por la pérdida de humedad y las modificaciones del almidón, durante el procesado y almacenamiento. El almidón es el componente principal de las tortillas y el responsable de la mayoría de los cambios de textura (Campas-Baypoli et al., 2002). Los cambios físicos, que se producen durante el endurecimiento de las tortillas, traen como consecuencia la retrogradación de su almidón, que en gran medida influye en la digestibilidad. Por lo tanto las tortillas endurecidas consideradas desechos, forman almidón resistente a enzimas digestivas y son de bajo índice glucémico. Sin embargo, es posible obtener sólidos granulares de estos materiales endurecidos mediante la molturación para generar harinas con almidón retrogradado. Dentro de las ventajas de producir este tipo de harinas se encuentran el reciclado y el valor agregado de estos materiales. Asimismo, se requiere de aditivos para mejorar su adhesión, cohesión y elasticidad durante su rehidratación para elaborar otros productos. En este proyecto se obtuvieron harinas en las que ha ocurrido el fenómeno de retrogradación del almidón, a partir de tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial, se realizó un análisis comparativo de los cambios fisicoquímicos utilizando las siguientes técnicas: distribución de tamaño mediante análisis granulométrico, perfil viscoamilográfico mediante un reómetro con celda de almidón, concentración de calcio mediante espectroscopia de absorción atómica, determinación de color mediante un colorímetro, morfología mediante microscopia electrónica de barrido y capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad mediante técnicas analíticas. Los mayores cambios entre las harinas de nixtamal y comerciales respecto a las harinas obtenidas de tortilla endurecida de nixtamal y de harina comercial se observaron en el perfil de viscosidad y la morfología mostrando una viscosidad menor en las muestras con almidón retrogradado y a su vez en la estructura de las mismas, respecto al contenido de calcio no existieron diferencias significativas, en la escala de color los cambios resultaron en la luminosidad siendo menor para las muestras obtenidas de tortillas endurecidas.

**Palabras clave:** *almidón resistente a enzimas, harina de maíz, textura, retrogradación, tortilla.*



## INTRODUCCIÓN

La harina de maíz nixtamalizado se define como el producto de los granos sanos limpios, que han tenido un proceso de nixtamalización, molienda y deshidratado (NMX-187-SSA1/SCFI-2002).

Gutiérrez-Cortez *et al.* (2007) demostraron que los cambios en las propiedades fisicoquímicas de las harinas dependen de la temperatura, del tiempo de reposo, de la técnica de lavado del maíz durante el proceso y de las condiciones de almacenamiento. Estos resultados se relacionan con lo reportado por Rojas-Molina *et al.* (2008) quienes publicaron que la concentración de calcio en las harinas de maíz está en función de las condiciones de proceso.

Almeida-Domínguez *et al.* (1996) demostraron que las propiedades intrínsecas de las harinas de maíz, están determinadas por la distribución de tamaño de partícula y Bressani *et al.* (2001) establecieron que las propiedades físicas y reológicas de las harinas se presentan por su grado de gelatinización y cantidad de agua adicionada. Un parámetro que debe considerarse en las harinas de maíz nixtamalizado es el pico máximo en el perfil viscoamilográfico que desarrollan durante la evaluación de la viscosidad aparente, ya que se correlaciona con el grado de gelatinización del almidón, que determina los atributos de textura deseables al consumidor.

La distribución del tamaño de partícula se considera el criterio más importante para aplicaciones de la harina para masa. La NMX-046-S-1980 especifica que 75% de la harina debe pasar por el tamiz 60 USA; para un buen desarrollo de flexibilidad, cohesión y roabilidad, mientras que las frituras de maíz y tostadas requieren una distribución de tamaño de partícula gruesa para promover que sean crujientes. Las partículas más pequeñas son responsables de la mayor parte de la absorción de agua, la cohesión, la plasticidad de la masa, y la suavidad de las tortillas (Sahai *et al.*, 2001).

Actualmente, la harina de maíz nixtamalizado ha tenido un rápido crecimiento en la Comunidad Europea y Estados Unidos, para utilizarla como materia prima en la



elaboración de botanas y productos extrudidos. La fabricación de harinas instantáneas de maíz llegó a considerarse un logro, ya que elimina las labores intensivas del proceso de fabricación (cocimiento, reposo, molienda) y la masa obtenida es un producto hidratado más homogéneo, con un mejor control higiénico durante su elaboración, lo que permite aumentar su vida de anaquel (Gómez-Aldapa *et al.*, 1996). La principal desventaja de las harinas de maíz nixtamalizado radica en una menor calidad, respecto al sabor y textura, comparado con los productos elaborados por el método tradicional. El almidón es el componente principal de las tortillas de maíz, y el responsable de la mayoría de los cambios de textura, durante el procesamiento y almacenamiento (Campas-Baypoli *et al.*, 2002).

Tradicionalmente, la tortilla es un producto de consumo rápido posterior a su elaboración, puesto que es un alimento perecedero de corta vida útil. Su deterioro fundamentalmente microbiológico, debido al rápido crecimiento de hongos sobre su superficie, a consecuencia de una elevada actividad de agua y a que no posee conservadores ni agentes inhibidores de crecimiento microbiano en su composición (Chang *et al.*, 2003). A pesar de ser un alimento altamente consumido, las tortillas presentan un rápido endurecimiento; Campas-Baypoli *et al.* (2002) reportaron que las tortillas recién preparadas son suaves y flexibles, pero después de unas horas se endurecen y son friables. Estos cambios son promovidos por la pérdida de humedad y las modificaciones del almidón durante el procesamiento del maíz y la masa, después en la elaboración y el almacenamiento de la tortilla. Los cambios físicos, que se producen durante el endurecimiento, traen como consecuencia la retrogradación del almidón, que en gran medida influye en la textura y digestibilidad, ya que durante el tratamiento térmico se forma almidón resistente a enzimas digestivas. Lo que significa que el cuerpo humano no lo digiere y por tanto esos productos duros como el pan y las tortillas son de bajo índice glucémico.

Debido a los rápidos cambios texturales que presentan las tortillas y por ende el su alto desperdicio, en el presente proyecto se prepararon harinas de maíz a partir de



tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial. Dichas tortillas se deshidrataron a temperatura ambiente, durante este período el almidón, presentó retrogradación. Los sólidos granulares de tortillas endurecidas, requiere de la molturación para generar harinas con almidón retrogradado. Los cambios fisicoquímicos ocurridos en el almidón se evaluaron para ser correlacionados con la retrogradación. Las ventajas de este procedimiento son el aprovechamiento integral y el valor agregado a un subproducto. Aunque, probablemente se requerirá de aditivos para mejorar su adhesión, cohesión y elasticidad para elaborar diferentes productos. Su rehidratación requerirá mayor cantidad de agua, ya que estas harinas retrogradadas presentan un almidón más ordenado.

En este proyecto se obtuvieron harinas de tortillas endurecidas que contienen almidón retrogradado. Se realizó un análisis comparativo de los cambios fisicoquímicos en las unidades experimentales, utilizando las siguientes técnicas: distribución de tamaño de partícula mediante análisis granulométrico, perfil viscoamilográfico empleando un reómetro equipado con celda de almidón, concentración de calcio con la técnica de espectroscopia de absorción atómica, determinación de color usando un colorímetro, morfología utilizando microscopia electrónica de barrido y capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad con técnicas analíticas.



### 1. ANTECEDENTES

La producción mundial de alimentos se ha incrementado a una mayor tasa que la población mundial. Sin embargo, la hambruna y la malnutrición en países subdesarrollados y en vías de desarrollo son de los grandes problemas que aún presenta la humanidad en el siglo XXI.

En muchas de estas regiones marginadas el alivio se subsana con productos elaborados de cereales como arroz, trigo y maíz. En términos de producción mundial, el maíz es el único cereal que puede cultivarse dos veces en un mismo año. Aproximadamente el 40 % de la producción se cosecha en China y en EUA, donde el grano principalmente se utiliza para la alimentación animal y para satisfacer las demandas de mercados extranjeros como México. En este país el maíz lo consume el 95 % de la población en formas tan variadas como diversas diariamente (Excélsior, 2014).

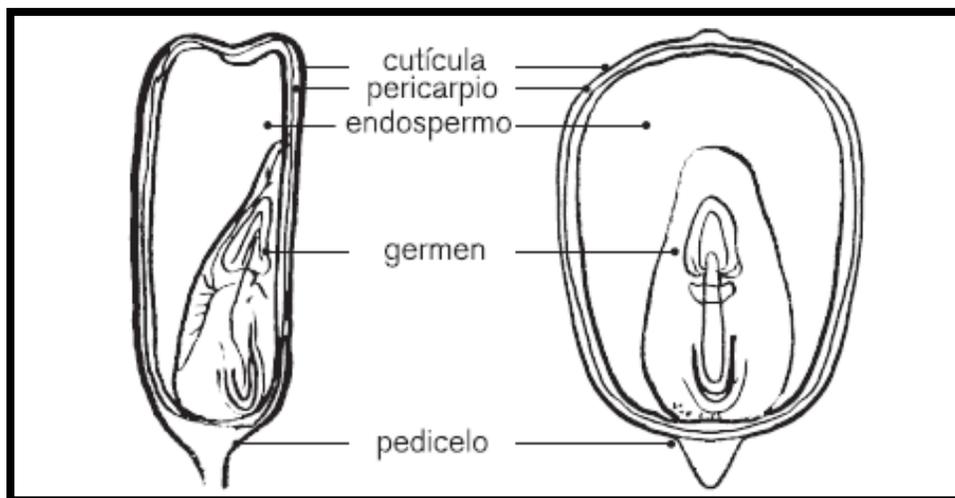
México es la cuna del maíz y por ende del proceso de nixtamalización. Hoy el cereal reafirma su importancia capital para garantizar la subsistencia de millones de mexicanos. Durante muchos años ha sido el cereal básico para la dieta, se han buscado muchas formas para su cultivo, productividad, distribución, almacenamiento e industrialización (Bressani *et al.*, 1990). Sin embargo, dadas las enfermedades crónicas degenerativas ha disminuido el consumo de maíz para personas diabéticas, se persigue que este alimento básico siga siendo parte de su dieta sin alterar su índice glucémico y al mismo tiempo disminuir los desperdicios industriales de tortilla endurecida mediante nuevos procesamientos.

#### 1.1. Generalidades del maíz

El grano de maíz es una gramínea con la que los mesoamericanos llevaron a cabo la revolución agrícola en el nuevo mundo. Así pasaron cientos de años para llegar al maíz que hoy se utiliza para una diversidad de alimentos. Hoy en día los consumidores y los procesadores reclaman ciertas características de calidad para darle destino a este cereal, dentro de las más importantes se encuentra la dureza



del grano. Sin embargo no existe información definida sobre la relación del contenido de nutrientes del maíz sobre el destino de harinas o masa para elaborar tortillas. Lo cierto es que maíces con endospermo duro contienen un poco más de proteína que maíces con endospermo suave. En promedio, el contenido de proteína del maíz es de 10 % y una buena parte se encuentra en el germen del grano. En cuanto al contenido de lípidos, el grano de maíz contiene alrededor de 5 %, principalmente en el germen. En relación con el almidón, el grano maduro del maíz presenta en promedio 72 %, y prácticamente todo está presente en las células del endospermo. En un maíz normal, el gránulo de almidón contiene aproximadamente 27 % de amilosa y 73 % de amilopectina (Salinas *et al.*, 1992). En la Figura 1.1 se muestran las partes mayoritarias del grano de maíz.



**Figura 1.1 Grano de maíz y sus partes**

*Fuente: Facultad de Ciencias, UNAM (2009).*

Principalmente el mayor consumo de maíz se realiza mediante la tortilla, la cual puede ser elaborada con masa fresca de granos de maíz nixtamalizado o con harina de maíz nixtamalizada.

Por un lado la nixtamalización es el proceso de cocción de los granos de maíz en una solución alcalina de hidróxido de calcio (Rojas *et al.*, 2008).



Esta solución alcalina degrada y solubiliza los componentes de la pared celular removiendo y suavizando la estructura del endospermo y permitiendo la difusión de agua y los iones de calcio en los gránulos de almidón localizados en el interior del grano (Fernández *et al.*, 2002). Debido al ritmo acelerado en que se vive actualmente se utiliza la harina de maíz nixtamalizada. es muy utilizada para producir tortillas y se usa también como materia prima para elaborar otros alimentos como: botanas, totopos, galletas, alimentos extruidos entre otros (Sahai *et al.*, 2001).

Según Campas-Baypoli *et al.* (1999) señalan que la importancia que toman los productos elaborados a partir de maíz nixtamalizado, se debe a que son una fuente de calorías, proteínas, fibra dietética y calcio, especialmente para personas que dependen de este alimento básico como la principal fuente de alimento. Además de que en otras ciudades como Estados Unidos, las tortillas y otros alimentos mexicanos han incrementado su popularidad. Mientras que indicaron que el consumo *per cápita* de maíz era de 250 g/día.

### 1.2. Estadísticas de producción de maíz en México

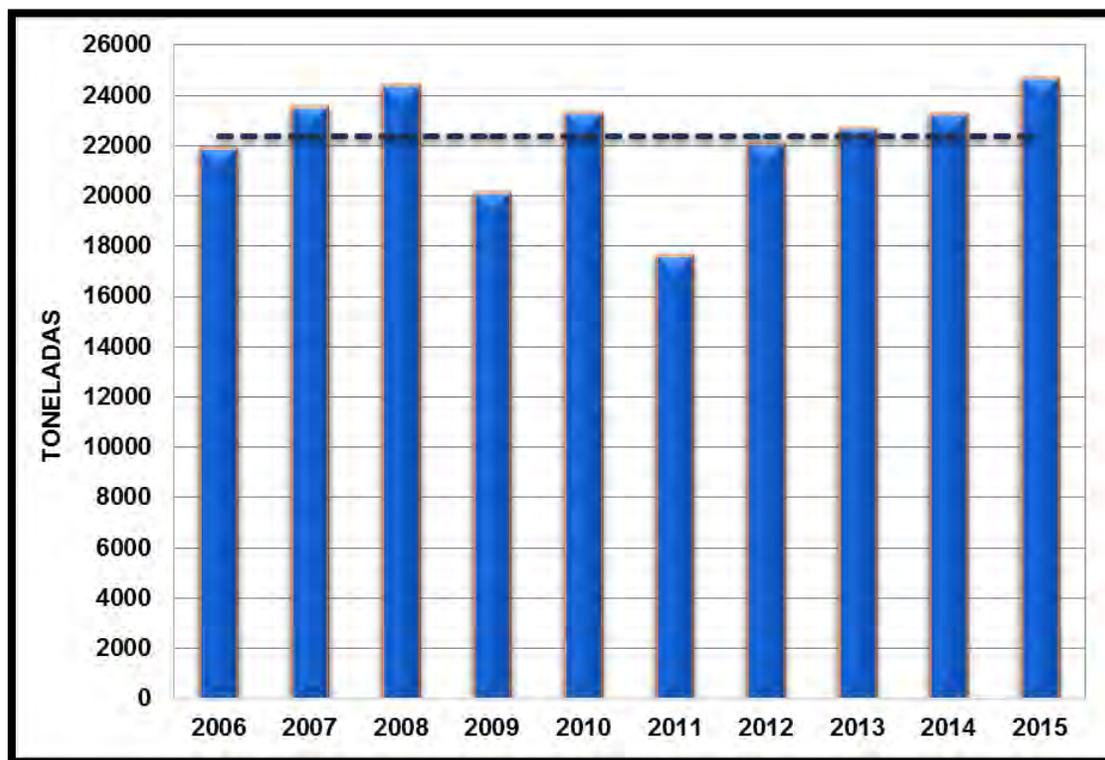
En México se consumen cerca de 30 millones de toneladas de maíz de las cuales 74 % representan la totalidad de la producción nacional de maíz blanco lo que corresponde a 21.8 millones de toneladas, el restante 26 % se trata de maíz amarillo importado. El consumo anual per cápita de maíz blanco hasta el año 2015, fue de 297 kg. (Secretaría de Economía, 2012; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2016).

El grano de maíz forma parte de la base de la dieta de la población mexicana, se siembra en todo el país. Para el año 2015, la superficie de cultivo fue mayor en 174 mil hectáreas respecto a la del año 2014.

En la Figura 1.2 se muestra el volumen de producción nacional de grano de maíz reportado desde el año 2006 hasta 2015, donde el volumen promedio de



producción se ha mantenido en 22,360 miles de toneladas (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2016).



**Figura 1.2 Volumen de la producción nacional de maíz 2006-2015**

*Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, (2016)*

El año con mayor volumen de producción en los últimos diez años, fue 2015 teniendo 24,694 miles de toneladas, sin embargo en los años 2009 y 2011 se presentó un decremento de 20,143 y 17,635 miles de toneladas respectivamente.

Así mismo en la Tabla 1.1 se muestran los diez principales estados productores de maíz en México, de acuerdo a las últimas estadísticas reportadas del año 2015. Se observa que Sinaloa es el principal estado productor de maíz con 5,380,042 Toneladas, seguido del estado de Jalisco y el Estado de México; esto se debe a las buenas condiciones orográficas existentes en Sinaloa, aunado a su gran infraestructura de riego y su avanzada capacidad tecnológica, lo que le permite



alcanzar los más altos rendimientos por hectárea cosechada, y con ello, ser líder nacional productor de maíz grano.

**Tabla 1.1. Principales entidades productoras de grano de maíz**

Lugar	Entidad Federativa	Volumen (Toneladas)
1	Sinaloa	5,380,042
2	Jalisco	3,338,766
3	México	2,036,339
4	Michoacán	1,721,658
5	Chihuahua	1,436,560
6	Guanajuato	1,361,922
7	Veracruz	1,212,089
8	Chiapas	1,067,994
9	Tamaulipas	1,007,931
10	Puebla	1,002,155
11	Resto	5,128,590
<b>Total Nacional</b>		<b>24,694,046</b>

*Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, (2016).*

Con esta producción México no satisface su demanda de alimentación, por lo que importa maíz de China y a E.U.A. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2016).

### **1.3. Características de la materia prima (maíz) para producir masa**

La industrialización del maíz nació en México con la intención de satisfacer la demanda, cada vez mayor, de la tortilla en las zonas rurales y urbanas del país, para lo cual se recurrió primero a la transformación del maíz en masa de nixtamal y posteriormente a la elaboración de harina de maíz.

Las características de calidad del grano para la harina y la masa son ligeramente diferentes, en particular lo que tiene que ver con la dureza del endospermo. Los requerimientos de calidad para la harina están descritos en la Norma Mexicana Para Harina de Maíz Nixtamalizado (NMX-FF-034/1-2002) y requiere maíz muy



duro, mientras que los de requerimientos para masa solicitan maíz duro y dureza intermedia.

La calidad del grano es un concepto que se refiere a las características que los procesadores de alimentos reclaman. Para la industria de la masa y la tortilla se requiere que el rendimiento de nixtamal sea mayor a 1800 g por kg de maíz utilizado, que el espesor del pericarpio sea de 60 a 100  $\mu\text{m}$  para permitir la rápida hidratación al grano, el tamaño y la forma, la densidad volumétrica, la humedad, que el peso de 1000 granos entre 270 a 340 gramos, que sea fácil la remoción del pericarpio, que el peso hectolítrico sea mayor a 75 kg/hL, el índice de flotación de 13-62 granos flotantes entre otros. Sin embargo en la práctica muy difícilmente se cumplen todos los criterios de calidad para la industria de la masa y la tortilla, se utilizan aquellos que reúnen la mayoría de los atributos (Serna-Saldívar, 2008).

### 1.4. Proceso de nixtamalización

En el país existen dos tipos de industrias que procesan el grano de maíz para elaborar productos nixtamalizados. Una es la industria de la masa y la tortilla y la otra es la industria de harina de maíz nixtamalizado.

La nixtamalización es un proceso tradicional desarrollado en México, el cual consiste en un tratamiento térmico-alkalino al que se somete el maíz, para la elaboración de productos como la tortilla, tostadas, nachos, tamales, atole entre otros. La Figura 1.3 muestra el diagrama de bloques de la nixtamalización para obtener tortillas de masa fresca- tortilla y harinas de maíz nixtamalizado.

El proceso de nixtamalización confiere un alto valor nutritivo y cambios funcionales en la masa, además es clave en la elaboración de la tortilla, pues un nixtamal sobre cocido absorbe más agua debido a un mayor grado de gelatinización, una vez que este tipo de nixtamal es transformado en la masa, esta adquiere propiedades de pegajosidad y adhesividad que son indeseables en la producción de tortilla, mientras que un nixtamal poco cocido, produce menor grado de gelatinización, lo que conlleva a una baja cohesividad de la masa (Paredes López *et al.*, 2000).



La nixtamalización favorece algunos parámetros nutricionales de este cereal y afecta otros. Entre los efectos negativos de la nixtamalización se encuentran la pérdida de vitaminas que van desde un 30 hasta un 70 % durante la cocción, reposo y lavado de maíz. También se pierde tiamina, carotenoides, proteínas, grasas, minerales y parte de la fibra dietética localizada en el pericarpio que es muy importante para darle propiedades mecánicas a la masa y necesaria para la digestión en el organismo humano.

El proceso de nixtamalización tiene los siguientes propósitos: iniciar la remoción parcial del pericarpio del grano, permitir la difusión del calcio en el grano, facilitar la disponibilidad de proteínas, y permitir la gelatinización parcial del gránulo de almidón al elevar la temperatura (Bressani *et al.*, 1997).

El hidróxido de calcio actúa sobre los componentes de las paredes celulares y transforma la hemicelulosa en gomas solubles, también provoca la saponificación de los lípidos presentes en el grano e interactúa con las proteínas que se encuentran alrededor de los gránulos de almidón (Bressani *et al.*, 1997; Paredes López *et al.*, 2000).

A pesar, que el método artesanal genera mayor pérdida de materia seca, se elaboran las mejores tortillas en lo que se refiere a textura, sabor, color y aceptabilidad. El procedimiento de cocción utilizado en el método comercial produce una masa pegajosa y tortillas de aspecto desagradable (FAO, 2009).

Bressani *et al.* (2001) demostraron que el tiempo de reposo tiene un efecto significativo en el incremento del contenido de calcio en el grano de maíz nixtamalizado, del mismo modo Rojas *et al.* (2008) reportaron que el contenido de calcio en la harina de maíz obtenida a partir del proceso de nixtamalización tradicional incrementa no solo con el tiempo de reposo sino también con la temperatura de cocción.

En el proceso de nixtamalización comercial, el grano de maíz es cocido por un sistema de inyección en presencia de  $\text{Ca(OH)}_2$ , el maíz cocido es lavado para remover el exceso de cal y tierra con un molino de martillos, evitando la etapa de



reposito. En otros procesos industriales el grano de maíz es sometido a una etapa de cocción 30-50 min aproximadamente, seguido de un remojo por 60-120 min y lavado; la etapa de reposo es más corta comparado con la que se emplea en el proceso tradicional (Bressani *et al.*, 1997; Gutiérrez *et al.*, 2007; Rojas *et al.*, 2008).

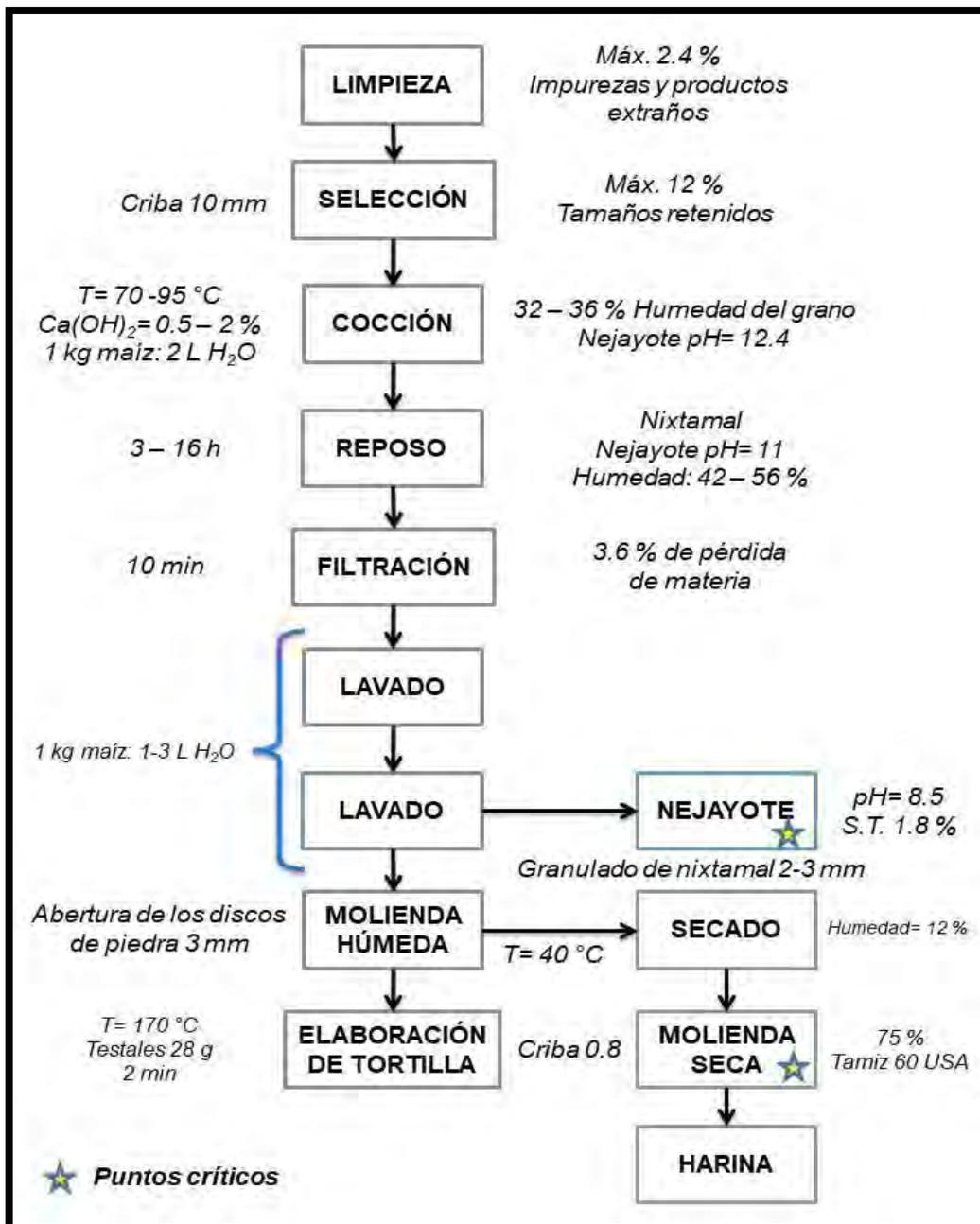


Figura 1.3 Diagrama de bloques: Proceso de nixtamalización



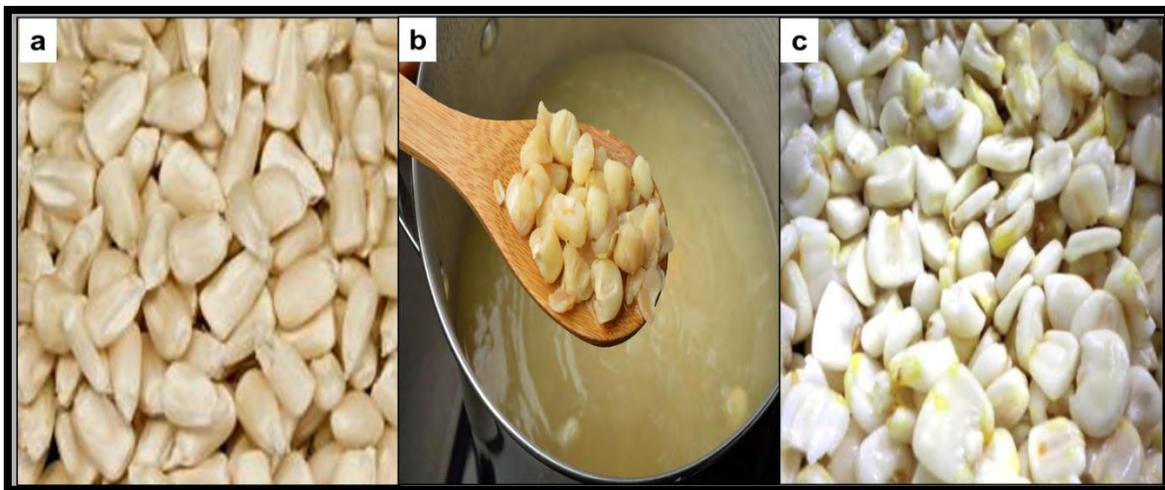
Aunque en la nixtamalización comercial se emplean básicamente los mismos pasos que en el proceso artesanal, el granulado obtenido se somete a dos operaciones unitarias adicionales como el secado y la molienda, lo que genera como producto principal una harina nixtamalizada, la cual se puede convertir en otros productos nixtamalizados, mientras que en la nixtamalización tradicional se obtiene como producto principal la masa nixtamalizada, la diferencia más importante entre estos dos productos es el porcentaje de humedad en harina aproximadamente 38 % y en masa cerca al 46 %. Sin embargo, las condiciones de proceso varían y con esto se afectan las condiciones de calidad de los productos finales por lo que se obtienen tortillas con diferente textura (Bello-Pérez *et al.*, 2002).

### 1.4.1. Proceso de nixtamalización tradicional

La nixtamalización artesanal es un proceso empleado para cocer el grano de maíz (Figura 1.4a) y obtener una masa con ciertas propiedades funcionales; consiste en someter al grano de maíz a una serie de tratamientos drásticos, poco comunes en la industria alimentaria para cualquier tipo de alimento. El maíz se limpia para retirar basura, productos extraños, residuos de ocote y grano podrido dañado por plaga; después, los granos de maíz se exponen a tratamiento térmico-alcalino, con temperaturas desde 70-95 °C (en algunos lugares hasta temperatura de ebullición). Las características químicas de la solución alcalina durante la cocción deben ser tales que la concentración de cal en agua siempre exceda el punto de saturación del hidróxido de calcio. Las concentraciones empleadas durante el proceso están dentro del rango de 0.5 a 2.0 % con un pH inicial de 12.4. El grano de maíz se considera cocido cuando el pericarpio se desprende con facilidad del grano frotándolo con los dedos, se suspende el calentamiento y concluye la etapa de cocción. El pH residual del líquido de cocción (nejayote) debe ser aproximadamente de 11. Existen dos formas de realizar la cocción: puede iniciar desde temperatura ambiente, en ese momento se le agrega el álcali, el maíz y el agua, o bien puede iniciar el calentamiento del agua a temperatura ambiente y agregarse el maíz y el hidróxido de calcio, una vez que alcanza la temperatura



establecida previamente para cocer el grano de maíz. Esto se define según las costumbres del lugar o de la familia que procesa el grano. Durante la etapa de cocimiento el maíz se mezcla durante un periodo de 20 segundos cada 10 minutos, para homogenizar el líquido de cocimiento y los sólidos que tienden a sedimentarse (Trejo-González *et al.*, 1982). En seguida se suspende el calentamiento, se deja reposar el grano en su medio de cocción (Figura 1.4b), en el mismo reservorio con la solución caliente, por un tiempo que varía de 3-16 horas de acuerdo con la región geográfica o lo que establezca el operario. Aquí ya no se mezcla el nejayote con los granos, la temperatura va descendiendo poco a poco. Al conjunto de granos hidratados y reposados se le conoce como nixtamal (Figura 1.4c).



**Figura 1.4. Proceso de nixtamalización; a) Maíz, b) Maíz cocido y nejayote, c) Nixtamal**

A simple vista se puede observar que la solución de cocción va cambiando su viscosidad y su color, debido a los sólidos que se han desprendido de los granos de maíz. La mayoría de los investigadores coinciden en que en esta etapa se promueven los principales cambios al maíz, porque el agua y los iones de calcio han penetrado al interior del grano y hay una importante pérdida de estructuras



como el endospermo, el germen y el pericarpio (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2007) La humedad de los granos de maíz después del reposo se establece en un rango de 54-56 % en base a recomendaciones reportadas (Gómez *et al.*, 1989; Bressani *et al.*, 2001). Una vez transcurrida esta etapa se elimina el nejayote, se realiza un drenado aproximadamente durante 10 minutos para eliminar el líquido sobrenadante; aquí se presenta una pérdida importante de materia porque se eliminan fracciones de pericarpio con calcio que se había fijado en el grano de maíz (Pflugfelder *et al.*, 1988). Posteriormente, se efectúan dos lavados a los granos de maíz con un volumen de agua que también es muy variable, y va a depender del lugar de donde se procese. Su función es eliminar el exceso de calcio y disminuir el pH del grano. El agua del último lavado deberá tener un pH aproximado de 8.5 en aguas residuales, de otra manera ocasiona un mal sabor en los productos elaborados. La cantidad de agua utilizada va desde 2 litros por kilogramo de maíz hasta 4 litros por cada uno de los lavados. Las condiciones de lavado son muy importantes dado que el nixtamal está más hidratado, dependiendo del tiempo en que ha reposado y de que gran parte del pericarpio se ha dañado. El nixtamal ya lavado se lleva a una molienda en húmedo en un molino de discos de piedras con una distancia de abertura entre ellas de 3 mm, donde una de las piedras está fija y la otra gira para triturar el material, el que por fricción genera energía, aumentando considerablemente la temperatura y produciendo gelatinización de los gránulos de almidón. Se obtiene un granulado que al hidratarse y manipularse produce una masa compuesta de germen, fragmentos de pericarpio, partículas de endospermo aglutinados por una mezcla parecida a un pegamento de gránulos de almidón fundidos, hojas de matriz proteica y lípidos emulsificantes (Gómez *et al.*, 1989).

La masa obtenida se utiliza para formar manualmente discos aplanados que luego son cocidos en un comal comúnmente de barro o metal a 280 °C.

Es importante indicar que la operación de molienda requiere la adición de agua para evitar el aumento de temperatura y que la masa llega a tener de 46 a 55% de humedad (Paredes, 2000).



### 1.4.2. La masa fresca

El nixtamal se muele en un molino con elementos molientes de discos de piedras volcánicas como aparece en la Figura 1.5a. Uno de los discos gira y el otro se mantiene fijo obteniendo un granulado húmedo como muestra la Figura 1.5b.



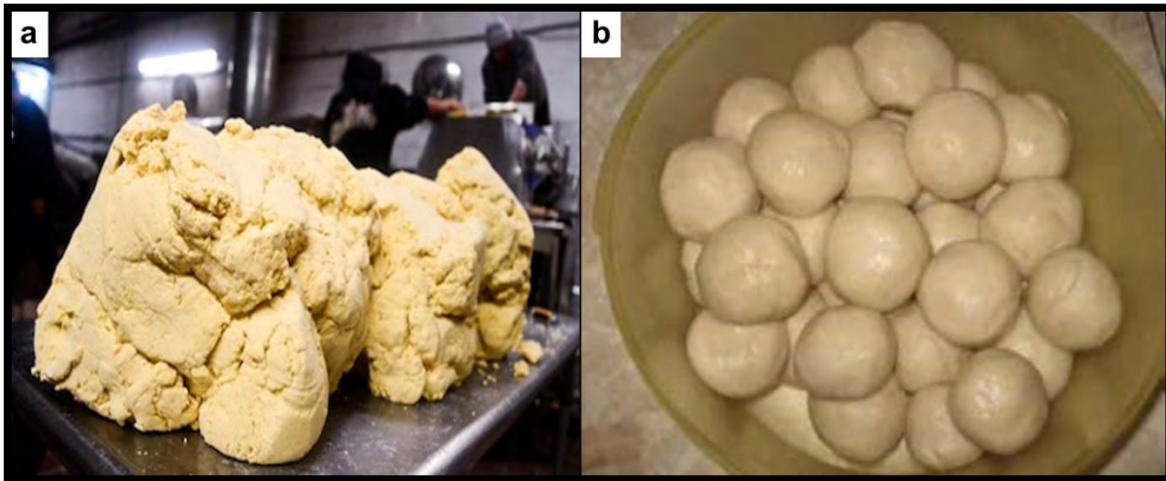
**Figura 1.5. Molienda de nixtamal; a) molino de discos piedras volcánicas, b) granulado húmedo masa.**

La humedad se encuentra en un intervalo del 46-52 %. Este granulado durante la molienda se hidrata generalmente hasta un 60 % para evitar mayor fricción entre los discos y evitar el sobrecalentamiento, ya que cuando sale del molino es de 50-75 °C. Esto evita la excesiva gelatinización del almidón que produce masa pegajosa (aquí se reflejan gran parte de los efectos del cocimiento y la molienda) y se percibe si estas masas deben ser acondicionadas con algún aditivo por la poca fuerza mecánica que presentan y se pegan al equipo de mezclado (Gómez-Aldapa *et al.*, 1996).



### 1.4.3. La masa para elaborar tortillas

El granulado húmedo se le adiciona agua, se moldea y se forma una masa (Figura 1.6a y 1.6b), posteriormente se forman testales que son bolas de masa (el tamaño de estos es diferente, dependiendo si las tortillas se elaboraran a mano o en maquina troqueladora) y de las características de la población.



**Figura 1.6. Masa fresca; a) Masa, b) Testales.**

En los estados del norte del México se prefieren testales de menor tamaño para elaborar discos o tortillas de pequeñas dimensiones y delgadas, mientras que en los estados del sur se prefieren discos más grandes. Cuando la masa ya se encuentra hidratada debe taparse con un manto mientras se troquela, para evitar la pérdida de humedad, ya que se produce rápidamente si la masa se encuentra expuesta al medio ambiente (Gómez-Aldapa *et al.*, 1996).

### 1.4.4. La tortilla de masa fresca

Se conoce como tortilla, al producto elaborado con masa que puede ser mezclada con ingredientes opcionales, sometida a cocción (NOM-187-SSA1/SCFI-2002).

García-Uribe, (2012) determinó la ingesta diaria de tortilla y sus derivados a través de seis niveles socioeconómicos los cuales están representados en la



Tabla 1.2, siendo E el segmento más pobre representando el 6.7 % de la población, D es el segundo segmento más pobre del país, el cual representa el 18.3 % de la población, D+ se considera el segmento más representativo de la sociedad mexicana y representa el 35.8 % de la población, C es denominado el nivel medio, se encuentra por arriba del promedio poblacional de bienestar, representa 17.9 % de la población, C+ segundo estrato con más alto nivel socioeconómico, representa el 14% de la población y por último A/B es el estrato con el más alto nivel de vida e ingresos en el país, representa el 7.2 % de la población.

**Tabla 1.2. Ingesta diaria en gramos**

<b>Concepto</b>	<b>A/B</b>	<b>C+</b>	<b>C</b>	<b>D+</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Tortilla de maíz	75.9	89.9	125.1	153	160.4	113.4
Derivados de maíz	20.5	20.1	16.5	27.1	56.4	153.5

*Fuente:* Garcia-Urigüen (2012).

Las poblaciones socioeconómicamente más pobres son las de mayor consumo de tortilla teniendo valores de 113.4 gramos per cápita, a diferencia de los grupos con más alto nivel, los cuáles sólo consumen 75.9 gramos per cápita.

Para 2014 el consumo de tortilla de maíz estuvo entre los 7.3 y 9.4 millones de toneladas, de acuerdo a informes publicados por la Secretaría de Economía y el Consejo Regulador de la Masa, respectivamente, alcanzando un promedio de 8.4 millones de toneladas, ambas cifras actualizadas de acuerdo a la población considerada para 2013 (Excélsior, 2014).

En el caso de la población rural es muy alto el número de familias que elaboran sus propias tortillas, si se considera a la población productora de maíz (2.8 millones) y el total de hogares del medio rural (6.9 millones) se puede estimar que al menos 4 millones de familias consumen tortilla elaborada por ellos mismos.



La mayoría de la población urbana y una parte de la población rural adquieren la tortilla elaborada en tortillerías mecanizadas. En 2009 el INEGI contabilizó 78,872 molinos y tortillerías, 580 mil tiendas de abarrotes, 3,319 supermercados y 20 mil establecimientos clasificados como minisúper que abastecen de tortilla.

El mercado de tortilla mecanizada, atiende a 10.1 millones de personas con un volumen de tortilla de 6 millones de toneladas y su valor asciende a más de 81 mil millones de pesos (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2014).

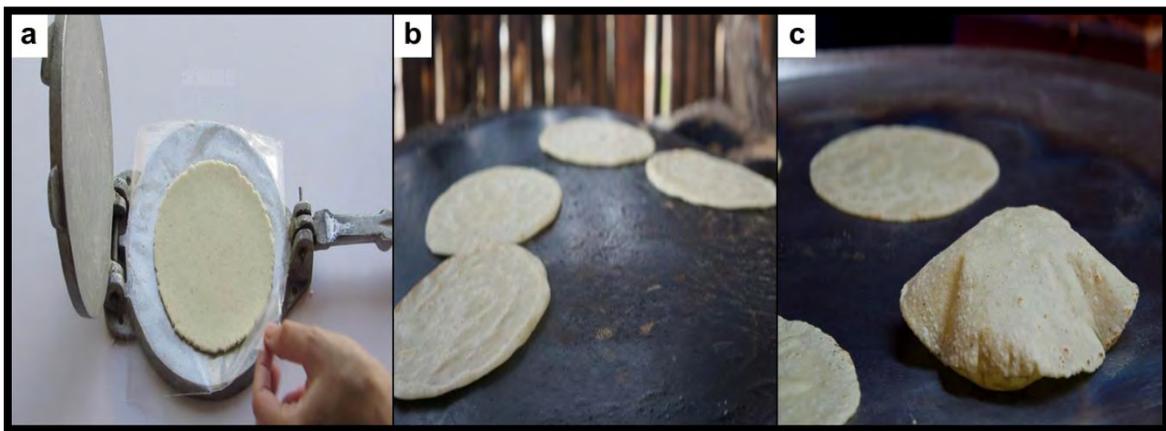
Aunque en México, la tortilla sigue siendo el alimento más consumido por la población ha disminuido su consumo. México es el principal consumidor de tortilla en el mundo, pues se estima que es consumida por el 94 % de la población, por lo que el volumen de producción y consumo es cercano a los 12 millones de toneladas de tortillas por año, lo que representa un porcentaje importante entre los productos alimentarios comercializados en el país. Cabe también señalar que es un alimento de suma importancia en la alimentación de diversos países de Centroamérica.

La tortilla es el principal alimento en la dieta del pueblo mexicano y base de su supervivencia desde hace más de 3,500 años. Desde el punto de vista nutricional, en una dieta equilibrada se debe de incluir del 55 al 65 % de hidratos de carbono, del 10 al 15% de materia proteica y entre 25 al 35 % de materia grasa; la tortilla aporta una cantidad importante de esos nutrientes en la dieta de la población consumidora, por lo que se le considera como un alimento de excelente calidad. También contribuye a gran parte de la energía diaria que necesitamos por su alto contenido de hidratos de carbono; además, es rica en calcio, fibra y potasio, y baja en grasa y sodio. Se considera que dentro de los requerimientos nutricionales diarios, la tortilla provee aproximadamente 45 % de las calorías, 39 % de las proteínas y 49 % del calcio.

La tortilla se define como un disco aplanado de masa de maíz nixtamalizado, cuyas dimensiones varían entre doce y dieciocho centímetros de diámetro y uno a dos milímetros de espesor (Figura 1.7a). Se cuece sobre una superficie caliente



(260- 280 °C) generalmente metálica, obteniendo un producto de  $\pm 25$  g (Campas-Baypoli *et. al.*, 2002). En esta etapa la tortilla desarrolla su textura final en tres pasos el primero es colocar la tortilla en el comal caliente, cuando la cara superior comienza a deshidratarse se voltea (Figura 1.7c) y se sella la segunda cara, el calor produce vapor dentro de la tortilla y este provoca que comience a inflar y aparezca una ampolla entre una capa delgada que se forma y la parte gruesa (Figura 1.7d).



**Figura 1.7. Elaboración de tortilla; a) Troquelado de la masa, b) Cocción, c) Formación de ampolla.**

Las tortillas frescas, recién preparadas son suaves y flexibles, pero después de unas horas se vuelven duras y frágiles, y por lo general se rompen cuando se doblan o enrollan al enfriarse se endurecen, pero el endurecimiento se invierte por calentamiento (Campas-Baypoli *et al.*, 2002).

La composición química de una tortilla elaborada a partir de maíz blanco, amarillo y de manera industrial, se registra en la Tabla 1.3.



**Tabla 1.3 Composición química promedio de tortillas**

Producto	Humedad (%)	Proteínas (%)	Grasas (%)	Cenizas (%)	Fibra cruda (%)	Carbohidratos (%)	Calorías (kcal)
<b>Maíz blanco</b>	47,8	5,4	1,0	0,8	0,7	44,5	204
<b>Maíz amarillo</b>	47,8	5,6	1,3	0,8	0,6	44,4	212
<b>Industrial</b>	44,0	5,3	3,4	1,2	0,7	42,8	215

*Fuente: (Departamento de Agricultura, FAO, 1993)*

Es importante señalar que el maíz pertenece al grupo alimenticio de los cereales, cuya composición química se basa en el contenido de carbohidratos, que representan aproximadamente entre 500-700 g/kg de la materia seca, de estos el almidón y otros polisacáridos (fibra dietética) son los componentes en mayor cantidad (Hernández-Medina *et al.*, 2008), por esta razón la tortilla tiene un gran aporte de energía, el contenido final de humedad de la tortilla varía en un intervalo de 38- 48 % (Bressani, 1997).

La calidad del producto se determina principalmente por la materia prima utilizada, que puede ser maíz nixtamalizado o harina de maíz. En el caso del maíz nixtamalizado la calidad del grano es el determinante principal es decir de la variedad del maíz del que proviene; en el caso de las harinas de maíz la calidad es más homogénea sin embargo las cualidades organolépticas y nutricionales son distintas a las elaboradas a partir de maíz nixtamalizado.

En las formas de elaboración de tortillas se distinguen tres procesos diferentes, entre los que se encuentran el método artesanal, el método de tortillerías mecanizadas y el método industrial de tortilla fría envasada.

El método artesanal es el más utilizado en familias del medio rural, las cuales realizan el nixtamalizado de manera tradicional, ya que el maíz utilizado generalmente es producido por las mismas familias; al obtener la masa se aplanan en forma circular una pequeña porción de la misma con las palmas de las manos o



utilizando una máquina manual para obtener discos que son cocidos en un comal. Este método se ha modificado sustituyendo la masa por harina de maíz lo que permite un ahorro de tiempo e insumos. Sin embargo, las características organolépticas, texturales y nutricionales no son las mismas.

El método de producción utilizado en las tortillerías mecanizadas es el que abastece a la mayoría de la población en comunidades urbanas y se caracteriza principalmente por la utilización de equipos que incluyen la formación de la tortilla y su cocción. A estas máquinas se les suministra manualmente la masa utilizada, la cual forma las tortillas por medio de un sistema de rodillos que las aplana al pasar por ahí, posteriormente las coloca en una banda con calor que lleva a cabo la cocción.

El proceso industrial de tortilla fría envasada se desarrolla a grandes volúmenes donde se utiliza principalmente harina de maíz, sin embargo sus cualidades son muy distintas a las tortillas elaboradas de manera artesanal, debido a que la calidad en las características texturales y sensoriales es menor gracias a la adición de aditivos que mejoran la textura y los nutrientes. La ventaja de este tipo de productos es que pueden estar disponibles en la mayoría de los establecimientos comerciales y de consumo. A pesar de que sus costos de distribución son menores, el costo del producto final es mayor, lo que los convierte en productos de menor consumo.

En conclusión, la elaboración de tortillas por el método artesanal genera un producto de excelente calidad y aporte nutritivo, pero requiere de tiempos de producción prolongados, a diferencia de la elaboración industrial que genera menores tiempos de producción pero productos con características de menor calidad (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2014).



**1.4.5. Estadísticas de producción de tortilla**

Siendo la tortilla uno de los principales alimentos consumidos en México se requiere una alta producción, lo que ha generado la necesidad de procesarla de manera industrial. Por sus características de infraestructura y capacidad de producción, la estructura de costos de producción, muestra que es más eficiente si se produce con harina de maíz (Tabla 1.4) que si se produce a partir de masa de maíz nixtamalizado (Ver Tabla 1.5).

**Tabla 1.4. Estructura de costos para elaboración de tortilla con harina de maíz**

CONCEPTO	PARTICIPACIÓN (%)
<b>PROCESO HARINA - MASA</b>	
Costo de harina puesta en la tortillería	47.0%
Número de empleados	0.2%
Costo del kW/h	0.2%
Costo del m <sup>3</sup> de agua	0.2%
Valor de la amasadora	0.1%
Renta local mensual	1.3%
Gasto de mantenimiento mensual	0.3%
<b>Subtotal</b>	<b>49.3%</b>
<b>PROCESO MASA – TORTILLA</b>	
Número de empleados	30.3%
Costo del kW/h	1.5%
Costo del litro de gas	6.9%
Valor de la máquina	2.4%
Renta local mensual	6.6%
Gasto del mantenimiento mensual de la máquina	0.9%
Gastos administrativos mensuales	2.1%
<b>Subtotal</b>	<b>50.7%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

*Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2014*

**Tabla 1.5. Estructura de costos para elaboración de tortilla con masa de nixtamal**

CONCEPTO	%
Maíz	68.7%
Luz	4.8%
Agua	2.4%
Gas	5.0%
Renta	2.8%
Salarios	8.4%
<b>Otros</b>	<b>7.8%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

*Fuente: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2014*



Los datos anteriores muestran que el costo de materia prima es aproximadamente 20% más alto si se produce tortilla a partir de masa de nixtamal, sin embargo el precio al consumidor es, en promedio, un peso por kilogramo más cara la tortilla producida con harina que aquella a base de masa de nixtamal debido a los costos logísticos y de distribución. Adicionalmente, la producción a partir de harina cuenta con mayores rendimientos, reconocimiento de marca, tecnología, servicio al cliente y cobertura nacional. En tanto que la industria molinera de nixtamal continúan utilizando el método tradicional de masa de maíz, cuyos costos de producción son más elevados (Secretaría de Economía, 2012).

En la Tabla 1.6 se presenta el rendimiento de maíz para elaborar tortilla a partir de harina y de masa.

**Tabla 1.6. Rendimiento en la Cadena de Producción Maíz-Tortilla**

INSUMO (Maíz)	PRODUCTO ELABORADO	
	MASA DE HARINA DE MAÍZ	MASA DE NIXTAMAL
1 kg	0.938 kg de harina de maíz nixtamalizado	-
1 kg	2.140 kg de masa	1.8 kg de masa
1 kg	1.560 kg de tortilla	1.400 kg de tortilla

*Fuente: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, (2014).*

Como puede observarse en la tabla anterior, la eficiencia es más alta en la cadena maíz-harina de maíz-tortilla, por su rendimiento en la que por cada kilogramo de maíz se producen 1.560 kg de tortilla, mientras que en la cadena maíz nixtamalizado-masa-tortilla se producen 1.400 kg de tortilla por cada kilogramo de maíz utilizado. Sin embargo existen estudios que señalan que la harina de maíz no reproduce las cualidades nutricionales de las tortillas elaboradas a partir de maíz nixtamalizado; por lo que en las normas oficiales de las harinas, se incluyen especificaciones para la fortificación de la harina de maíz minerales y otros elementos importantes para la salud (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2014).



### 1.5. Definición y composición química de la harina de maíz nixtamalizado

De acuerdo a la Norma Mexicana NMX-F-046-S-1980 la harina de maíz nixtamalizado es el producto que se obtiene de la molienda de los granos de maíz (*Zea Mays*) sanos, limpios y previamente nixtamalizados y deshidratados.

En la Tabla 1.7 se muestra la composición química de la harina de maíz nixtamalizado.

**Tabla 1.7. Composición química de harina de maíz nixtamalizado**

Componente	En 100 g
Energía (kcal)	376
Humedad (%)	7.10
Fibra dietética (g)	1.80
Carbohidratos (g)	78.4
Proteínas (g)	7.10
Lípidos (g)	3.78
Cenizas (g)	1.82
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

*Fuente: Tablas de Uso Práctico de los Alimentos de Mayor Consumo, 2014.*

Una de las características que debe tener el grano de maíz para la producción de harina es que su contenido de lípidos sea menor al 4 % para evitar la descomposición de las grasas, conocido como enranciamiento en las harinas.

### 1.6. Estadísticas de producción de harinas de maíz nixtamalizado

El maíz blanco se produce y consume en su totalidad en el país, de los 22 millones de toneladas producidas, hasta el año 2010, 12 millones de toneladas se destinaron a la industria harinera y masa de nixtamal. En la Figura 1.8, se muestra la producción de harina de maíz nixtamalizado hasta el año 2010.



**Figura 1.8. Producción de harina de maíz en México 2003-2010**

*Fuente: Secretaría de Economía, con información del INEGI (2012).*

En 2010 la producción alcanzó las 2.28 millones de toneladas, luego de haber alcanzado su nivel máximo en 2009 (2.31 millones) (Secretaría de Economía, 2012).

#### **1.6.1. Proceso tecnológico de elaboración de harinas de maíz nixtamalizado**

En México, en el año de 1949 se desarrolló el proceso para la elaboración de harinas de maíz, con la finalidad de prolongar la vida de anaquel de la masa como subproducto del proceso de nixtamalización. A inicios del siglo XXI, se destacó un 47.5% más de consumo de tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por el método comercial, esto fue debido a que se minimizaron labores intensivas y tediosas del proceso de fabricación de la masa (cocimiento, reposo, molienda) del



método tradicional; obteniendo así un producto más homogéneo, y con un mejor control higiénico durante su elaboración, lo que permitió aumentar la vida de anaquel (Gómez-Aldapa *et al.*, 1996). Sin embargo, la principal desventaja de la harina de maíz nixtamalizado es que contiene menos del 50% de calcio que una harina nixtamalizada producida por el proceso artesanal, esto es debido a la remoción intencional del pericarpio en la etapa de lavado del proceso de nixtamalización comercial (Pons *et al.*, 2007; Rojas *et al.*, 2000).

De cualquier manera las tortillas son elaboradas de masa fresca y de harina de maíz nixtamalizado, en ambos casos al perder humedad, estas pierden sus propiedades de flexibilidad y de rolabilidad, es decir la tortilla endurece y se puede obtener un producto adicional conocido como tostada.

### **1.7. Tortilla endurecida**

Se conoce como tostada o tortilla endurecida al producto elaborado a partir de tortilla o masa que puede ser mezclada con ingredientes opcionales, sometido a un proceso de horneado, freído, deshidratado o cualquier otro, hasta obtener una consistencia rígida y crujiente (NOM-187-SSA1/SCFI-2002).

#### **1.7.1. Elaboración de tostadas por método de secado**

La popularidad de los productos horneados ha aumentado debido a su bajo contenido calórico. Sin embargo es importante considerar sus características de sabor y textura ya que son diferentes a las de los productos fritos (Sosa Morales y Vélez Ruiz, 2009).

### **1.8. Características del Almidón**

El almidón es la sustancia de reserva alimenticia predominante en las plantas y proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por el ser humano en todo el mundo. Tanto el almidón como los productos resultantes de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos de la dieta habitual. El almidón se diferencia de todos los demás carbohidratos en que en la naturaleza se presenta como complejas partículas discretas (gránulos) (Fenemma, 2000).



Los gránulos de almidón están formados por amilosa y amilopectina ordenadas de forma radial formando capas y creando regiones de forma cristalina y no cristalina. Los gránulos de almidón de maíz tienen formas diferentes mezcladas: unas son casi esféricas y otras angulares. En la Tabla 1.8 se presentan las propiedades generales de algunos gránulos de almidón y sus pastas (Fenemma, 2000).

**Tabla 1.8. Propiedades fisicoquímicas del almidón de maíz**

Propiedad	Almidón de maíz	Almidón de maíz rico en amilosa
Tamaño del gránulo ( $\mu\text{m}$ )	2-30	2-24
Amilosa (%)	28	50-70
Temperatura de gelatinización ( $^{\circ}\text{C}$ )	62-80	66-170
Viscosidad relativa	Media	Muy baja
Reología de la pasta	Corta	Corta
Claridad de la pasta	Opaca	Opaca
Tendencia a gelificar o retrogradar	Alta	Muy alta
Lípidos (%)	0.8	-
Proteína (%)	0.35	0.5
Fósforo (%)	0	0
Sabor	Cereal	-

*Fuente: Fenemma, 2000.*

### **1.9. Estructura y morfología del almidón**

La mayoría de los gránulos de almidón se componen de dos polímeros de D-glucosa: amilosa, un glucano esencialmente no ramificado  $\alpha[1-4]$  y amilopectina, que tiene cadenas de glucosas unidas  $\alpha[1-4]$  dispuestas en una estructura altamente ramificada con enlaces de ramificación  $\alpha[1-6]$ .

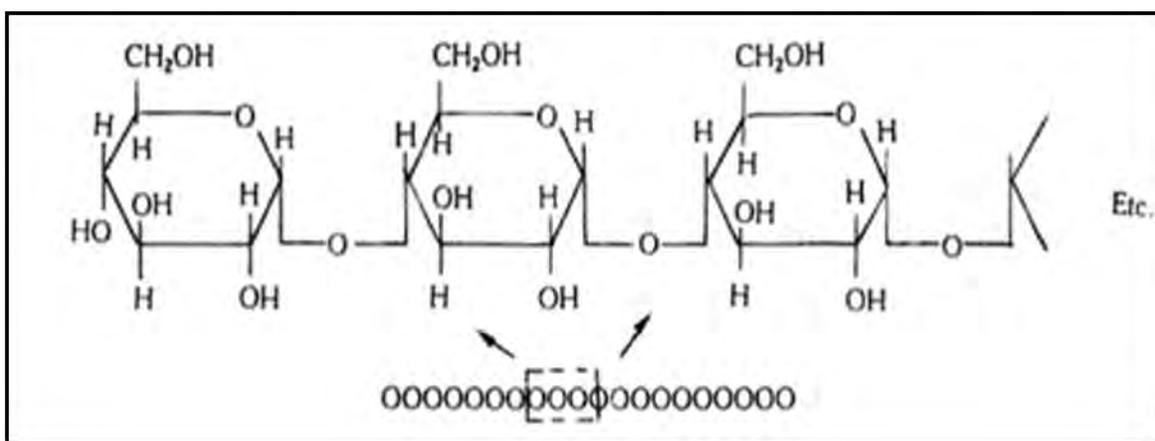
El contenido de humedad de gránulos de almidón nativo es usualmente de aproximadamente 10%. La amilosa y la amilopectina constituyen el 98-99% del peso seco de gránulos nativos, siendo el resto pequeñas cantidades de lípidos, minerales y fósforo en forma de fosfatos esterificados en hidroxilos de glucosa. Los gránulos de almidón varían en tamaño (de 1 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro) y forma (poligonal, esférica, lenticular) y pueden variar enormemente con respecto al contenido, estructura y la organización de las moléculas de amilosa y



amilopectina, la arquitectura de ramificación de la amilopectina y el grado de cristalinidad (Linderboom, *et al.*, 2004).

### 1.9.1. Amilosa

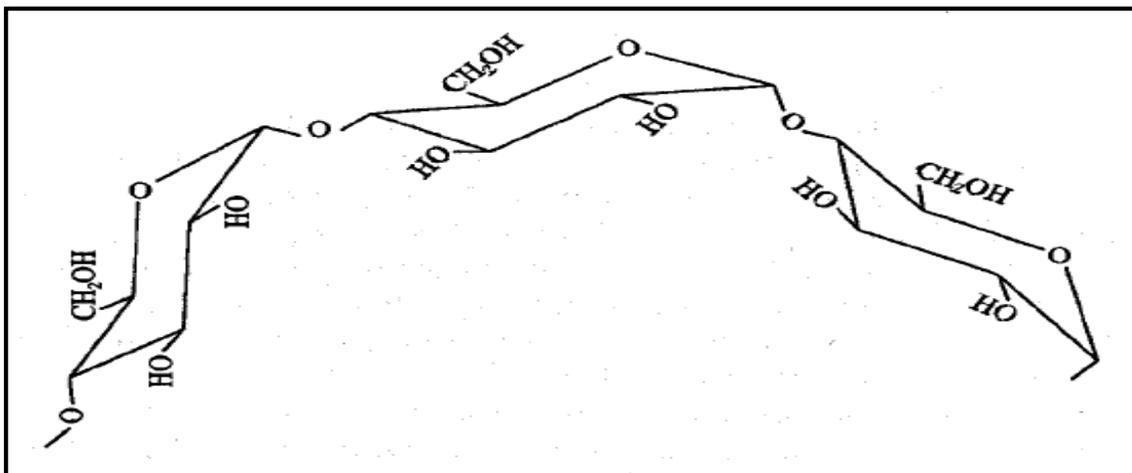
La mayor parte de la amilosa es una cadena lineal de unidades de  $\alpha$ -D-glucopiranosilo unidas por enlaces (1 $\rightarrow$ 4) (Figura 1.9). Aunque también existen moléculas con ramificaciones en posición (1 $\rightarrow$ 6). Las ramificaciones de una molécula de amilosa ramificada pueden ser muy largas o muy cortas, pero los puntos de ramificación están separados por largas distancias, de manera que las propiedades físicas de estas moléculas son esencialmente lineales (Linderboom, *et al.*, 2004).



**Figura 1.9. Estructura de la molécula de amilosa**

*Fuente: Peña, (2004).*

En la Figura 1.10 se aprecia el acoplamiento de las cadenas de amilosa es en forma de hélice en la que el interior contiene sólo átomos de hidrógeno, y es por tanto lipofílico, mientras que los grupos hidroxilo están situados en el exterior de la hélice.



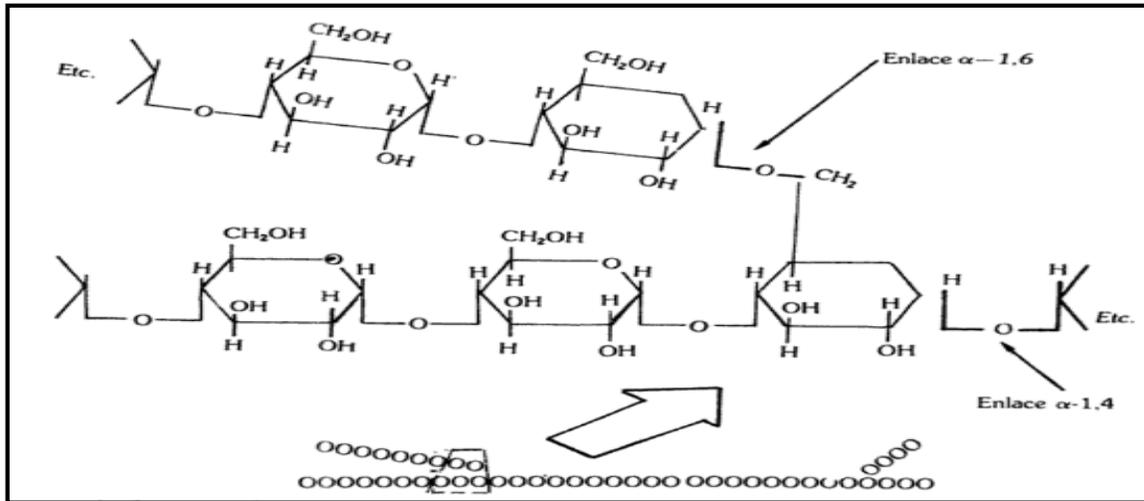
**Figura 1.10. Segmento de trisacárido de una molécula de amilosa**

*Fuente: Fenemma, (2000).*

La mayoría de los almidones contienen alrededor de 25 % de amilosa. Los almidones de maíz más comúnmente conocidos como ricos en amilosa que existen comercialmente poseen contenidos aparentes de masa de alrededor de 52 % y del 70-75 % (Fenemma, 2000).

### 1.9.2. Amilopectina

La amilopectina es una molécula muy grande y altamente ramificada, con enlaces de ramificación que constituyen alrededor del 4-5 % del total de los enlaces. Las ramas de las moléculas de amilopectina toman la forma de un racimo y se presentan como dobles hélices (Figura 1.11).



**Figura 1.11. Estructura de la molécula de amilopectina**

*Fuente: Fenemma, (2000).*

La amilopectina está presente en todos los almidones constituyendo alrededor del 75 % en los más comunes (Fenemma, 2000).

## 1.10. Cambios fisicoquímicos en el almidón

### 1.10.1. Gelatinización del almidón

La gelatinización es el proceso que ocurre cuando los gránulos de almidón se calientan en presencia de agua, lo que genera la ruptura del orden molecular dentro de la estructura del almidón. Este proceso se manifiesta en diversos cambios de propiedades tales como la hinchazón de los gránulos, la fusión de los cristales y la pérdida de birrefringencia y la solubilización del almidón. Este proceso es lento, la absorción de agua empieza en las zonas amorfas (amilosa), que son las menos organizadas y las más accesibles ya que los puentes de hidrógenos no son tan numerosos, ni rígidos como en las áreas cristalinas (amilopectina).



Durante el proceso de nixtamalización existe una gelatinización total de los gránulos de almidón de las capas externas del endospermo y una gelatinización parcial de las capas internas (Rojas-Molina *et al.*, 2007).

Cuando las tortillas son cocidas ocurre la gelatinización del almidón, los geles de almidón son estructuras termodinámicamente inestables y en enfriamiento la reasociación de las moléculas de almidón pueden ocurrir (Rendón Villalobos *et al.*, 2005).

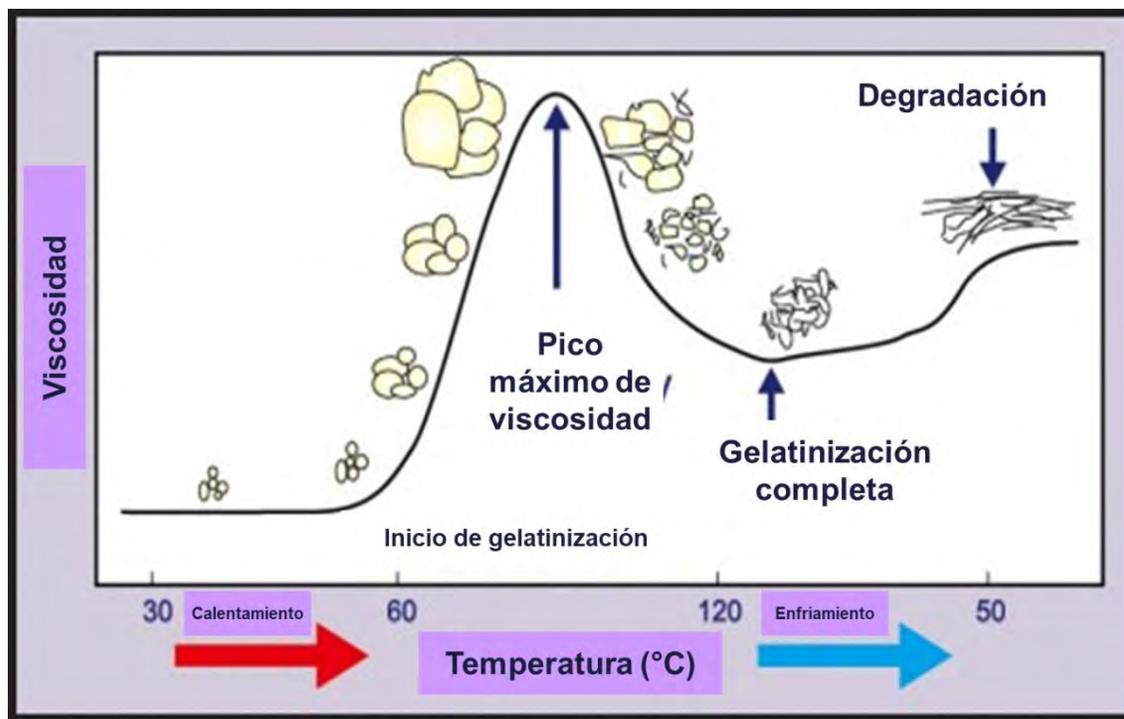
### 1.10.2. Fenómeno de Pastificación

El fenómeno de pastificación es resultado del calentamiento continuado de los gránulos de almidón en un exceso de agua lo que genera un mayor hinchamiento de los gránulos, lixiviación adicional de componentes solubles (amilosa principalmente) y, eventualmente, de manera especial si se aplican fuerzas de cizalla, disrupción total de los gránulos. Este fenómeno resulta en la formación de una pasta de almidón. El hinchamiento de los gránulos y la disrupción da lugar a una masa viscosa (la pasta) que consiste en una fase continua de amilosa y/o amilopectina solubilizadas y una fase discontinua de restos de los gránulos. La dispersión molecular completa no es alcanzada, con excepción quizá de existir condiciones de alta temperatura, elevada fuerza de cizalla y exceso de agua (Fenemma, 2000).

El enfriamiento de una pasta de almidón de maíz caliente resulta en la formación de un gel rígido, firme y viscoelástico. Cuando los gránulos de almidón se calientan en presencia de suficiente agua (al menos el 60 %), y se alcanza una temperatura específica, las regiones amorfas plastificadas del gránulo sufren una transición de fase de un estado de vídrioso a gomoso. Las moléculas de agua penetran entre las cadenas, rompen los enlaces entre las mismas y establecen capas de hidratación alrededor de las moléculas así separadas lo que da lugar a que los gránulos se hinchen hasta alcanzar un tamaño varias veces superior al original. Si una suspensión de almidón se agita moderadamente y se calienta, los



gránulos embeben agua hasta que la mayor parte es absorbida por ellos, forzándolos a hincharse, y a presionar unos contra otros hasta llenar el recipiente que los contiene en forma de una pasta altamente viscosa (Figura 1.12). Los gránulos así hinchados se rompen fácilmente, y son desintegrados por agitación, lo que resulta en una disminución de la viscosidad. Conforme se van hinchando, las moléculas de amilosa hidratadas difunden a través de la pasta hasta la fase externa (agua), fenómeno que es responsable de algunos aspectos del comportamiento de la pasta (Fenemma, 2000).



**Figura 1.12. Cambios en la molécula de almidón durante la pastificación en función de la temperatura.**

*Fuente: Fenemma, (2000).*

### 1.10.3. Fenómeno de Retrogradación

La retrogradación es el fenómeno donde la composición de las moléculas de almidón comienza a reasociarse dando lugar a una estructura más ordenada,



dicho término se ha utilizado para describir los cambios en el comportamiento físico del almidón posterior a la gelatinización (Campas *et al.*, 2002). Bajo condiciones favorables la estructura puede desarrollar formas cristalinas. Este fenómeno se relaciona con la estabilidad de la pasta de almidón durante el recocado (Rojas-Molina *et al.*, 2007).

La retrogradación genera el aumento gradual en la dureza de los productos de panificación. Los cambios físicos que ocurren durante la retrogradación influyen principalmente en la textura, digestibilidad y sobretodo en la aceptación de los productos ricos en almidón.

La retrogradación consiste en dos procesos: la solidificación de moléculas de amilosa lixiviadas de gránulos de almidón durante la gelatinización y la recristalización de amilopectina dentro de los gránulos de almidón (Méndez *et al.*, 2007); ocurre muy rápidamente por que las áreas cristalinas restantes actúan como un núcleo para la asociación adicional del almidón. Cuando las pastas de almidón son almacenadas por minutos o días ocurre la retrogradación y se cree es la responsable de los cambios texturales y de digestibilidad del almidón que tienen lugar durante el almacenamiento de los productos a base de almidón. El tiempo de almacenamiento, más que la temperatura es el mayor determinante de la biodisponibilidad del almidón en las tortillas (Islas *et al.*, 2006).

La habilidad de las cadenas de almidón para formar estructuras ordenadas en pastas, geles y productos horneados durante el almacenamiento es un proceso comúnmente llamado retrogradación; el cual influye principalmente en la textura y la vida de anaquel de estos productos (Rendón-Villalobos, 2005).

Una característica de la tortilla es su rápido endurecimiento, las tortillas recién preparadas son suaves y flexibles, sin embargo después de unas horas se endurecen y rompen fácilmente. La firmeza es reversible al calentar, lo que implica que la retrogradación del almidón genera la pérdida de textura. Las tortillas no contienen grasas añadidas lo que favorece la retrogradación del almidón.



El almidón es el principal componente de las tortillas de maíz la fracción de almidón es la responsable de la mayoría de los cambios en la textura que ocurren durante el procesamiento y almacenamiento. Durante el procesamiento térmico se puede formar almidón resistente a enzimas. Esta fracción se compone del almidón retrogradado y complejos de almidón con otros componentes del alimento (Campas-Baypoli *et al.*, 2002).

### 1.11. Almidón resistente a enzimas

La retrogradación del almidón es considerada un problema en el almacenamiento de tortillas, porque después de la preparación ocurre el endurecimiento y afecta la palatabilidad del producto. Por otro lado la retrogradación del almidón incrementa la resistencia enzimática a la digestión del almidón debido a la formación de almidón resistente el cual es asociado con bajas respuestas glucémicas e insulinémicas y es muy importante para la prevención de algunas enfermedades como cáncer de colon y enfermedades cardiovasculares (Rendón *et. al.*, 2005).

Los carbohidratos son la fracción principal de tortillas, teniendo como principal componente el almidón. Se ha establecido que una fracción de este almidón es resistente a las enzimas digestivas, y pasa a través del intestino delgado hasta el intestino grueso donde es fermentado por la microflora del colon, y es conocido como almidón resistente.

El índice glucémico mide el contenido de carbohidratos en los alimentos y la velocidad con la que incrementan el nivel de azúcar en la sangre. Los alimentos con un bajo índice glucémico (<55) y alto contenido de almidón resistente ayudan a disminuir la absorción de carbohidratos y prevenir fluctuaciones extremas en el contenido de glucosa en la sangre (Mariscal *et.al*, 2015).

### 1.12. Métodos de análisis: Fundamentos

#### 1.12.1. Molienda

La molienda es la operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas sólidas al dividir y/o fraccionar una muestra sólida, implica solo una transformación física que debe conservar las características de la materia prima.



Se pueden emplear molinos que aplican fuerzas preponderantes de impacto, cizalla o la combinación de ambas. La forma en que se aplica la fuerza depende de su magnitud, dirección y velocidad, permitiendo que las partículas la absorban en forma de tensión, produciendo una deformación en su estructura y cuando se sobrepasa este límite, es entonces que el material se fractura produciendo nuevas superficies (Cortazar *et al.*, 2008).



**Figura 1.13. Molino Pulvex**

El molino pulverizador de turbina (Figura 1.13) es el sistema más eficiente para la reducción de partículas y tiene diversas aplicaciones que auxilian a las diferentes industrias que requieren moler en sus procesos productivos. La cámara de molienda consta de un forro de molienda dentado, con seis martillos dentados y fijos al rotor que permiten la reducción del material al aplicar la combinación de fuerzas de impacto y cizalla. En la parte inferior de la cámara de molienda se



ajustan las cribas con dispositivos sujetadores, cuenta con un motor de 1.61 KW, trabaja con tamices de diferentes medidas.

### 1.12.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico por tamizado consiste en la separación mecánica de las fracciones de tamaño de partícula del cualquier material por medio de un juego de tamices con una abertura conocida.

Los tamices se componen de una malla metálica formada de alambres de diversos grosores. El grosor de los alambres y su tamaño está normado y depende del sistema utilizado. Los sistemas de tamices más utilizados son las series Tyler (Gran Bretaña), escala A.S.T.M. (E.U.A.), escala Gost 3585-73 (URSS). Escala internacional ISO. Los tamices se colocan uno encima de otro de mayor a menor abertura y la muestra de sólidos granulares cuidadosamente pesada se vierte en el tamiz superior para colocar después la tapa, a continuación el conjunto de tamices es colocado en un Ro-Tap (Figura 1.14) donde se somete a vibraciones y golpes durante un período de tiempo determinado, para harinas de maíz nixtamalizado el tiempo recomendado es de 10- 15 minutos.



**Figura 1.14. Ro-Tap.**

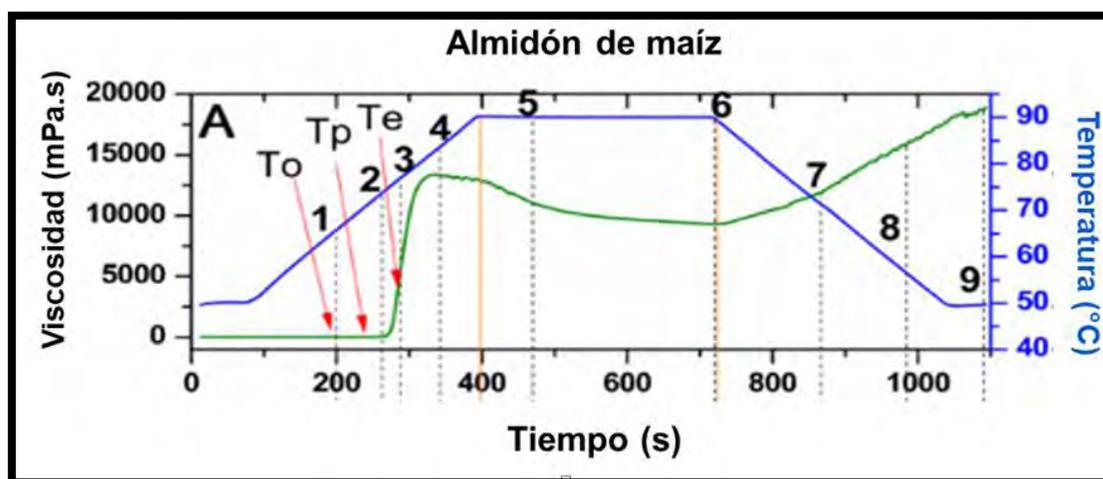
Así la harina pasa por un tamizado quedando los tamaños de partícula mayores retenidos a través de las diferentes aberturas de cada uno de los tamices. Cuando



el proceso termina, se pesa cada uno de los tamices incluyendo a la charola y se registra el peso obtenido para continuar con el análisis, dicho análisis puede realizarse de manera gráfica, tabular o analítica de acuerdo a las necesidades del trabajo. De esta manera se obtiene el rendimiento de la harina el cual debe corresponder a lo establecido en las normas mexicanas, el cual nos indica que 75 % de la harina pasa por el tamiz 60 USA (NMX-046-S-1980; Zeki-Berd, 2009).

### 1.12.3. Perfil de viscosidad aparente

El almidón existente en el grano de maíz es fundamental para la elaboración de tortilla y otros derivados del maíz, al ser sometido a tratamiento térmico se producen los fenómenos que afectan la textura de estos productos tales como la viscosidad que puede medirse mediante un reómetro con celda de almidones. Con este instrumento se obtiene una gráfica llamada perfil de viscosidad que ejemplifica los cambios que genera la temperatura en la textura del alimento y los diferentes fenómenos por los que atraviesa (Figura 1.15).



**Figura 1.15. Perfil de viscosidad de almidón de maíz, primera y segunda derivada para determinar los puntos críticos**

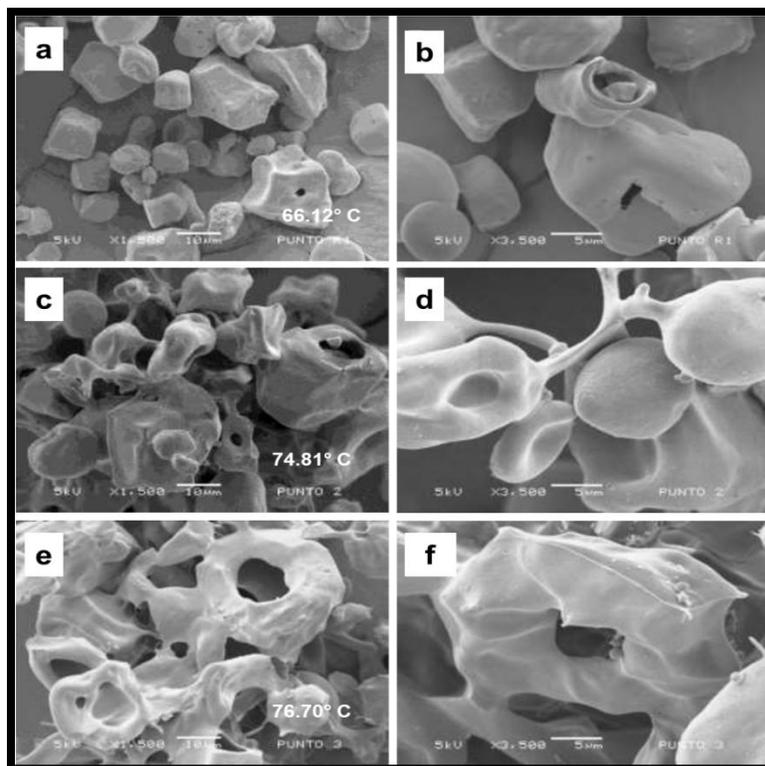
*Fuente: Rincón-Londoño, (2016).*

En harinas de maíz nixtamalizado, el punto más importante es el pico máximo de viscosidad presentado, ya que refleja el estado de la harina, después de su



procesamiento. Esto indica cómo se realizó el procesamiento de los granos de maíz, en el tratamiento térmico alcalino, la molienda húmeda y la molienda seca del granulado.

El perfil de viscosidad se divide en tres regiones, donde la Región I corresponde a la etapa del calentamiento (50-90°C), la región II es la etapa de la isoterma (90°C) y la Región III corresponde al enfriamiento (90-50°C), en el punto 2 se presenta el proceso de gelatinización y en el punto 3 representa el pico máximo de viscosidad, los gránulos de almidón muestran el mayor hinchamiento (Figura 1.15) de acuerdo a lo estudiado por Rincón-Londoño, *et.al.*, 2016, quienes analizaron los cambios morfológicos que ocurren en el almidón de maíz durante el perfil de viscosidad aparente por medio de una microscopía electrónica de barrido (Figura 1.16, Figura 1.17 y Figura 1.18).



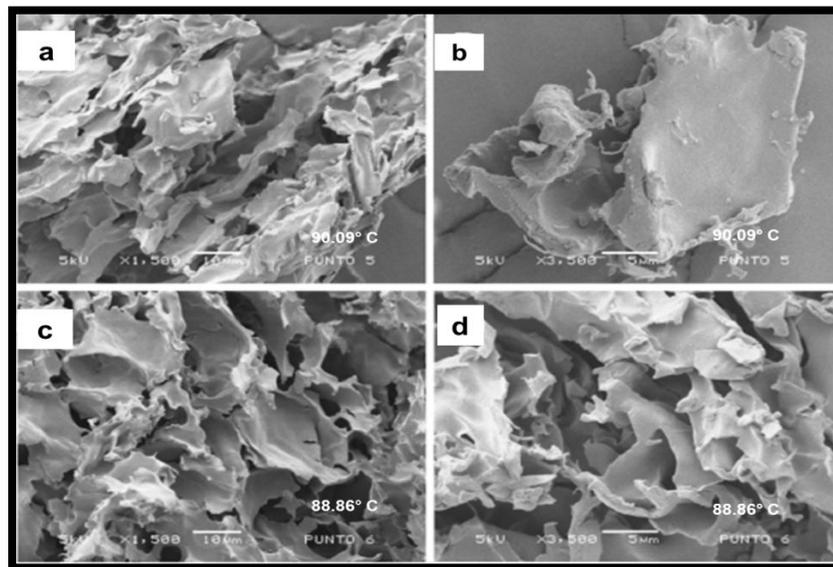
**Figura 1.16. Microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz Región I; a) Punto 1 1500X, b) Punto 1 3500X, c) Punto 2 1500X, d) Punto 2 3500X, e) Punto 3 1500X, f) Punto 3 3500X**

*Fuente: Rincón Londoño, (2016).*



En la Figura 1.16 a muestran que a 66°C los gránulos de almidón tienen una morfología poliédrica; en el punto 2 observaron ramificaciones que interconectan los gránulos formadas por amilosa y amilopectina exudadas a una temperatura superior del punto de gelatinización (Figura 1.16b); para el punto 3 los gránulos empiezan a mostrar una estructura en forma de “dona” como resultado del calentamiento y cizalla, así mismo estas “donas” comienzan a interconectarse y producen un incremento en la viscosidad aparente (Figura 1.16c) ; finalmente en esta etapa la estructura de “donas formada comienza a deshacerse y formar pequeñas hojuelas que corresponden al pico de viscosidad y se observa una red filamentosa entre ellas para este punto los gránulos de almidón no existen (Figura 1.16d).

En la región II se observó que la viscosidad disminuye ligeramente debido al cambio en la red formada en la región ya que las redes de hojuelas de almidón comienzan a formar capas (hidrogel), este punto es conocido como breakdown (Figura 1.17).



**Figura 1.17. Microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz; Región II; a) Punto 5 1500X, b) Punto 5 3500X, c) Punto 6 1500X, d) Punto 6 3500X**

*Fuente: Rincón Londoño, (2016).*



En la región III (Figura 1.18) las muestras permanecen con la misma estructura desarrollada, el incremento en la viscosidad aparente se puede relacionar con la reducción de la energía interna del sistema (decrecimiento de la temperatura) y el incremento de la fuerza de cizalla entre las capas formadas de hidrogel; finalmente demostraron que no existe retrogradación durante el enfriamiento, únicamente existe un reacomodo de la matriz amilosa-amilopectina.

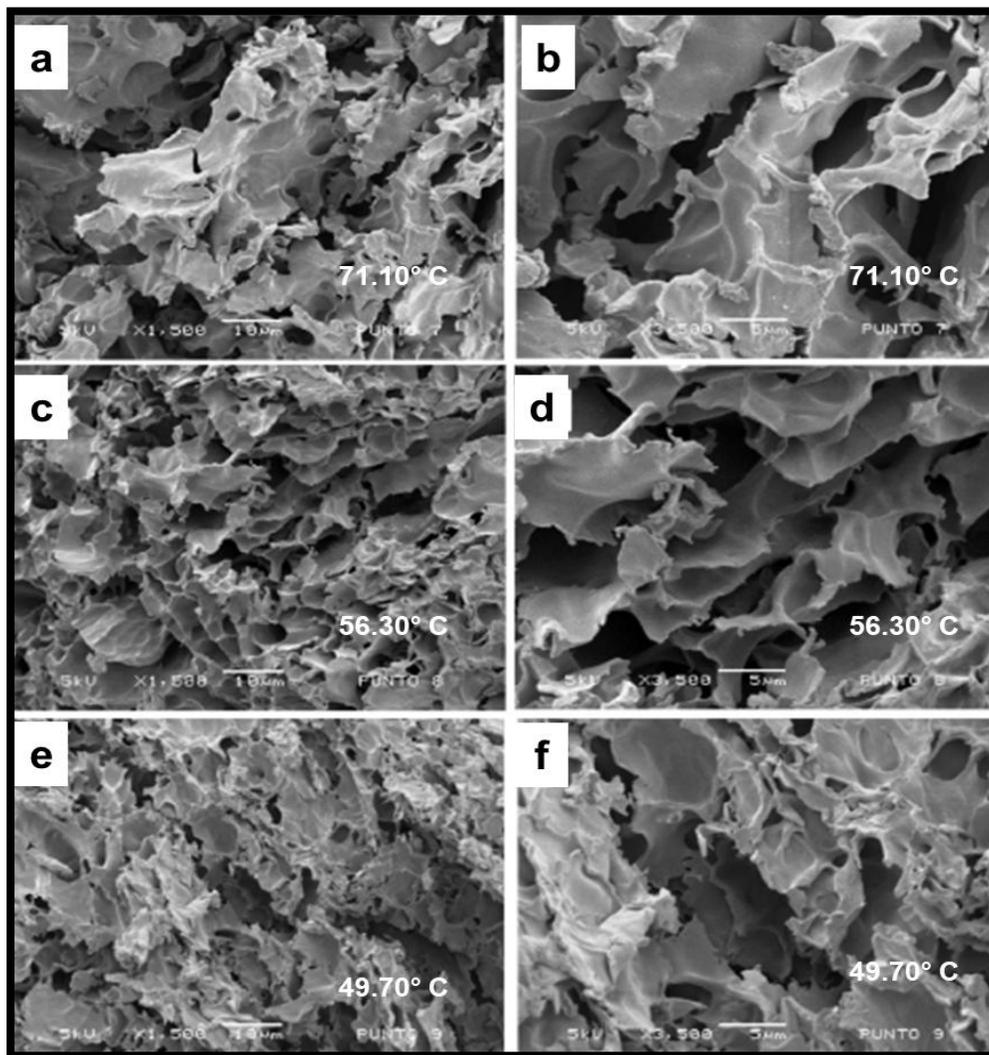


Figura 1.18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido para el perfil de viscosidad de almidón de maíz Región III; a) Punto 7 1500X, b) Punto 7 3500X, c) Punto 8 1500X, d) Punto 8 3500X, e) Punto 9 1500X, f) Punto 9 3500X

*Fuente: Rincón Londoño, (2016).*



### 1.12.1. Espectrofotometría de absorción atómica

La espectrofotometría de absorción atómica (Figura 1.19) es una de las técnicas analíticas más utilizadas para la determinación de trazas de elementos inorgánicos como Ca, Cu, Fe y Pb entre otros, debido a su alta selectividad, sensibilidad y la posibilidad de ser ajustada al análisis directo con una mínima preparación de muestra (Lorenzo, *et. al.*; 2010).

En este método la solución muestra es directamente aspirada a una llama de flujo laminar. La llama tiene como función generar átomos en su estado fundamental, de los elementos presentes en la solución muestra. Temperaturas cercanas a los 1,500–3,000 °C son suficientes para producir la atomización de un gran número de elementos, los que absorberán parte de la radiación proveniente de la fuente luminosa (FAO, 1994).



**Figura 1.19. Espectrofotómetro de absorción atómica**



### 1.12.1. Determinación de color

Para determinar el color de manera estandarizada se utiliza el espacio de color, un método para expresar el color de un objeto usando algún tipo de anotación, como pueden ser los números. La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), una organización que es considerada como la autoridad en la ciencia de la luz y el color, ha definido espacios de color, incluyendo CIE XYZ, CIE L\*C\*h, y CIE L\*a\*b\*, para comunicar y expresar el color objetivamente.

Este espacio de color es ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana. Investigadores y fabricantes lo usan para evaluar los atributos de color, identificar inconsistencias, y expresar precisamente sus resultados en términos numéricos.

El espacio de color L\*a\*b\* fue creado en base a una teoría de color que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo. L\* indica la luminosidad y a\* (+a indica rojo, -a indica verde) y b\* (+b indica amarillo, -b indica azul) son las coordenadas cromáticas.

Los instrumentos de medición de color, incluyendo espectrofotómetros y colorímetros, pueden cuantificar éstos atributos de color fácilmente; determinan el color de un objeto dentro del espacio de color y muestran los valores para cada coordenada L\*, a\*, y b\* (Konica Minolta, 2014).

### 1.12.2. Microscopia electrónica de barrido

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Figura 1.20), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron



Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativos y de distribución de elementos en superficies.



**Figura 1.20. Microscopio Electrónico de Barrido**

Las principales utilidades del SEM son la alta resolución ( $\sim 1$  nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras que pueden ser muestra sólidas o conductoras. Caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío (CIMAV, 2016).



### 1.12.1. Capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad

Cuando se calienta una suspensión acuosa de almidón, los gránulos se hinchan por una absorción progresiva e irreversible de agua aumentando su tamaño. La determinación de estos índices se mide aprovechando la capacidad de absorción del agua del gránulo de almidón y la exudación de fracciones de almidón a medida que se incrementa la temperatura de las suspensiones de almidón (Anderson, 1982).



## 2. METODOLOGÍA

Para la solución del problema: ¿Las harinas de maíz de almidón retrogradado mantienen las mismas propiedades fisicoquímicas que las harinas con las que fueron elaboradas las tortillas de nixtamal y las tortillas de harina comercial? Se elaboró un objetivo general y cinco objetivos particulares que se desglosan a continuación:

### 2.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz de almidón retrogradado obtenidas de tortillas de nixtamal y de tortillas de harina comercial endurecidas, mediante el rendimiento harinero, reómetro con celda de almidón, concentración de calcio, color y microscopia electrónica de barrido para correlacionarlos con su grado de retrogradación del almidón presente en las harinas.

#### 2.1.1. Objetivos particulares

1. Obtener harinas de maíz de almidón retrogradado a partir de tortillas de nixtamal endurecidas y de tortillas de harina comercial endurecidas, mediante la reducción de tamaño en un molino Pulvex 200, con dos diferentes velocidades de alimentación, determinando el consumo de energía, el rendimiento harinero y la distribución de tamaño.
2. Determinar el perfil viscoamilográfico de harinas de maíz de almidón retrogradado en un reómetro con celda de almidón para conocer el pico máximo de viscosidad y correlacionarlo con la gelatinización del almidón presente en la muestra.
3. Cuantificar la concentración de calcio en harinas de maíz de almidón retrogradado por espectrofotometría de absorción atómica, para evaluar el contenido de calcio residual en las harinas.
4. Determinar el color en harinas de maíz de almidón retrogradado en un colorímetro Minolta para evaluar los cambios en las unidades experimentales.



5. Evaluar los cambios morfológicos de harinas de maíz de almidón retrogradado en un microscopio electrónico de barrido para establecer las diferencias entre las harinas de maíz comercial y las harinas de nixtamal.
6. Cuantificar la capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad de las unidades experimentales a través de técnicas analíticas para determinar indirectamente el grado de deterioro del almidón y correlacionarlo con la viscosidad aparente.

El desarrollo experimental se resume en el siguiente cuadro metodológico de la Figura 2.1 el cual proyecta el trabajo conjunto.

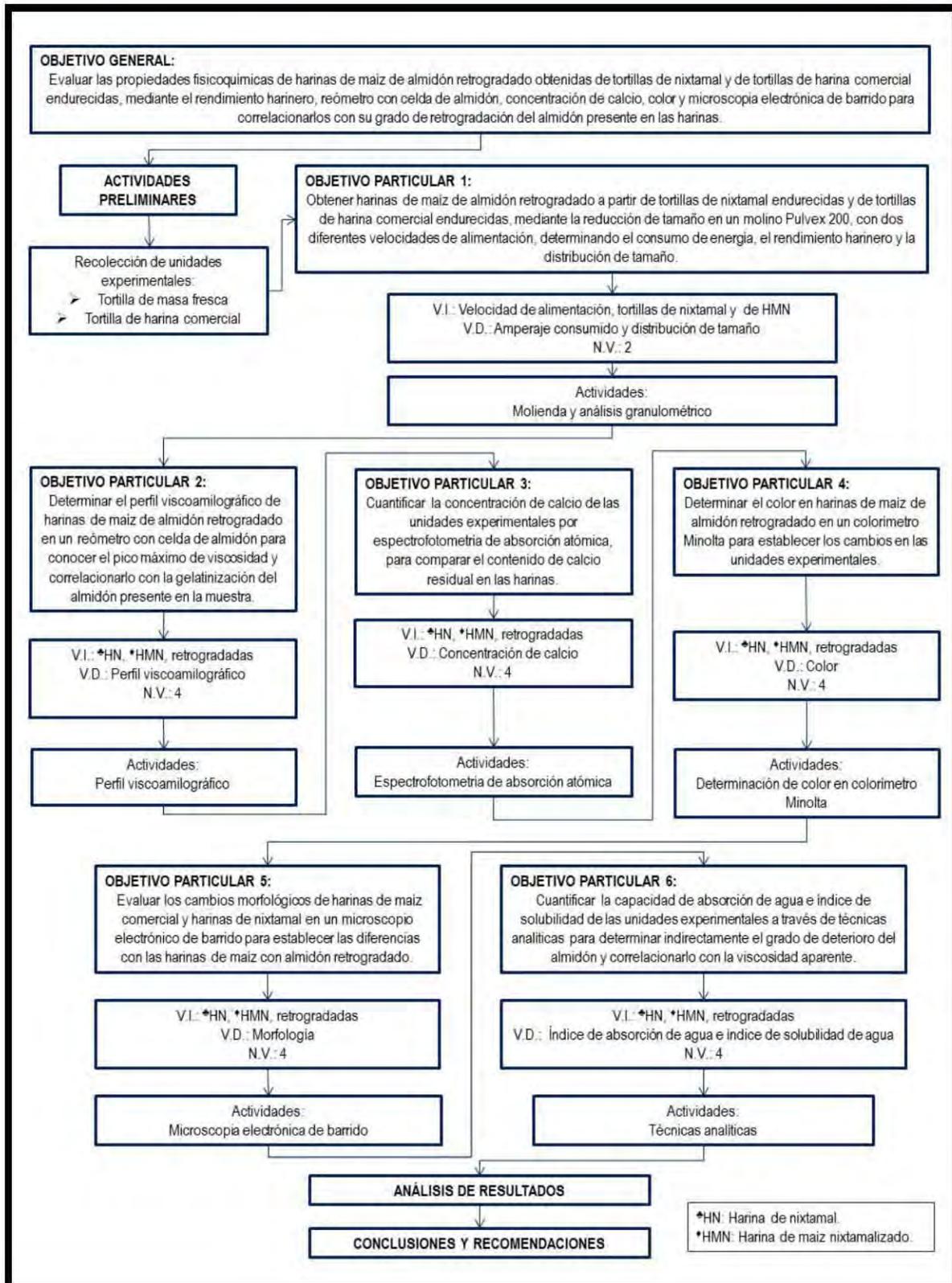


Figura 2.1. Cuadro metodológico del desarrollo experimental



### 2.2. Desarrollo experimental

#### 2.2.1. Actividades preliminares

Se recolectaron las unidades experimentales, las tortillas de nixtamal endurecidas y las tortillas de harina comercial endurecidas en dos diferentes tortillerías del Estado de México.

#### 2.2.2. Molienda y análisis granulométrico

Para la operación de molienda se realizó un análisis estadístico factorial 2x2 utilizando un paquete estadístico MINITAB16.

##### 2.2.2.1. Molienda:

Para obtener las harinas de maíz de almidón retrogradado se llevó a cabo una trituración de las tortillas endurecidas de nixtamal y las tortillas endurecidas de harina comercial para homogenizar los tamaños de partícula en un tamiz número 4 serie U.S.A. (4.7 mm) previo a la molienda de las mismas, ver Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Determinación del tamaño inicial de partícula en tortilla de maíz endurecida



### Materiales

- Tortilla de nixtamal endurecida
- Tortilla de harina comercial endurecida

### Equipo

- Molino Pulvex 200
- Multímetro

### Procedimiento

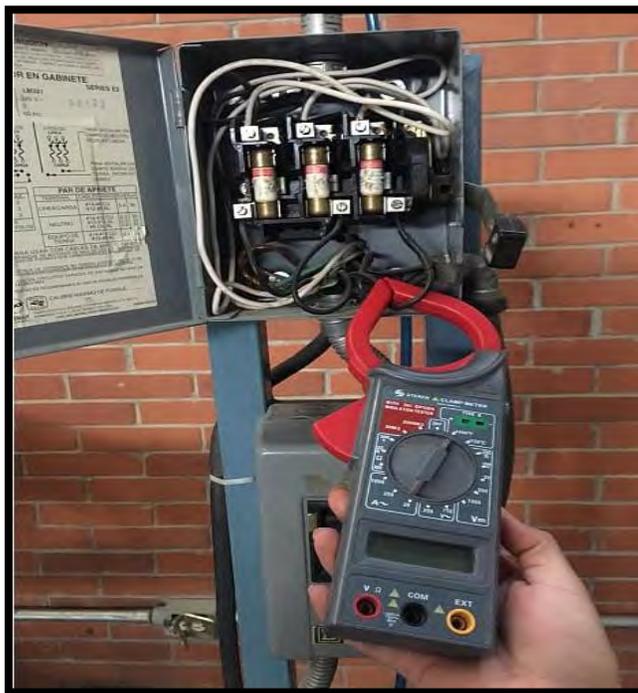
Después de la determinación del tamaño inicial de partícula se llevó a cabo la molienda en el equipo (Figura 2.3a) para producir las harinas de maíz de almidón retrogradado con dos diferentes velocidades de alimentación (velocidad alta: 760 g/min y velocidad baja: 380 g/min; Figura 2.3b).



**Figura 2.3. Molienda de tortillas endurecidas; a) Molino Pulvex 200; b) Alimentación de tortillas endurecidas en el equipo**



Para determinar la potencia del equipo se determinó el voltaje y la intensidad de corriente al iniciar el funcionamiento y durante la molienda con un multímetro Marca Steren (Figura 2.4).



**Figura 2.4. Determinación de voltaje con multímetro**

Con los valores obtenidos de voltaje y de intensidad de corriente se realizó el cálculo de la potencia de acuerdo a la ecuación 1.

$$P = VI [=]W \qquad \text{ec. (1)}$$

Dónde:

*P*: Potencia, W

*V*: Tensión, V

*I*: Intensidad de corriente; A



Para conocer el consumo de energía que se requirió para la reducción de tamaño, se determina la potencia del equipo sin carga (al arranque) y el consumo de potencia con carga (durante la molienda) con la ecuación 2.

$$E = \frac{P_c - P_0}{T} [=] \frac{Wh}{kg} \quad \text{ec. (2)}$$

Dónde:

*E*: Energía requerida por el equipo, (W/kg)

*P<sub>c</sub>*: Potencia consumida por el molino durante la molienda, (W)

*P<sub>0</sub>*: Potencia consumida sin carga, (W)

*T*: Velocidad de alimentación durante la molienda, (kg/h)

La eficiencia de la molienda para la obtención de las harinas de tortillas de nixtamal endurecidas y de tortillas de harina comercial endurecidas se determinó con la ecuación 3, descrita a continuación.

$$E = \frac{P}{P_m} \times 100 \quad \text{ec. (3)}$$

Dónde:

*E*: Eficiencia (%)

*P*: Potencia teórica; W

*P<sub>m</sub>*: Potencia del motor; W

### 2.2.2.2. Análisis granulométrico:

Para determinar la distribución del tamaño de partícula y la homogeneidad del material se llevó a cabo el análisis granulométrico.

Para este análisis, se realizó un proceso de tamizado mecánico para clasificar los tamaños de partícula, haciendo pasar las harinas por una serie de tamices



normalizados con diferentes números de malla en un equipo vibratorio. Las partículas se retienen en las diferentes mallas según el tamaño de las mismas.

### **Materiales**

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida

### **Equipos**

- Ro-Tap (U.S. estándar Modelo KH59986-60).
- Serie de tamices U.S.A, números de malla : 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120 y charola.

### **Procedimiento**

Para realizar el análisis granulométrico, la serie de tamices fue seleccionada de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-046-S-1980. Para iniciar fue registrado el peso de cada uno de los tamices seleccionados incluyendo la charola y a continuación acomodados en forma vertical en orden ascendente de acuerdo al número de malla de cada uno (Figura 2.5a), posteriormente fueron pesados 100 g de la muestra obtenida de la molienda que fueron colocadas en la parte superior del primer tamiz (Número 18), se colocó la tapa para acomodar los tamices en el equipo Rotap programando 12 minutos de agitación continua manera horizontal y vertical (Figura 2.5b), este procedimiento fue realizado para cada una de las unidades experimentales.



**Figura 2.5. Separación mecánica de las fracciones de tamaño de partícula en Ro-Tap; a) Tamices normalizados utilizados; b) Montaje de la serie de tamices en el equipo**

Al finalizar las fracciones retenidas en cada tamiz y en el plato fueron pesadas y se registraron los datos de acuerdo a lo descrito en la Tabla 2.1. La representación tabular del análisis granulométrico se realizó con una serie de cálculos, descritos a continuación:

En la columna 1 de la tabla se identifica el número de mallas que se emplean y las aberturas de los diámetros correspondientes.

En la segunda columna se registra la masa retenida después del vibrado en el Ro-tap, una vez pesadas las fracciones (en gramos).

En la columna 3 se registra la fracción masa ( $X_i$ ) y es la función diferencial de distribución para un módulo de tamices dado, calculándolo con la ecuación 4.

$$X_i = \frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}} \quad \text{ec. (4)}$$

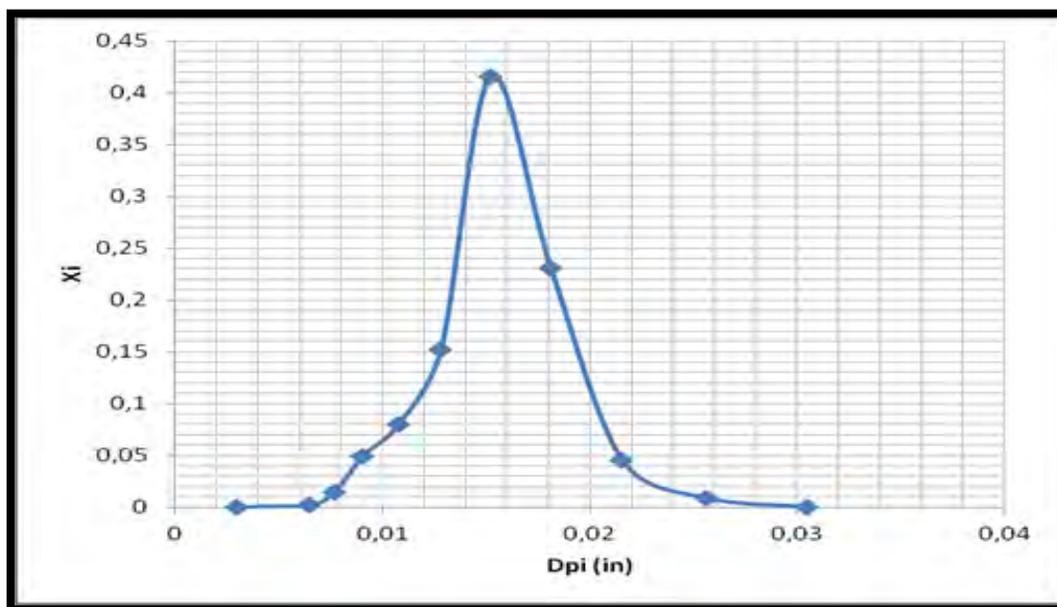


En las columnas 4 y 5 se registra la abertura de la malla por la que pasa la harina en pulgadas (in) y la abertura de la malla que retiene la harina en pulgadas (in) respectivamente. Este valor se obtiene de la placa de cada tamiz.

En la columna 6 se registra el Dpi (diámetro promedio de la partícula en cada fracción), según los tamaños tomados como valores de media aritmética en mallas de los dos tamices consecutivos que proporcionan a dicha fracción se obtiene de la ecuación 5.

$$Dpi = \frac{\text{Abertura de la malla que pasa} + \text{Abertura de la malla que retiene}}{2} \quad \text{ec. (5)}$$

En la Figura 2.6 se presenta un ejemplo de la gráfica de distribución diferencial de tamaño de las harinas evaluadas, donde se grafica: Xi vs Dpi.



**Figura 2.6. Ejemplo de gráfico diferencial de distribución de partícula**



En la columna 7 se registra la fracción masa retenida acumulada (FTR), obteniendo el cálculo con la ecuación 6.

$$FTR = \sum_n^i = Xi_{-1} + Xi \quad \text{ec. (6)}$$

Dónde:

*Xi-1: Porcentaje de peso anterior*

*Xi: Porcentaje de peso inicial*

En la columna 8 se registra FTP: Fracción masa retenida acumulada pasada obteniendo el cálculo con la ecuación 7.

$$FTP = (1 - FTR) \quad \text{ec. (7)}$$

**Tabla 2.1. Representación tabular del análisis granulométrico**

No. de malla	Masa Retenida (g)	Xi	Abertura de malla que pasa (in)	Abertura de malla que retiene (in)	Dpi (in)	FTR	FTP
18/25							
25/35							
35/45							
45/60							
60/80							
80/120							
120/charola							
CHAROLA							

Con los datos obtenidos para FTR y FTP se obtiene una gráfica acumulativa (Figura 2.7) para obtener la fracción pasada y la fracción retenida.

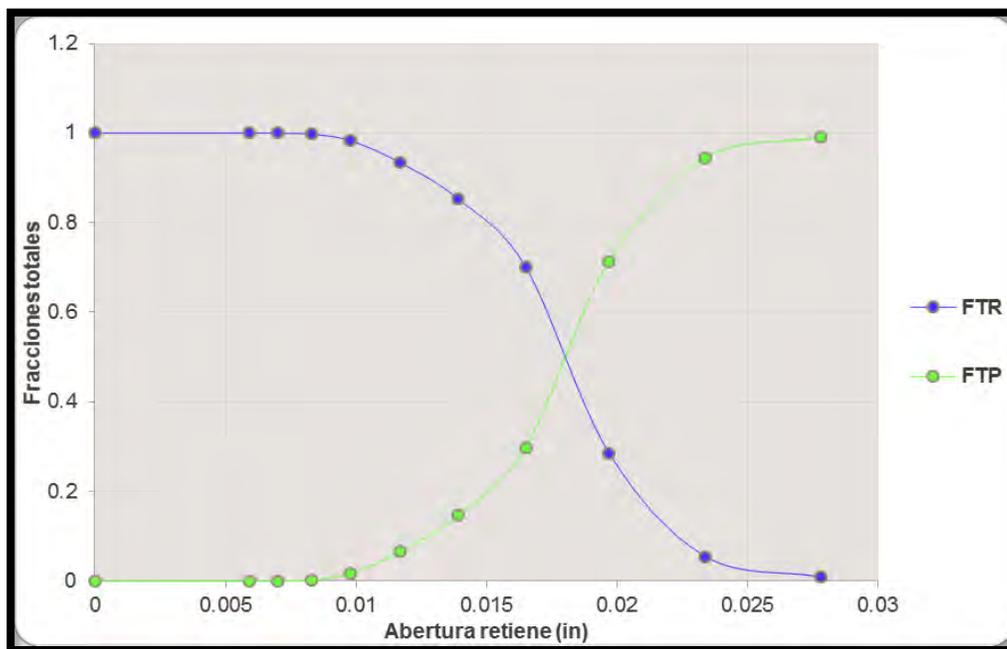


Figura 2.7. Gráfica acumulativa de FTR y FTP

### 2.2.3. Determinación del perfil viscoamilográfico

Es necesario conocer el desarrollo de la formación del gel en las diferentes unidades experimentales, ya que es indicativo de cómo se realizó el proceso. El comportamiento del proceso de gelatinización y los perfiles de viscosidad aparente de las mezclas de harina-agua y almidón-agua se midieron en un reómetro (Figura 2.8) equipado con una celda de almidones, que consiste en un calentamiento, una isoterma y finalmente el enfriamiento de la muestra en el equipo (Rincón-Londoño *et al.*, 2016).

#### Materiales

- 18 mL de agua destilada
- 3 g de muestra de harina de nixtamal
- 3g de muestra de harina comercial
- 3 g de muestra de harina de tortilla de nixtamal endurecida
- 3 g de muestra de harina de tortilla de harina comercial endurecida



### Equipos

- Balanza analítica
- Reómetro Anton Paar (St. Albans, United Kingdom, Modelo MCR 102)
- Micropipetas de 10 mL (PC Scientific, Mod.10 M)



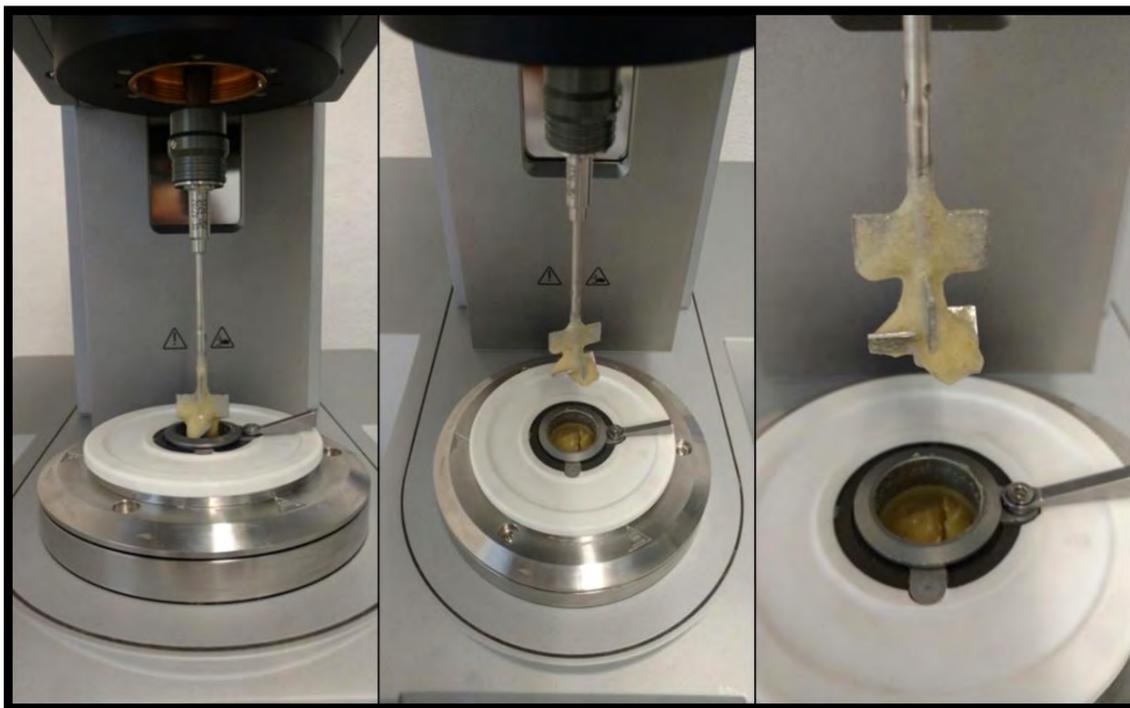
**Figura 2.8. Reómetro Anton Paar MCR 102 con celda de almidón**

### Procedimiento

Las muestras fueron ajustadas a 12 % de humedad, el perfil de viscosidad fue llevado bajo las siguientes condiciones experimentales: inicialmente la temperatura del sistema fue de 50 °C y permaneció constante. La muestra fue calentada por 5.3 minutos desde 50 hasta 90 °C, después se mantuvo constante la temperatura a 90 °C durante 5.3 minutos, después de esto las muestras fueron enfriadas hasta 50 °C en un tiempo de 5.3 minutos en esta temperatura se



mantuvo constante por 1 minuto. Todas las pruebas fueron realizadas a una frecuencia constante de 193 rpm (Figura 2.9). Esta metodología fue determinada por Rincón-Londoño, *et al.*; 2016.



**Figura 2.9. Prueba de viscosidad aparente en celda de almidón**

Con los resultados obtenidos se realizó una comparación de los picos máximos de viscosidad para cada una de las harinas.



### 2.2.4. Determinación de la concentración de calcio

Acorde con el objetivo tres se determinó la concentración de calcio en muestras de harinas de maíz.

#### Materiales

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida
- Vasos de Teflón (CEM, modelo, PFA-LV)
- Vasos de precipitado
- Matraces de 100 mL para aforar
- Carrusel para microondas
- Estándar de calcio 1000 ppm
- Referencia de harina de maíz nixtamalizado( corn meal-solid)
- Ácido nítrico alto grado de pureza (70 %)
- Ácido clorhídrico grado de pureza (66 %)
- Oxido de lantano
- Agua tridestilada
- Papel filtro No. 42
- Granos de maíz nixtamalizados
- Detergente Hy clin

#### Equipo

- Micropipetas de 10 mL (PC Scientific, Mod.10 M)
- Balanza analítica
- Horno de microondas (CEM, modelo MDS 81D)
- Espectrofotómetro (VARIAN, modelo AA-110)



### Procedimiento

Las determinaciones se realizaron por triplicado para todas las unidades experimentales. Esta determinación se realizó por espectrofotometría de absorción atómica, para establecer la concentración del mineral en las harinas. Esto se realizó acorde con el método 974.24 de la AOAC, (2000) modificado, ya que las cenizas se obtuvieron por digestión en ácido en un microondas. Posteriormente, se determinó la concentración del analito en un espectrofotómetro (VARIAN, modelo AA-110).

#### 2.2.5. Determinación de color

Para determinar la diferencia de color entre las harinas de maíz y las harinas de tortilla endurecida se realizó el análisis de todas las unidades experimentales.

### Materiales

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida

### Equipos

- Colorímetro Minolta Modelo CR300 (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan)

### Procedimiento

Se midió el color de las harinas en el colorímetro (Figura 2.10a y 2.10b), utilizando el dispositivo de sólidos granulares. El dispositivo se llenó con harina (Figura 2.10c) y se colocó el lente (Figura 2.10d), a continuación se realizó la lectura con el brazo para obtener los valores de las coordenadas de color CIE  $L^*$   $a^*$   $b^*$  (Donde:  $L^*$  representa la diferencia entre la luminosidad ( $L^*=100$ ) y la oscuridad ( $L^*=0$ );  $a^*$  representa la diferencia entre verde (-100) y rojo (+100);  $b^*$  representa la diferencia entre azul (-100) y amarillo (+100)); utilizando un ángulo de observador de  $2^\circ$  y un iluminante C (Konica Minolta, 2014).



Figura 2.10. Determinación de color de harinas de maíz; a) Colorímetro Minolta Modelo CR300; b) Preparación de las muestras; c) Llenado con harina del dispositivo obscuro; d) Colocación del lente

Los resultados obtenidos para los valores  $L^*$   $a^*$   $b^*$  se pueden revisar en el círculo de color mostrado en la Figura 2.11.

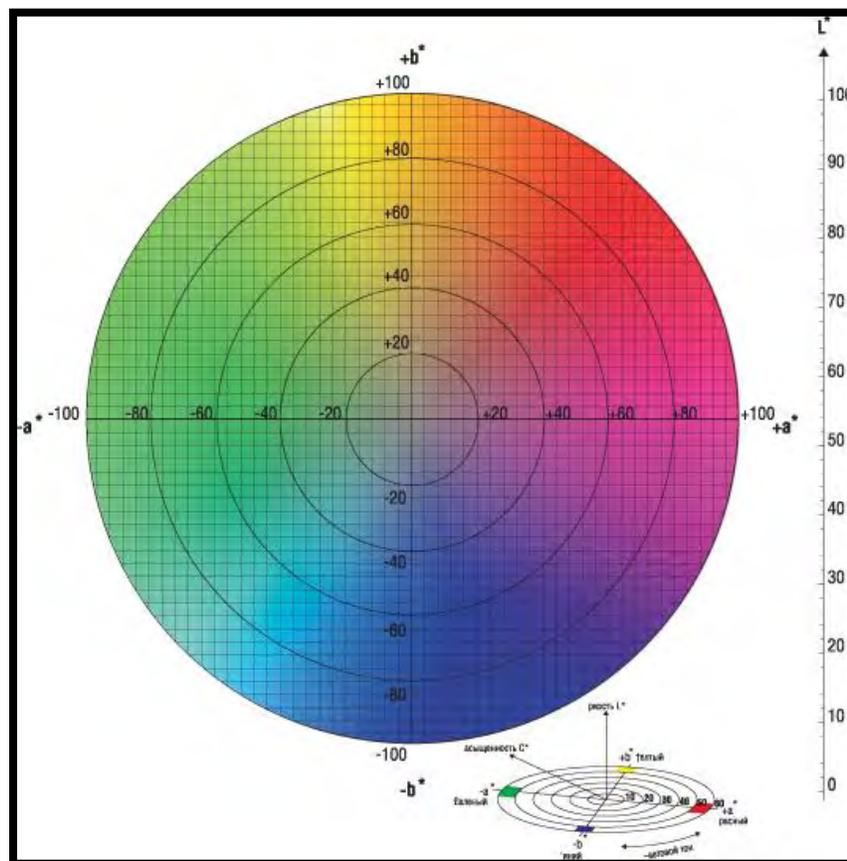


Figura 2.11. Círculo de color  $L^* a^* b^*$

### 2.2.6. Microscopía electrónica de barrido a bajo vacío

#### Materiales

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida

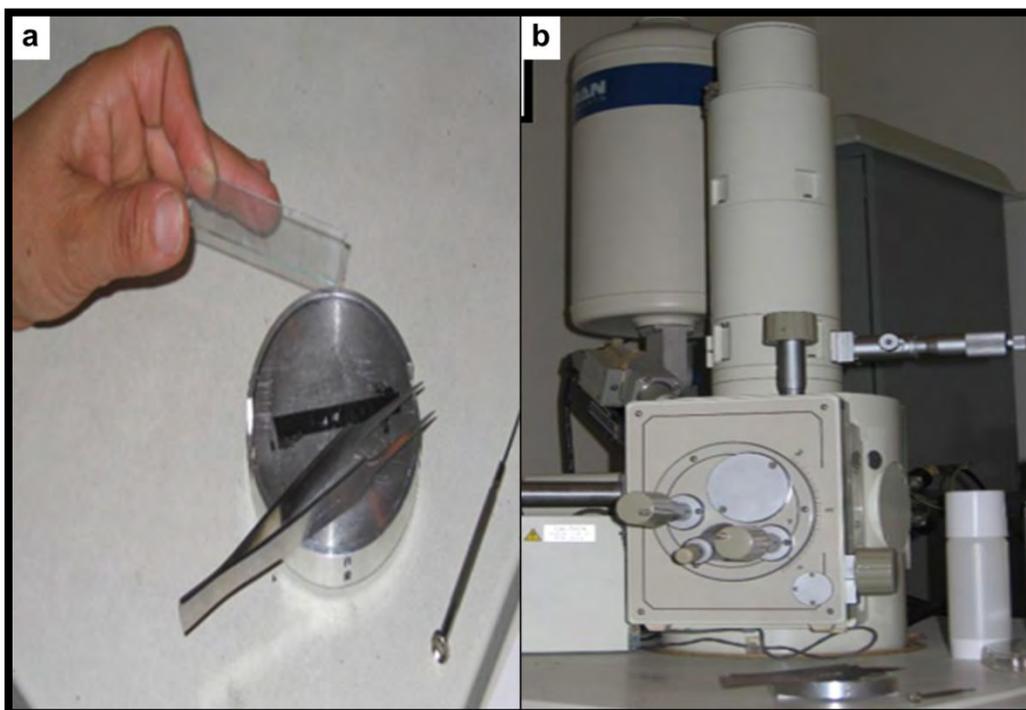
#### Equipo

- Microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6060LV



### Procedimiento

Las unidades experimentales se colocaron en un portaobjeto (Figura 2.12a), después se pegó sobre una cinta adherible de carbón electro conductiva, con el fin de que la emisión de electrones sea continua dentro del microscopio (Figura 2.12b) (Arenas, 1999).



**Figura 2.12. Microscopio electrónico de barrido; a) Porta muestra; b) Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6060LV.**

De esta forma la muestra está lista para ser observada al microscopio electrónico de barrido. El portaobjeto con la muestra es introducido al microscopio, después se enfoca la muestra que se desea observar, cambiando los aumentos a decisión del operario. No necesariamente el mayor aumento es el que proporciona la mejor imagen, ya que algunos distorsionan lo que se desea observar. El barrido se realiza de manera muy lenta sobre la superficie de las muestras. Las condiciones de trabajo con las que se operó el microscopio fueron; voltaje de aceleración electrónica 20 kV, con una presión en el rango de 237.72–396.20 kgf/m<sup>2</sup> en la



cámara de la muestra, las imágenes se obtuvieron en la superficie a partir de la señal electrónica de barrido a bajo vacío.

### 2.2.7. Índice de solubilidad e índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua y de solubilidad en agua se determinaron utilizando el método propuesto por Anderson (1982) dicho análisis permite cuantificar la cantidad de agua incorporada al material y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua.

#### 2.2.7.1. Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua es el resultado del peso del gel obtenido por gramo de muestra seca mediante la modificación del método descrito por Kite *et al.*, (1963) para medir el poder de hinchamiento del almidón.

#### Materiales

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida
- Agua destilada

#### Equipo

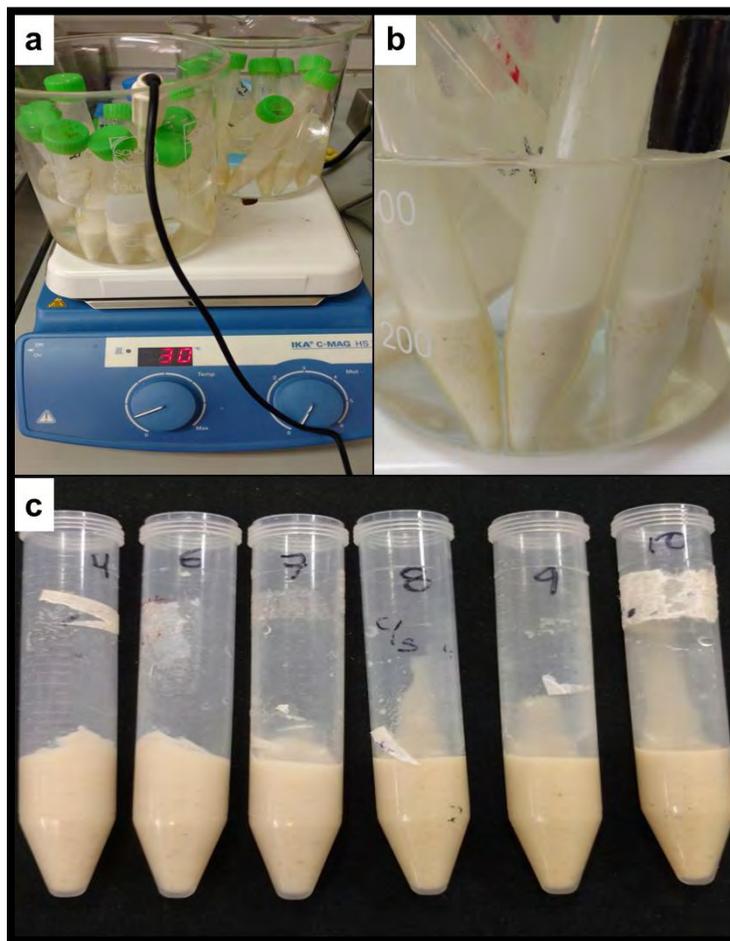
- Balanza analítica
- Centrífuga
- Tubos para centrífuga 50 mL

#### Procedimiento

De cada una de las muestras se pesaron 2.5 g y se colocaron en tubos de centrífuga, a estas muestras se les agregó 30 mL de agua destilada para mezclar y aumentar la temperatura hasta 30°C (Figura 2.13a) con un tiempo de agitación de 30 min. Después de este tiempo se mantuvo la agitación a 3000 rpm y se dejaron enfriar las muestras por 10 min (Figura 2.13b). Al finalizar se obtuvo el



peso obtenido de los geles resultantes (Figura 2.13c) de cada muestra, después de retirar el sobrenadante.



**Figura 2.13. Índice de absorción de agua; a) Preparación de la muestra, b) Enfriamiento de la muestra, c) Geles resultantes de las muestras**

La capacidad de absorción de agua para cada temperatura se calculó como el peso (g) del gel por g de muestra seca (ecuación 8).

$$IAA = \frac{P_g}{P_m} \quad \text{ec. (8)}$$

Dónde:



*IAA: Índice de absorción de agua*

*P<sub>g</sub>: Peso del gel; g*

*P<sub>m</sub>: Peso de la muestra; g*

### 2.2.7.2. Índice de solubilidad

El índice de solubilidad es la cantidad de sólidos secos recuperados por evaporación del sobrenadante resultante del análisis del índice de absorción de agua, expresado como porcentaje de sólidos secos en 2.5 g de muestra.

#### Materiales

- Harina de nixtamal
- Harina comercial
- Harina de tortilla de nixtamal endurecida
- Harina de tortilla de harina comercial endurecida
- Agua destilada

#### Equipo

- Cajas Petri
- Estufa
- Balanza analítica

#### Procedimiento

10 mL del sobrenadante de cada una de las muestras se colocaron en una caja Petri (Figura 2.14a) y posteriormente fue colocado en la estufa a 90°C durante 4 h (Figura 2.14b) hasta que se obtuvo el peso constante (Manrique, 2006).

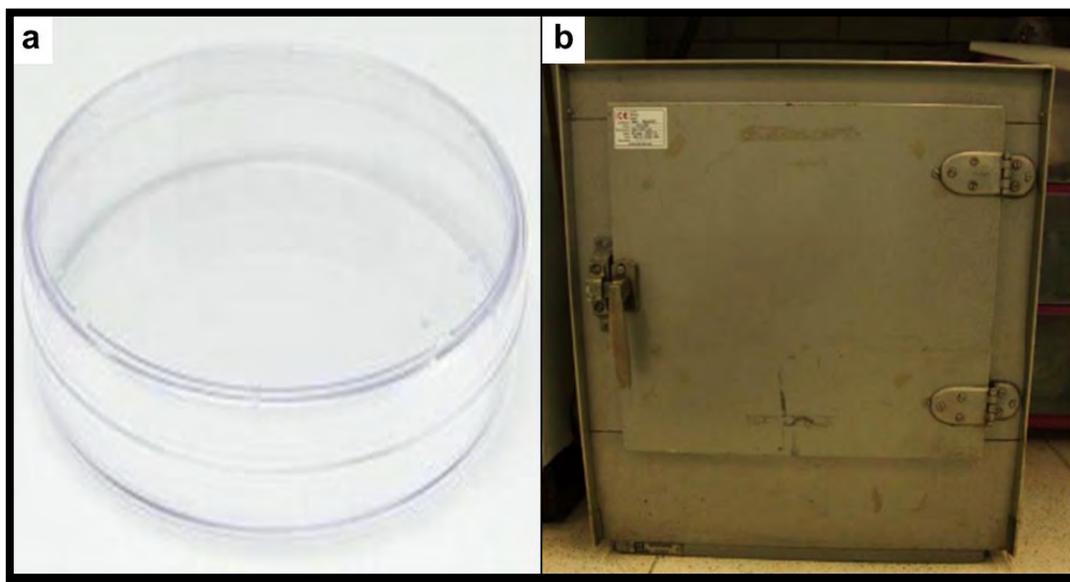


Figura 2.14. Determinación de índice de solubilidad; a) Caja Petri, b) Estufa

Con los pesos obtenidos se realizó el cálculo mostrado en la ecuación 9.

$$ISA = \left( \frac{P_{ss}}{P_m} \right) * 100 \quad \text{ec. (9)}$$

Dónde:

*ISA*: Índice de solubilidad en agua: %

*P<sub>ss</sub>*: Peso de sólidos solubles; g

*P<sub>m</sub>*: Peso de la muestra; g



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Actividades preliminares

Se recolectaron las unidades experimentales en dos tortillerías del Estado de México, estas muestras fueron: las tortillas de nixtamal endurecidas (Figura 3.1a) y las tortillas de harina comercial endurecidas (Figura 3.1b).



**Figura 3.1. Recolección de unidades experimentales; a) Tortilla de nixtamal endurecida, b) Tortilla de harina comercial endurecida**

Ambas tortillas endurecidas se diferencian principalmente por su color, las tortillas de nixtamal presentan un color más claro que las tortillas de harina comercial. De estas unidades experimentales se obtuvo la harina de maíz de almidón retrogradado estudiada.

#### 3.2. Objetivo particular 1: Molienda y análisis granulométrico

La distribución de tamaño en la harina de maíz nixtamalizado es un parámetro importante a evaluar de acuerdo a lo mencionado por Domínguez *et al.* (1996) ya

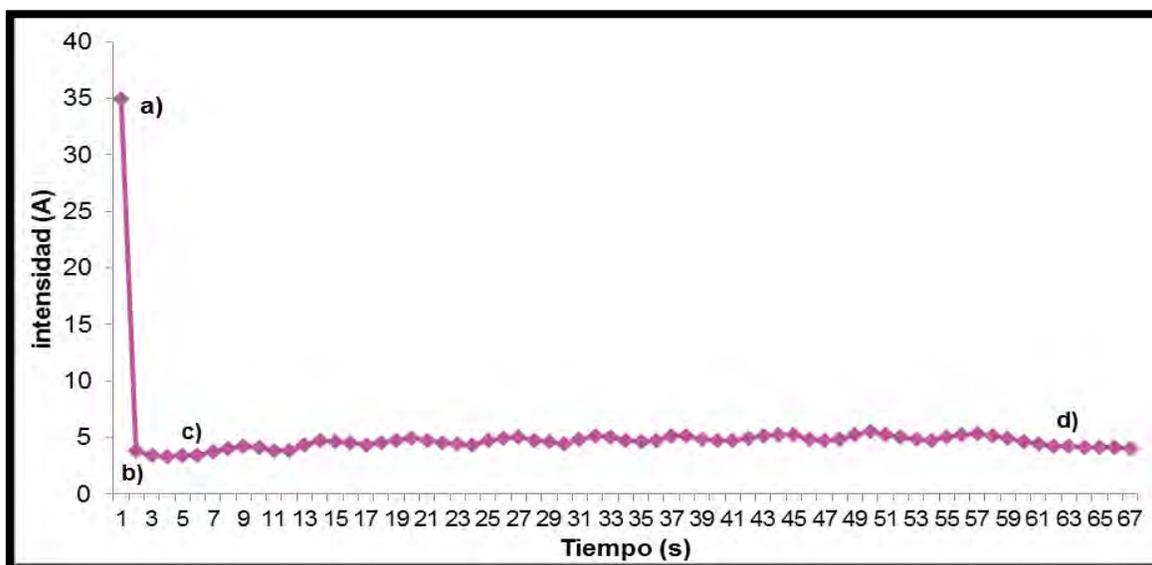


que las propiedades intrínsecas de las harinas de maíz están determinadas por su distribución de tamaño de partículas (Kerr *et al.*, 2000; Flores-Farias *et al.*, 2002).

### 3.2.1. Molienda:

#### 3.2.1.1. Intensidad de corriente

Al realizar la molienda con dos diferentes velocidades de alimentación: velocidad alta (760 g/min) y velocidad baja (380 g/min), se midió el amperaje del equipo para obtener la intensidad de corriente durante las etapas de molienda por las que atraviesa el material (Figura 3.2).



**Figura 3.2. Gráfica de intensidad de corriente del molino en función del tiempo; a) Encendido del equipo, b) Estabilización del equipo, c) Alimentación del material, d) Término de alimentación**

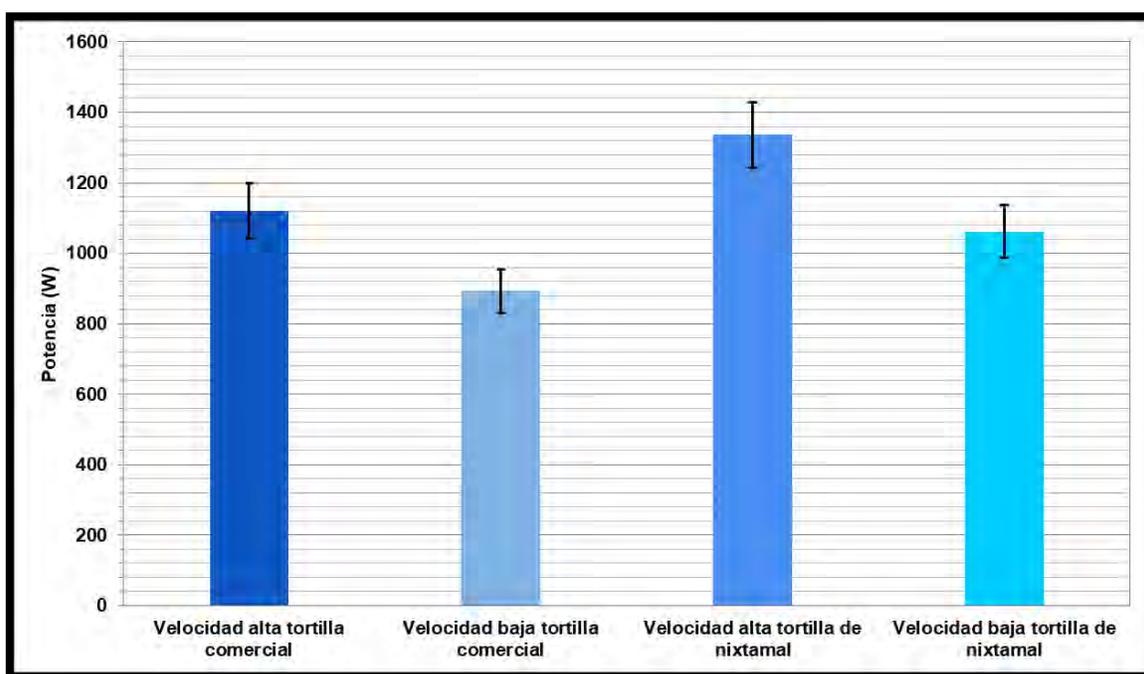
En la primera fase (Figura 3.2a) se encendió el molino, en la segunda fase (Figura 3.2b) la velocidad de alimentación se controló el molino, por esto se mantuvo constante la intensidad, en la tercera fase (Figura 3.2c) se alimentó el material al molino y por esto la intensidad disminuyó y para finalizar en la última fase (Figura



3.2d) se terminó la alimentación por lo que se volvió a estabilizar la intensidad del molino.

### 3.2.1.2. Potencia

En la Figura 3.3 se muestran los resultados obtenidos para la determinación de la potencia del equipo al realizar la molienda con cada una de las velocidades de dosificación del material y el tipo de tortilla endurecida.

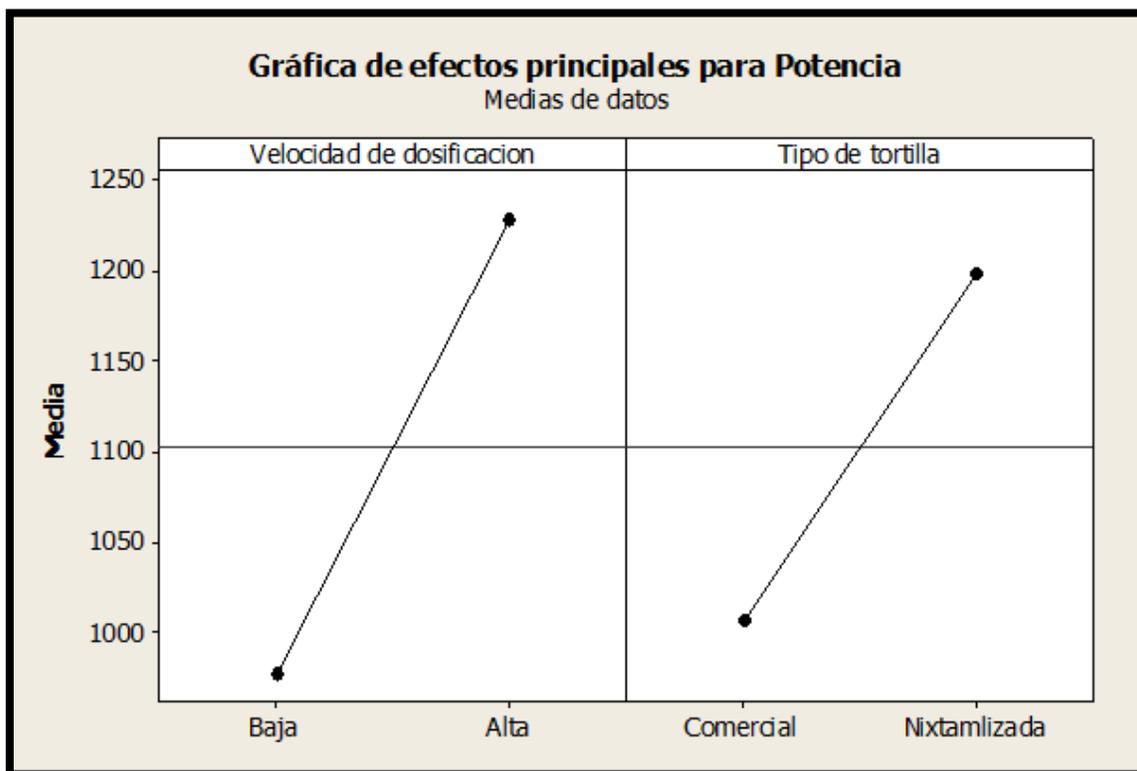


**Figura 3.3. Gráfica comparativa de potencia para dos diferentes velocidades de dosificación: tortilla de nixtamal endurecida y tortilla de harina comercial endurecida**

El gráfico anterior muestra que a velocidades altas se requirió una mayor potencia para la molienda, sin embargo las tortillas de nixtamal muestran una potencia mayor en ambas velocidades respecto a las tortillas de harina comercial ya que su dureza es mayor.



En la Figura 3.4 se muestran los efectos principales de la potencia para las variables de velocidad de dosificación y el tipo de tortilla endurecida.

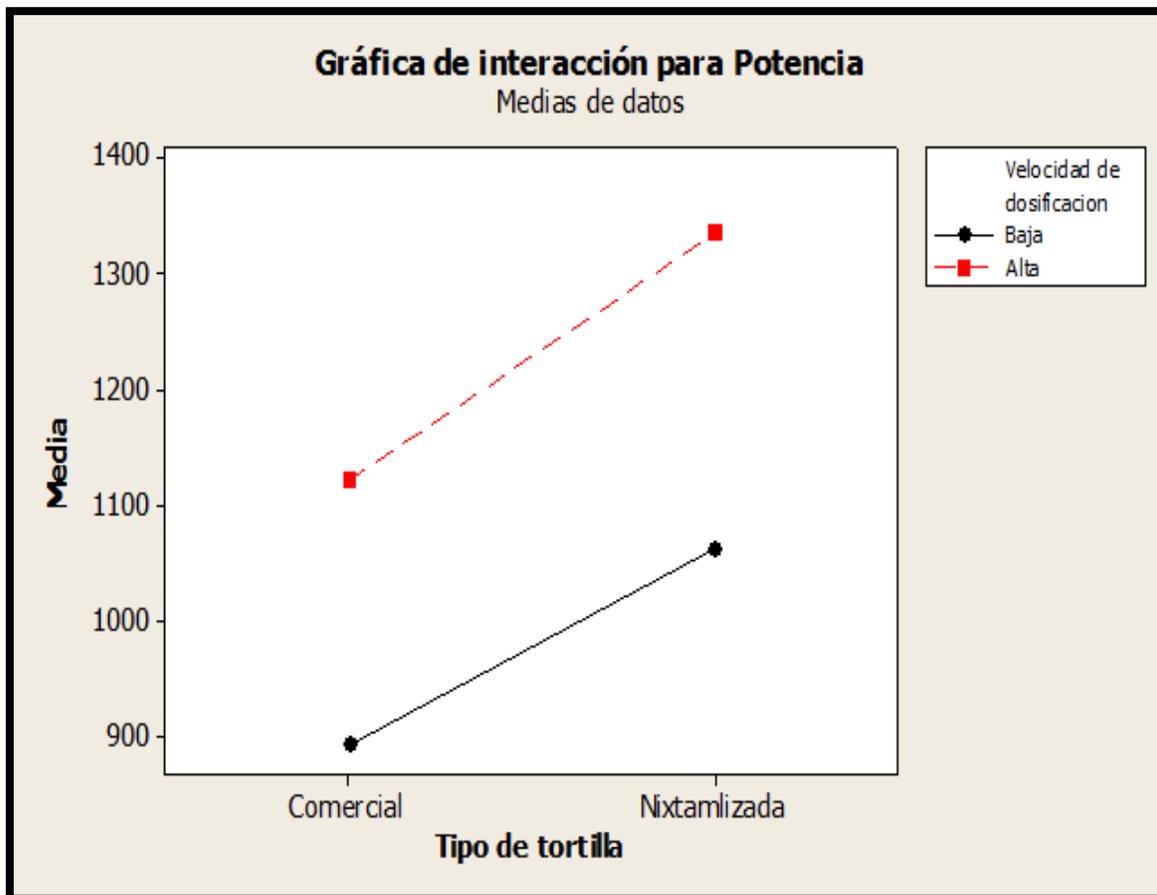


**Figura 3.4. Grafica de los efectos principales para potencia en función de la velocidad de dosificación y el tipo de tortilla**

Los efectos principales de las dos variables de la molienda demuestran que se obtuvieron valores mayores con una velocidad de alimentación alta en comparación con la velocidad baja, de la misma manera los valores obtenidos con el tipo de tortilla utilizada dieron como resultado valores más altos con la tortilla de nixtamal endurecida en comparación con la tortilla de harina comercial endurecida. Sin embargo, la velocidad de dosificación del material tiene efectos mayores que el tipo de materia prima en la molienda.



En la Figura 3.5 se muestran las interacciones de las variables (tortilla de nixtamal endurecida y tortilla de harina comercial endurecida) con sus dos niveles de variación (velocidades de alimentación alta y baja).



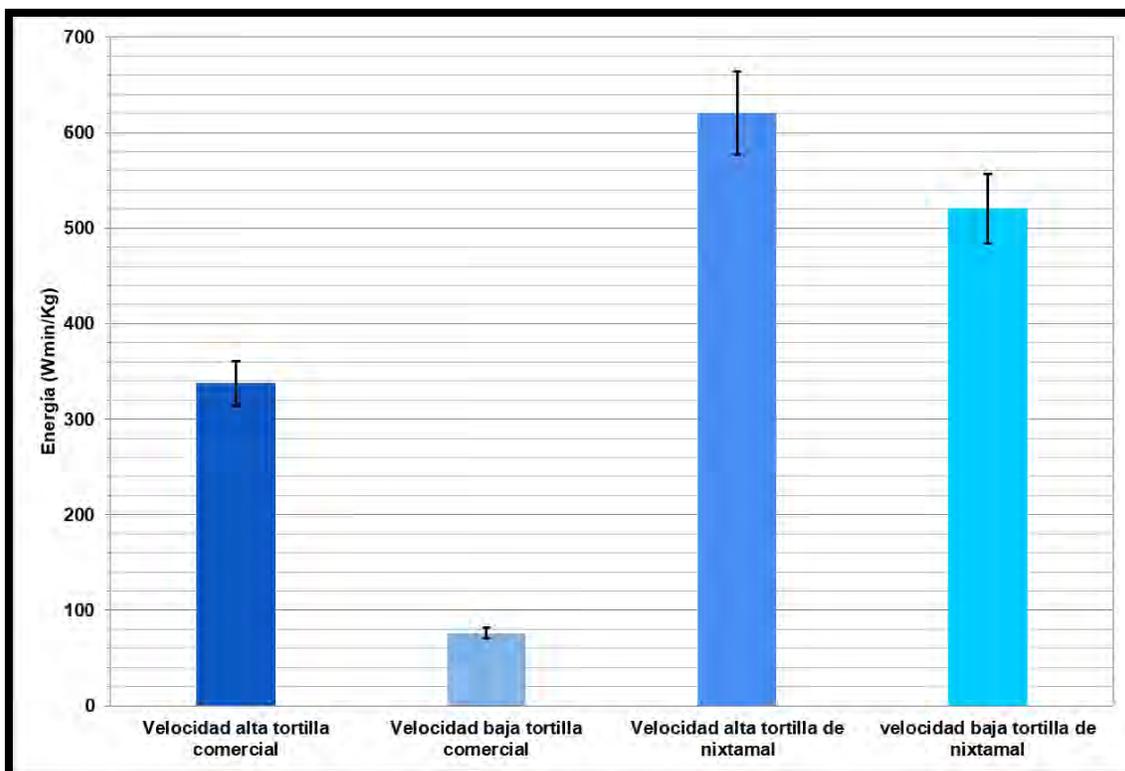
**Figura 3.5. Gráfica de las interacciones para la potencia para tortilla de harina comercial y tortilla de nixtamal**

El análisis estadístico demuestra que en la molienda de ambos tipos de tortilla endurecida existió interacción con sus diferentes velocidades de alimentación, así como con la intensidad de corriente. Sin embargo no mostró interacción en la potencia consumida debido a las diferentes durezas de las tortillas, siendo que la tortilla de nixtamal endurecida presenta mayor dureza que la tortilla de harina comercial endurecida.



**3.2.1.3. Consumo de energía**

En la Figura 3.6 se presentan los resultados que fueron obtenidos para el consumo de energía de los dos tipos de tortilla endurecida y la molienda realizada con los dos niveles de variación utilizados.



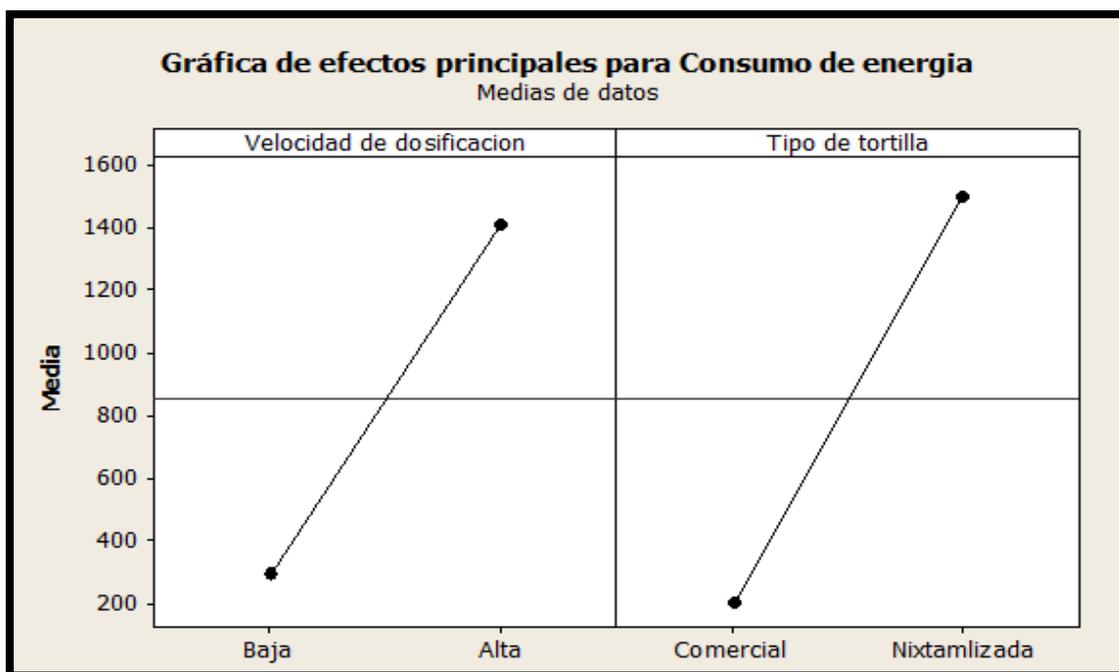
**Figura 3.6. Consumo de energía en la molienda para dos velocidades de dosificación de tortilla de nixtamal endurecida y tortilla de harina comercial endurecida**

El consumo de energía a velocidad alta de tortilla de harina comercial endurecida se mantuvo en los 337 Wmin/Kg, en tanto la velocidad baja para esta variable tuvo un menor consumo de todas las corridas manteniéndose en los 75 Wmin/Kg; la molienda de tortilla de nixtamal endurecida a velocidad de alimentación alta tuvo un consumo de energía mayor en comparación con todas las corridas (620 Wmin/Kg); la molienda realizada para este material a velocidad de alimentación



baja se mantuvo en 520 Wmin/Kg, obteniendo un consumo medio de energía. Esto se debe a que la tortilla de harina comercial endurecida presentó menor dureza en comparación con la tortilla de nixtamal endurecida, con una velocidad baja de dosificación se obtuvo un menor consumo de energía ya que es menor la cantidad de material que se encuentra junto a los martillos del equipo y es menor la energía que se requiere para realizar la molienda.

En la Figura 3.7 se muestran los efectos principales para el consumo de energía de las variables de velocidad de dosificación y el tipo de tortilla con sus correspondientes niveles de variación por separado.

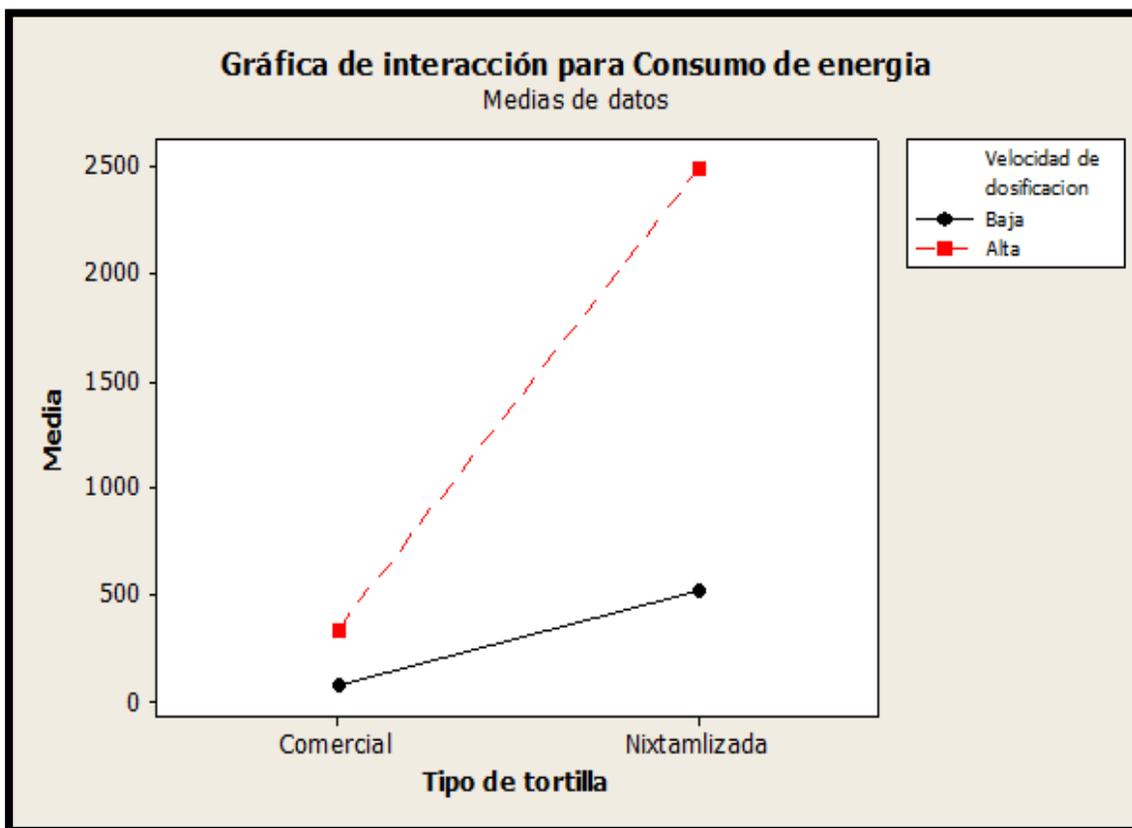


**Figura 3.7. Efectos principales para consumo de energía en función de la velocidad de dosificación y el tipo de tortilla**

Los consumos de energía, al igual que en la intensidad y la potencia presentan valores mayores en la tortilla de nixtamal endurecida y así mismo muestran efectos mayores para este tipo de material.



En la Figura 3.8 se muestran las interacciones, resultado del análisis estadístico de las variables con sus dos niveles de variación.



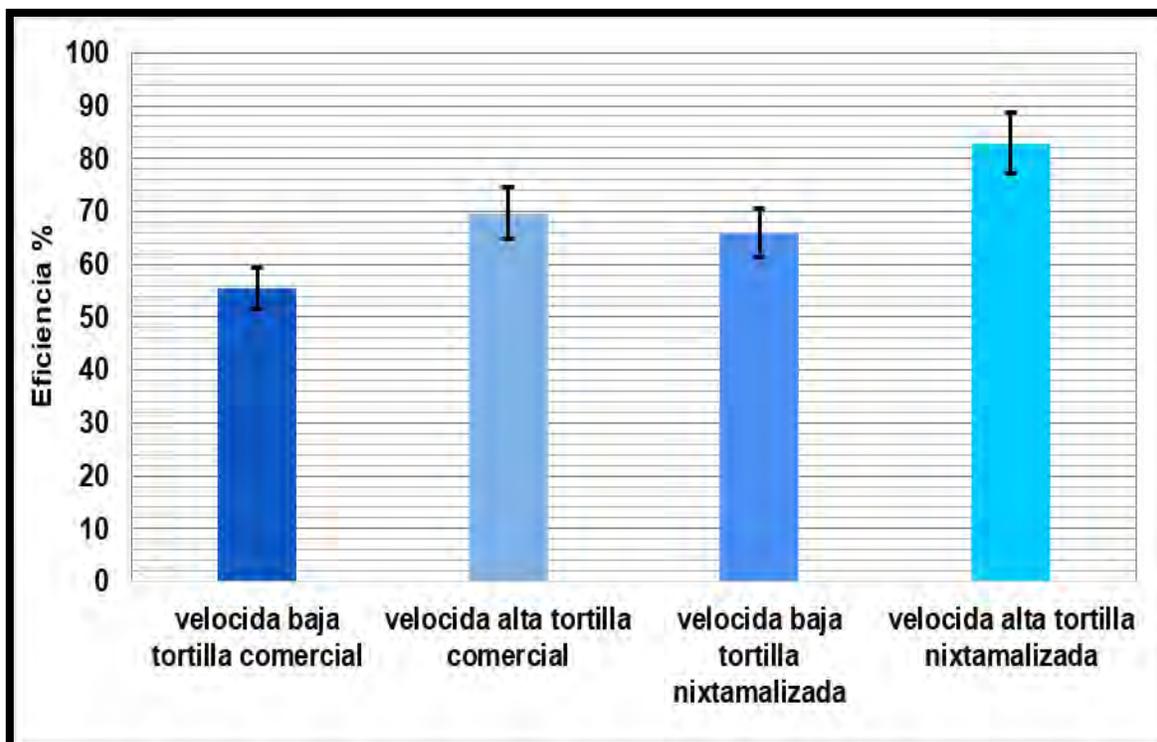
**Figura 3.8. Gráfico de las interacciones para el consumo de energía para tortilla de harina comercial y tortilla de nixtamal**

Los resultados muestran que no existe interacción entre los niveles de variación y las muestras, la tortilla de harina comercial endurecida no presentó variaciones mayores con las diferentes velocidades de dosificación. Mientras que con la tortilla de nixtamal endurecida si existió variación en las velocidades de dosificación, esto es debido a que el equipo requirió mayor tiempo para realizar la molienda de este material y por lo tanto si la velocidad de alimentación es alta el equipo se puede saturar y no funcionar correctamente.



### 3.2.1.4. Eficiencia

Para la eficiencia, en la Figura 3.9 se presentan los promedios obtenidos de la obtención de harina de maíz de almidón retrogradado a partir de ambos tipos de tortilla endurecida.

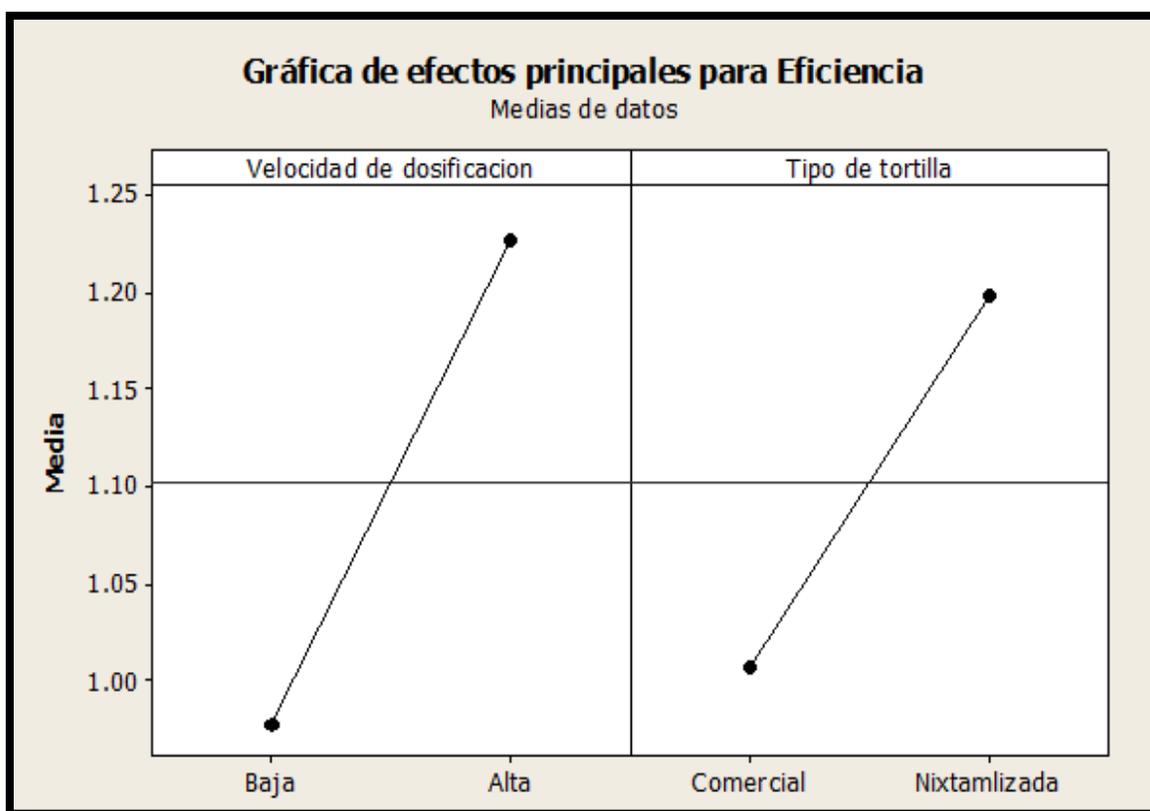


**Figura 3.9. Eficiencia en la molienda de tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial con dos diferentes velocidades de alimentación**

La molienda realizada con las velocidades altas dio como resultado una mayor eficiencia con respecto a las velocidades bajas para ambos tipos de materia prima.

Sin embargo al comparar el tipo de tortilla endurecida utilizada, la que presenta una mayor eficiencia en la molienda es la tortilla de nixtamal debido a su naturaleza, por lo que la fragmentación del material es mayor.

La Figura 3.10 muestra los efectos principales de las variables con sus respectivos niveles de variación para la eficiencia.



**Figura 3.10. Gráfica de los efectos principales para la eficiencia en función de dos velocidades de dosificación y el tipo de tortilla**

Una velocidad de dosificación alta y la tortilla de nixtamal endurecida dieron como resultado los valores más altos en la eficiencia del equipo, mientras que con la velocidad baja y la tortilla de harina comercial endurecida se obtuvieron los valores más bajos debido a la naturaleza de la tortilla de nixtamal que presenta una mayor dureza en comparación con la de la tortilla de harina comercial. Tomando en cuenta sólo las velocidades altas de dosificación se obtuvo una eficiencia mayor ya que la molienda se realizó en menor tiempo y en consecuencia el consumo de energía del equipo disminuyó.

### 3.2.2. Análisis granulométrico:

En la Tabla 3.1 se presenta el ejemplo de la tabulación de los resultados del análisis granulométrico realizado a las harinas de maíz de almidón retrogradado



obtenidas a partir de la molienda de tortillas de harina comercial endurecidas y de tortillas de nixtamal endurecidas.

**Tabla 3.1. Llenado de resultados del análisis granulométrico**

No. Tamiz	Peso de los tamices S/M (g)	Peso de los tamices C/M (g)	Malla que pasa (mm)	Malla que retiene (mm)	Dpi (mm)	Peso retenido (g)	Xi	FTR	FTP
18/25	-	-	1	0.71	1.355	0	0	0	1
25/35	383.8	398.6	0.71	0.5	0.96	14.7	0.148	0.148	0.852
35/45	351.7	377.5	0.5	0.35	0.675	25.8	0.258	0.406	0.594
45/60	345.5	371.7	0.35	0.25	0.475	26.2	0.262	0.668	0.332
60/80	343.9	360.2	0.25	0.177	0.3385	16.3	0.163	0.831	0.169
80/120	323	333.5	0.177	0.125	0.2395	10.5	0.105	0.936	0.064
120/ charola	317.7	321.5	0.125	0	0.125	3.8	0.038	0.974	0.026
Charola	318.6	321.3	-	0	0	2.7	0.027	1.001	-0.001
						<b>100</b>			

En la Figura 3.11 se observan los resultados de las diferentes corridas realizadas y la comparación de las repeticiones del análisis granulométrico que se realizó para cada una de las combinaciones de los factores que son los tipos de tortilla endurecida y sus velocidades de dosificación y se compararon con dos harinas comerciales utilizadas como control.

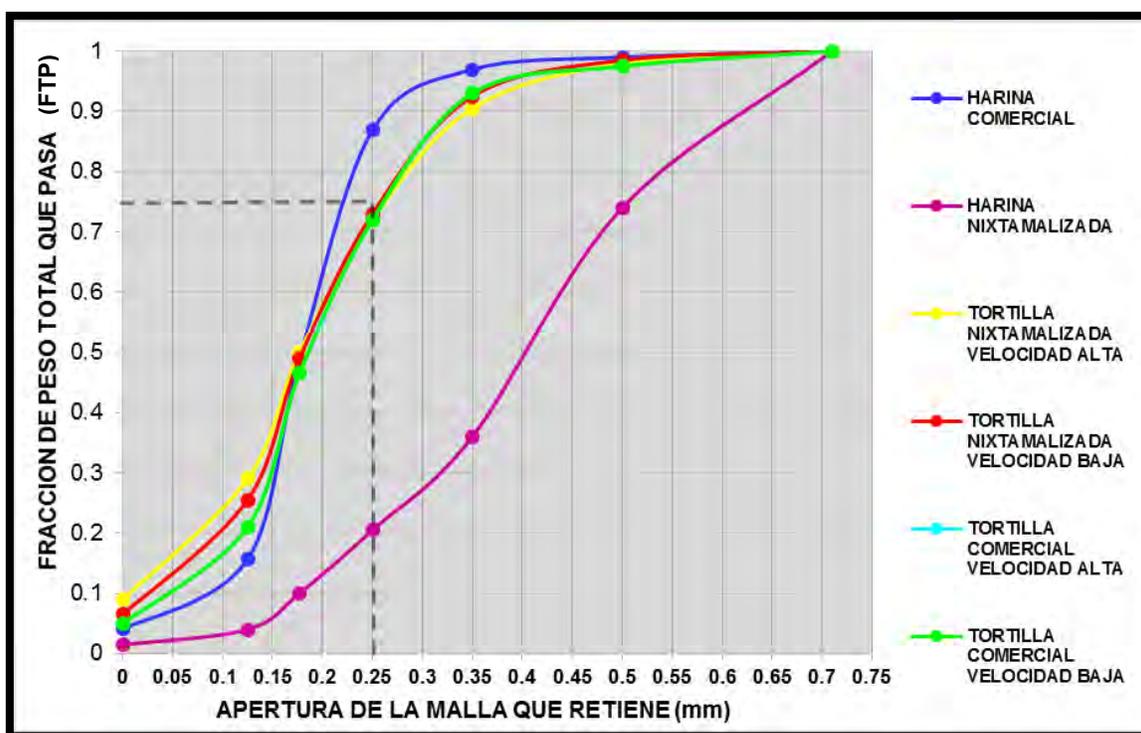


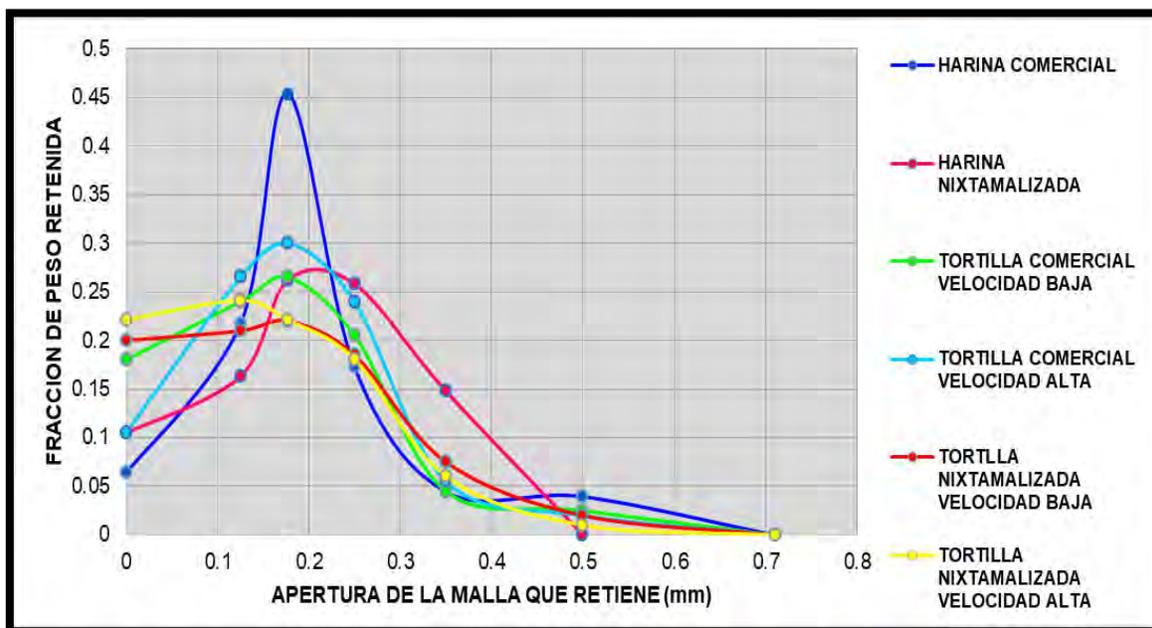
Figura 3.111. Gráfico comparativo de las fracciones de peso total que pasa por los tamices en función de la apertura de las mallas

La gráfica se obtuvo para poder encontrar los rendimientos de cada una respecto a la NMX-F-046-S-1980, donde se requiere que el 75% del material pase por una apertura de malla de 0.25 mm; la harina de nixtamal no cumplió con lo requerido ya que la molienda del material se realizó con la mayor parte de la cofia y el pericarpio, por lo que se dificulta la molienda y trae como consecuencia sólidos con mayor tamaño de partícula.

Las corridas obtenidas tienen mayor similitud con la harina comercial. Con respecto a las corridas experimentales no se logra observar de manera significativa diferencias entre las gráficas.



En la Figura 3.12 se presenta el gráfico diferencial de las fracciones de peso total de todas las harinas estudiadas.



**Figura 3.12. Gráfico diferencial de las fracciones de peso total que pasa por los tamices en función de la abertura de las mallas.**

El comportamiento de las harinas al pasar por los tamices fue muy similar a excepción de la harina comercial donde el 45% del material se retuvo en el tamiz con apertura 0.2 mm. Debido al tamaño de partícula que es mayor en la harina de nixtamal la fracción de peso retenida en los tamices es mayor desde el tamiz con apertura 0.3 mm donde se retiene 15% del material. Para las harinas obtenidas de tortillas endurecidas en las que se realizó la molienda a velocidad alta las fracciones de peso retenidas en los tamices fueron mayores y las que fueron molidas a velocidades bajas tuvieron una fracción de peso retenida menor en los tamices.



3.3. Objetivo particular 2: Perfil viscoamilográfico

La Figura 3.12 muestra el perfil de viscosidad obtenido para las harinas estudiadas.

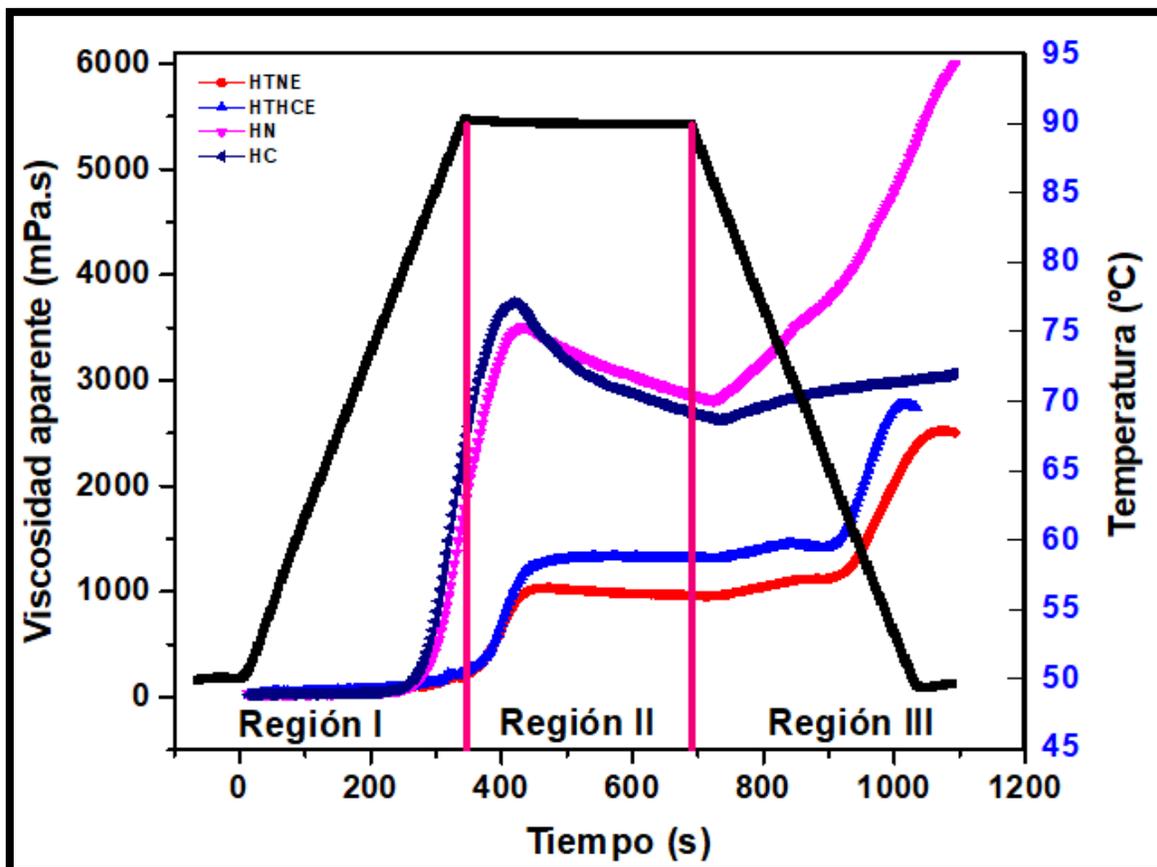


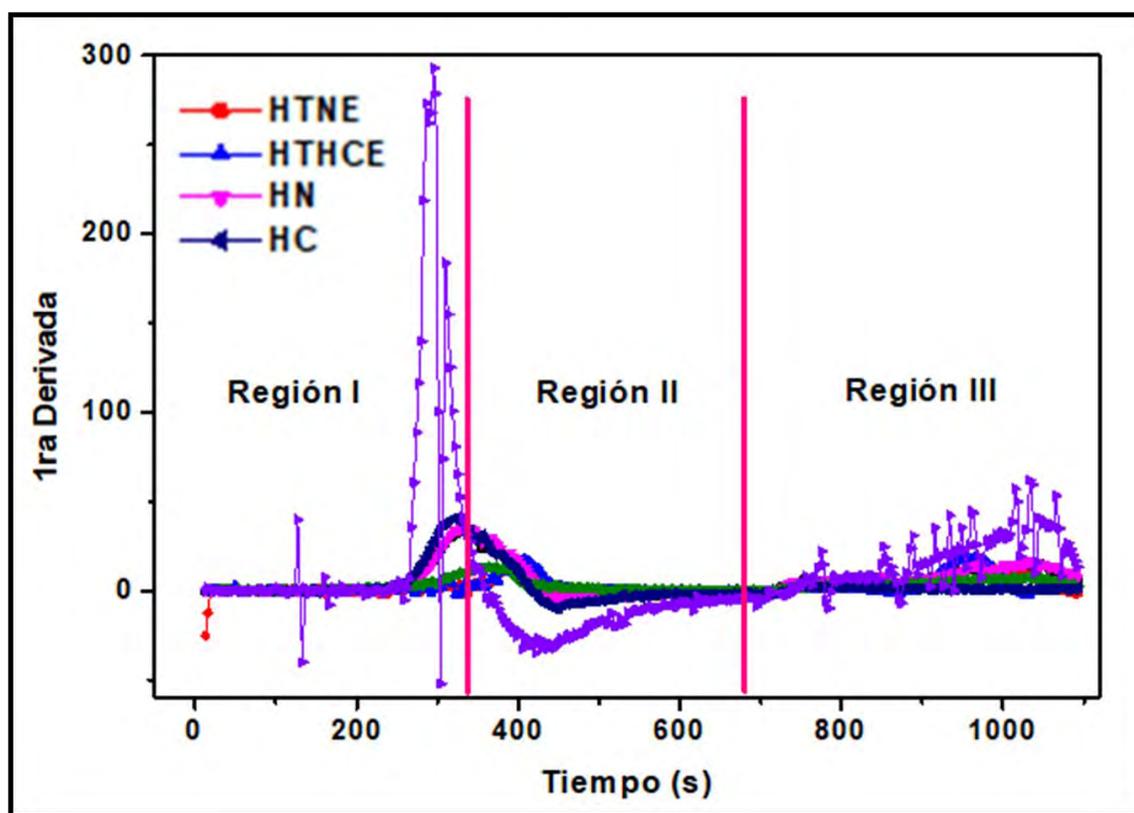
Figura 3.12. Viscosidad aparente en función del tiempo en harinas de maíz retrogradadas; HN) Harina de nixtamal, HC) Harina comercial, HTNE) Harina de tortilla de nixtamal endurecida, HTHCE) Harina de tortilla de harina comercial endurecida

El perfil de viscosidad obtenido para cada una de las harinas muestra que las harinas obtenidas de tortillas endurecidas presentan un aumento de viscosidad menor durante el calentamiento y la isoterma (Región I y II) a diferencia de las harinas de nixtamal y comercial, estas harinas presentan una disminución en la



viscosidad durante la isoterma. Sin embargo las harinas procedentes de tortilla endurecida mantienen su viscosidad que aumenta durante el enfriamiento, la diferencia en el comportamiento se debe a que el almidón de las harinas obtenidas de tortillas endurecidas ha sufrido retrogradación lo que impacta en la textura de las mismas.

La Figura 3.13. La Región I, Región II y Región III muestran los cambios en el perfil de viscosidad aparente a partir de la primera derivada.



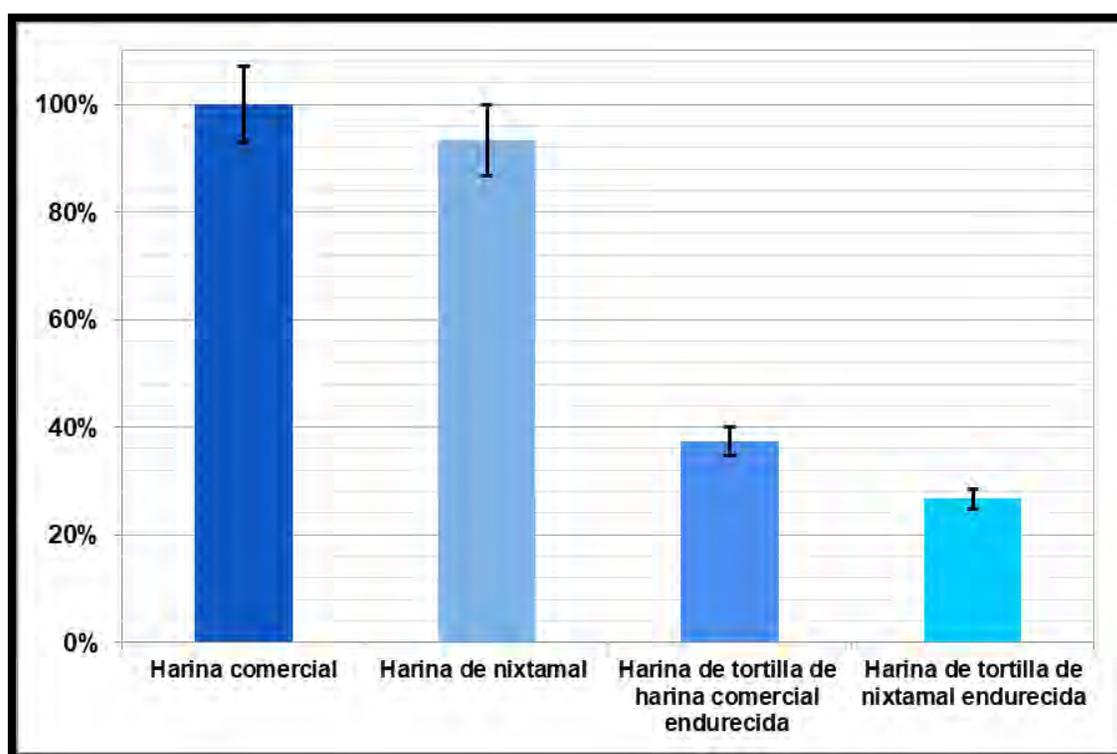
**Figura 3.13. Primera derivada del perfil de viscosidad aparente en función del tiempo**

La gráfica muestra que los principales cambios se generan en la región del calentamiento y en la parte inicial de la isoterma, en la región del enfriamiento no existen cambios significativos en ninguna de las variables. De acuerdo a lo



estudiado por Rincón-Londoño (2016) en la gráfica obtenida de la primera derivada se observa que no existe retrogradación durante el enfriamiento del perfil de viscosidad, la retrogradación sucede durante el almacenamiento de las tortillas endurecidas siendo la harina de tortilla de nixtamal endurecida la que presenta mayor retrogradación.

Finalmente al comparar los picos máximos de viscosidad obtenidos se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 3.14.



**Figura 3.14. Comparación de los picos máximos de viscosidad de harina comercial, harina de nixtamal, harina de tortilla de harina comercial endurecida y harina de tortilla de nixtamal endurecida**

En la comparación de los valores obtenidos se tomó como el 100% la harina que mostró el valor máximo en el perfil de viscosidad, siendo esta la harina comercial, la harina de tortilla de harina comercial endurecida mostró un valor 63% menor a



la harina comercial debido a la retrogradación que ha sufrido el almidón. Para la harina de nixtamal se tuvo una diferencia 73% menor al valor máximo. Mostrando que las harinas que contienen almidón retrogradado presentan una viscosidad significativamente menor. Las harinas comerciales presentan un mayor pico de viscosidad

### 3.4. Objetivo particular 3: Concentración de calcio

El análisis se basa en el contenido de calcio en toda la estructura, como el proceso térmico-alkalino es realizado en condiciones atmosféricas, es factible que existan reacciones químicas entre los componentes del medio y el grano en el nejayote. Esto significa que después de unos minutos de cocción se forman carbonatos de calcio en el pericarpio, o parte más externa del grano y durante el tiempo de reposo y en otras estructuras internas como el germen y el endospermo. La Figura 3.15 muestra el contenido de calcio total en harinas estudiadas.

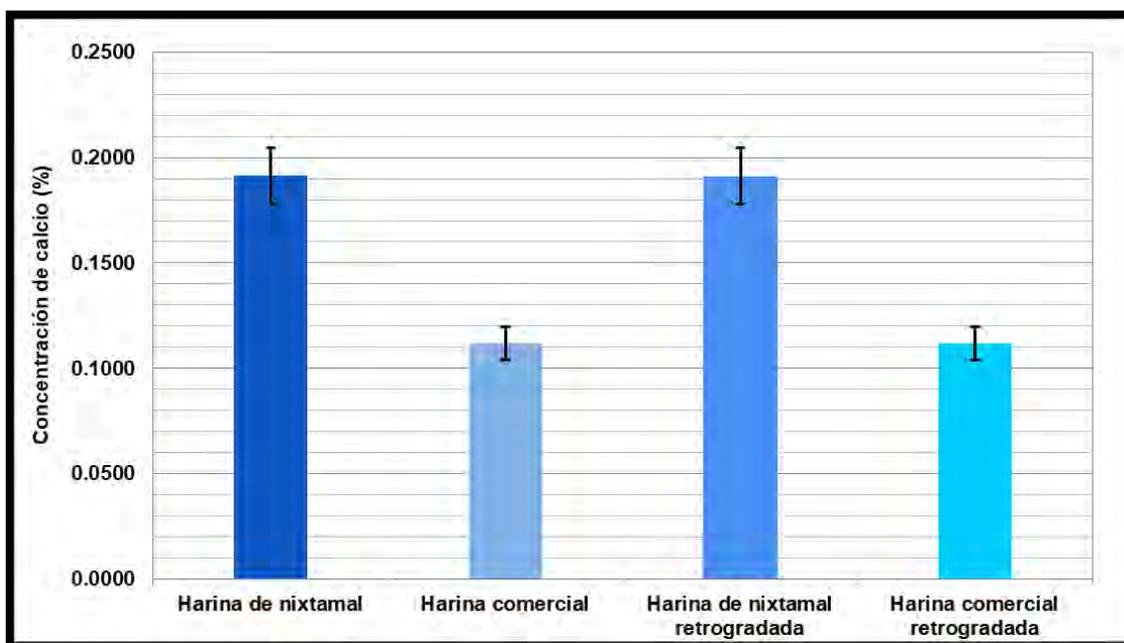


Figura 3.15. Concentración de calcio en harinas de maíz



Se observa que las muestras de las harinas obtenidas a partir de masa de nixtamal tienen un contenido de calcio promedio de 0.1912% que es mayor que las harinas de maíz nixtamalizado comerciales. Esto es debido a que el proceso tradicional de nixtamalización reporta tiempos de reposo del grano de maíz mayores a 10 horas, mientras que el proceso industrial de elaboración de harinas utiliza tiempos de reposo menores de 3 horas. El contenido de calcio no presentó cambios significativos entre las harinas de maíz de nixtamal y comercial con respecto a las harinas obtenidas de tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial (retrogradadas).

### 3.5. Objetivo particular 4: Determinación de color

Los resultados obtenidos en la determinación de color para la harina de nixtamal, harina comercial, harina de tortilla de nixtamal endurecida y harina de tortilla de harina comercial endurecida se presentan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Resultados de determinación de color de harinas de maíz.**

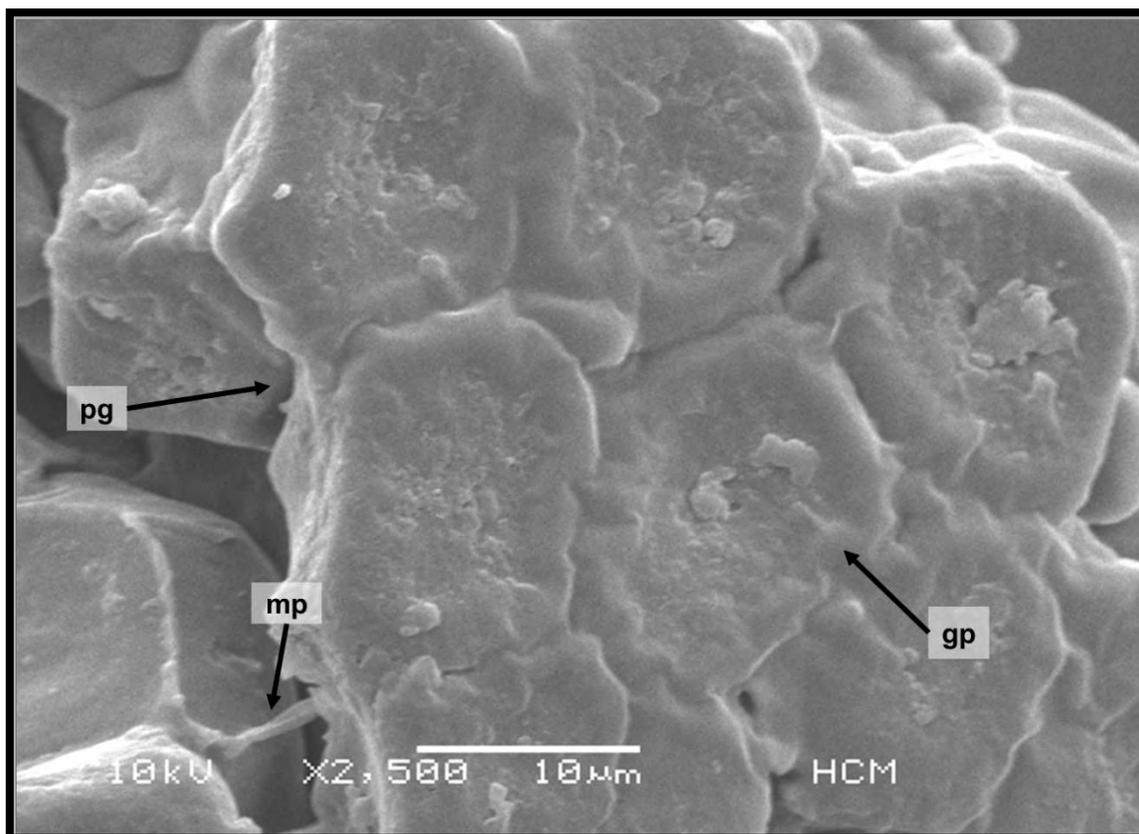
Muestra	Coordenadas de color		
	a	b	L
Masa fresca	3.92	10.93	63.49
Harina de maíz nixtamalizada comercial	-4.36	13.41	69.82
Harina de tortilla de nixtamal endurecida	-2.03	12.69	56.27
Harina de tortilla de harina comercial endurecida	2.27	17.05	57.42

La coordenada de color b indica la orientación de color de todas las harinas estudiadas hacia el amarillo, que es mayor en las harinas comerciales. La coordenada L indica la luminosidad que es menor en las harinas obtenidas de tortillas endurecidas las cuales presentaron retrogradación.



### 3.6. Objetivo particular 5: Morfología

En la Figura 3.16 se muestra la morfología de las harinas de maíz nixtamalizado comercial y de masa de nixtamal en la Figura 3.17.

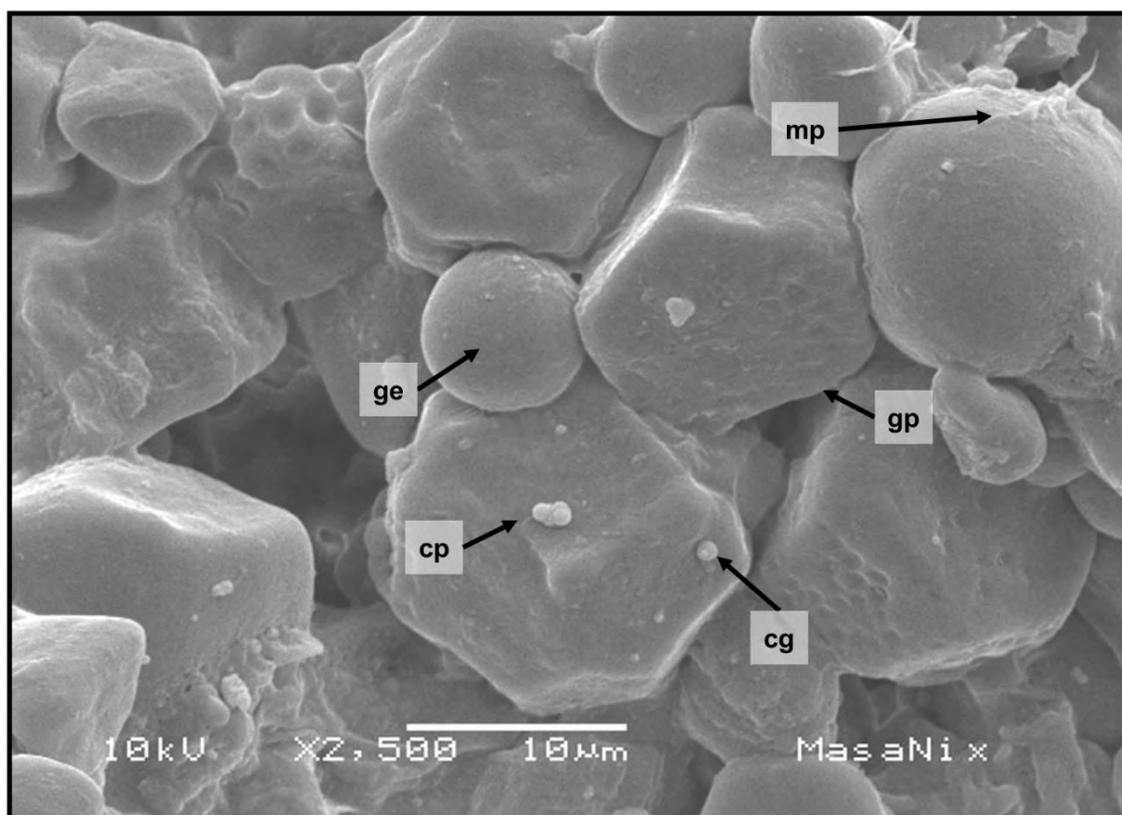


**Figura 3.16. Micrografía de harina comercial; pg) Paquetes de gránulos, gp) Grupos poliédricos, mp) Matriz proteica**

La micrografía de la harina comercial (HC), presenta un orden en el almidón, ya que sus paquetes de gránulos (pg) están unidos, además se encuentran gránulos de almidón poliédricos (gp), lo que significa que existe un orden en la morfología, debido a que no se encuentran gránulos esféricos, los cuales se localizan en la parte interna del grano. Es decir que permanecen envueltos en su matriz proteica (mp). Los gránulos de almidón presentan hinchamiento ya que sus dimensiones tienen como promedio de 10-12  $\mu\text{m}$  y los gránulos de almidón de maíz nativo son



de 3-8  $\mu\text{m}$  sin procesar. Este tipo de harina se procesa con tiempos de residencia de tres horas, incluyendo una cocción flash de 30 min y el resto de tiempo de reposo, lo cual no asegura que la difusión de la solución alcalina llegue al interior del grano, y no permita la fijación de calcio a la parte más interna del grano de acuerdo a lo reportado por Palacios-Fonseca *et al.* (2007).



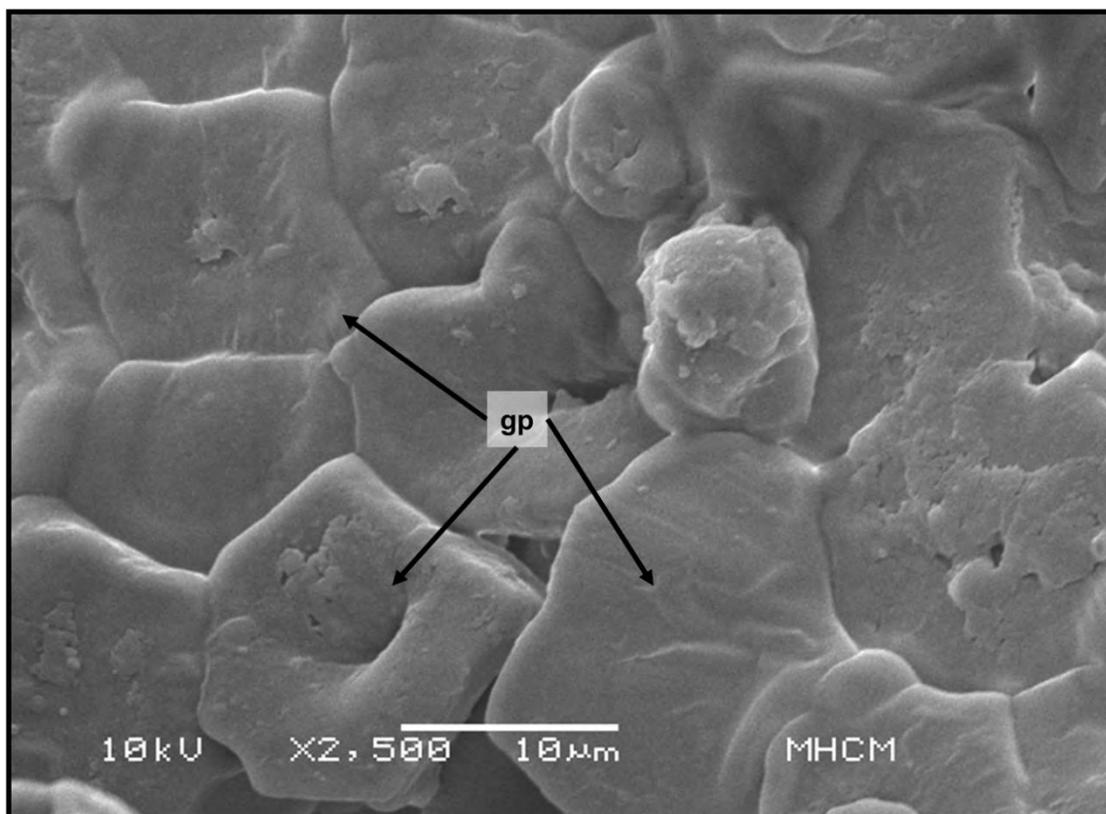
**Figura 3.17. Micrografía de harina de nixtamal; mp) Matriz proteica, ge) Gránulos de almidón esféricos, gp) Gránulos poliédricos, cp) Cuerpos proteicos, cg) Cuerpos grasos**

En la harina de nixtamal, se percibe que los gránulos de almidón fueron liberados por su matriz proteica (mp) y tienen algunas trazas, según lo reportado por Gutiérrez-Cortez *et al.* (2007), la solución alcalina ha percolado y desecho la matriz proteica. En esta Figura también se aprecia un desorden dado que los gránulos de almidón esféricos (ge) y gránulos poliédricos (gp) están mezclados de



acuerdo a lo reportado por Rojas-Molina *et al.* (2009). Además, se pueden observar cuerpos proteicos (cp) y grasos (cg) sobre los gránulos de almidón, este hecho implica desorden, ya que su lugar de residencia es el germen. Lo que quiere decir que la harina de nixtamal presenta mayor desorden en el endospermo (almidón) que la harina comercial, debido a que el proceso de nixtamalización comercial se realiza en tiempos más cortos, teniendo como consecuencia que la solución alcalina de hidróxido de calcio promueva menores cambios fisicoquímicos a las estructuras de maíz, los cuales se vieron reflejados en las micrografías obtenidas a la misma magnificación.

La morfología de las harinas de tortilla de harina comercial endurecida se muestra en la Figura 3.18.

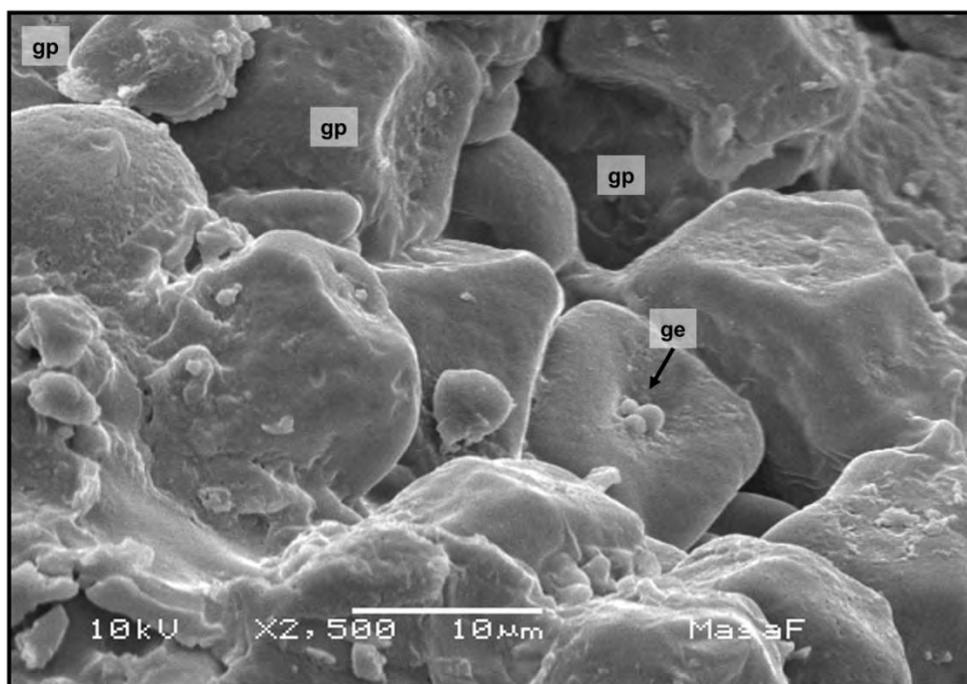


**Figura 3.18. Micrografía de harina de tortilla de harina comercial endurecida; gp) Gránulos poliédricos**



La harina de tortilla de harina comercial endurecida presenta gránulos de almidón poliédricos de tamaños mayores a  $10\ \mu\text{m}$ , es decir, que tiene un mayor tamaño en comparación con la harina comercial sin retrogradar, los gránulos de almidón siguen adheridos con cierto orden y aunque no hay presencia de la matriz proteica, ni de gránulos esféricos, estos cambios probablemente se deben al efecto del doble tratamiento térmico, es evidente que aun cuando se muestra el paquete de gránulos de almidón, presentan cambios en tamaño y se embeben unos con otros por la gelatinización que se presenta en el cocimiento de la tortilla.

En la Figura 3.19 se muestra la micrografía de la harina tortilla de nixtamal endurecida.



**Figura 3.19. Micrografía de harina de tortilla de nixtamal endurecida; gp) Gránulos poliédricos, ge) Gránulos esféricos**

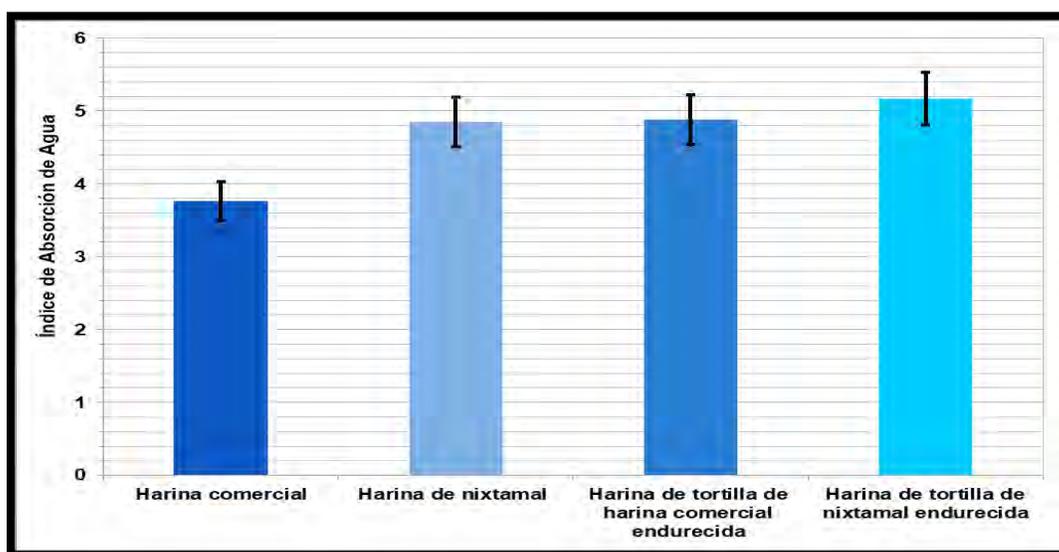
En este tipo de harina se perciben los gránulos de almidón libres y apenas se observa trazas de matriz proteica sobre algunos gránulos de almidón, de acuerdo



a lo reportado por Gutiérrez-Cortez *et al.* (2007), la solución alcalina ha percolado y desecho a la matriz proteica. En esta Figura también se aprecia un desorden dado que los gránulos de almidón esféricos (ge) y gránulos poliédricos (gp) están mezclados tal como lo reporta Rojas-Molina *et al.* (2009). El tamaño de los gránulos de almidón es variable y hay gránulos de dimensiones mayores a 10  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, se pueden observar cuerpos proteicos y cuerpos grasos sobre los gránulos de almidón, lo que significa que existe desorden, ya que su lugar de residencia es el germen.

**3.7. Objetivo particular 6: índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua**

En las Figuras 3.20 y 3.21 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas de índice de absorción de agua e índice de solubilidad realizado en los cuatro tipos de harina de maíz estudiadas.

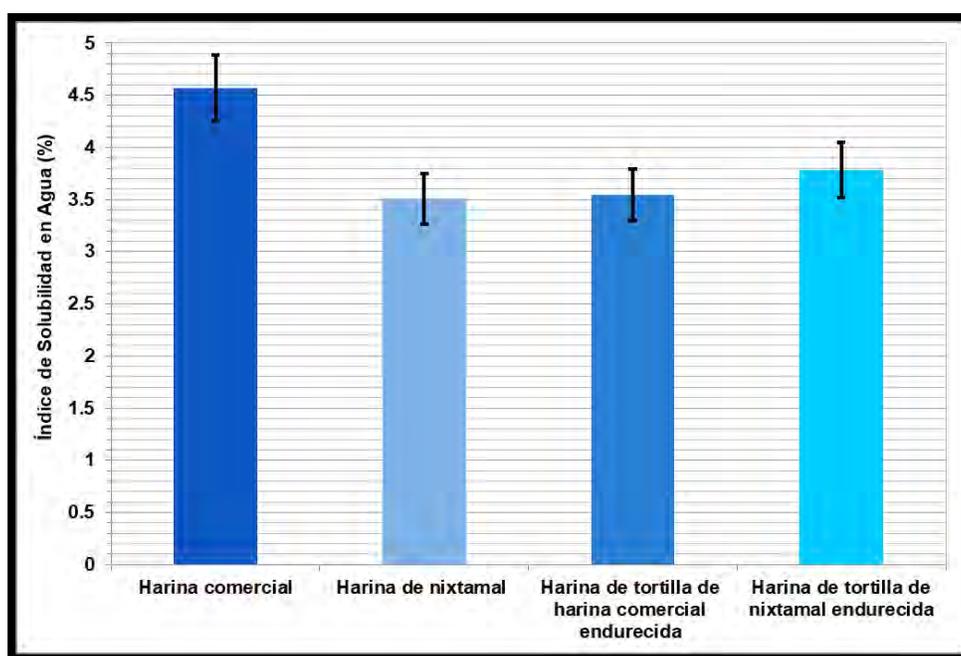


**Figura 3.20. Gráfica de índice de absorción de agua en función del tipo de harina**

En cuanto al índice de absorción de agua se observó que las harinas obtenidas de nixtamal (4.85 para harina de nixtamal y 5.16 para harina de tortilla de nixtamal



endurecida) presentaron una mayor capacidad de absorción de agua, es decir que el almidón que contienen requiere de mayor cantidad de agua para la formación del gel. Sin embargo las harinas de tortilla de nixtamal endurecida y de tortilla de harina comercial endurecida mostraron una mayor capacidad de absorción de agua, teniendo un índice de 5.16 y 4.87 respectivamente debido a que la estructura de su almidón ha sido modificada y la cantidad de agua absorbida requerida para formar el gel es mayor.



**Figura 3.21. Índice de solubilidad en agua en función del tipo de harina**

En la figura anterior se observa que la harina comercial presenta una mayor capacidad de absorción de agua (4.56%), los sólidos presentes en este tipo de harina son más solubles en agua debido a la presencia de aditivos que los presentes en las harinas de nixtamal (3.57%). De igual manera sucede para las harinas que se obtuvieron de tortillas endurecidas tienen menor solubilidad en agua, teniendo un comportamiento similar con las harinas de nixtamal y comerciales.



### CONCLUSIONES

- La molienda de tortillas endurecidas, mostró que la dureza que presentan las tortillas de nixtamal es mayor para las tortillas de harina comercial. Por lo tanto, la potencia, la intensidad de corriente y el tiempo que se requiere para la obtención de harinas son mayores. Los resultados de eficiencia del equipo mostraron que la molienda en tortillas endurecidas de nixtamal es mayor debido a la fragmentación del material. La velocidad alta durante la molienda disminuyó el tiempo de residencia en el molino en consecuencia el consumo de energía.
- De acuerdo a la NMX-F-046-S-1980 la harina de nixtamal no cumple con lo requerido, debido a que el 60% no pasa por la malla 60, debido a que la molienda se realiza con el grano entero (cofia y pericarpio), obteniendo partículas de mayor tamaño; a diferencia de la harina comercial donde el porcentaje que pasa por la malla 60, es mayor 0.25% de lo requerido. Las harinas obtenidas de tortillas endurecidas sí cumplieron con la norma, todas las corridas realizadas para este tipo de harina mostraron mayor similitud con la granulometría de la harina comercial.
- Las harinas de tortillas endurecidas mostraron una disminución en el pico máximo de viscosidad, debido a la retrogradación que presentó el almidón. La harina comercial mostró el pico máximo de viscosidad de 3600 mPa.s; la harina de nixtamal con 3500 mPa.s; la harina de tortilla comercial endurecida mostró un valor 1500 mPa.s. La tortilla de harina de nixtamal endurecida presentó el pico de viscosidad 1000 mPa.s.
- Las harinas obtenidas a partir de masa de nixtamal tienen un contenido de calcio 0.8% mayor que las harinas de maíz nixtamalizado comerciales, debido a que el proceso de nixtamalización tiene tiempos de reposo mayores a 10 horas. El contenido de calcio no presentó cambios significativos entre las harinas de maíz de nixtamal y comercial con respecto a las harinas obtenidas de tortillas endurecidas de nixtamal y de harina comercial (retrogradadas).
- Las harinas presentaron una orientación hacia el color amarillo, las harinas comerciales presentan un color más intenso, mientras que las harinas



tradicionales son más claras. Las harinas obtenidas de tortillas endurecidas presentaron una menor luminosidad en comparación con las recién elaboradas, es decir su coloración es menor a las harinas de nixtamal y comercial, en la harina de tortilla comercial endurecida el color fue más amarillo y con mayor luminosidad en comparación con la harina de tortilla de nixtamal endurecida.

- Los cambios más significativos se encontraron en el tamaño de los gránulos de almidón siendo mayor a 10  $\mu\text{m}$ , seguido del desprendimiento de la matriz proteica de los gránulos y cuerpos grasos que se localizan por todas partes, debido al doble tratamiento térmico que promueve el rompimiento de la matriz que embebe a cada componente.
- Las harinas obtenidas de nixtamal presentaron una mayor capacidad de absorción de agua que la harina comercial, es decir que el almidón que contienen requiere de mayor cantidad de agua para la formación del gel.
- Las harinas de tortilla de nixtamal endurecida y de tortilla de harina comercial endurecida mostraron una mayor capacidad de absorción de agua, teniendo un índice de 5.16 y 4.87 respectivamente debido a que la estructura de su almidón ha sido modificada y la cantidad de agua absorbida requerida para formar el gel es mayor. Las harinas que se obtuvieron de tortillas endurecidas tienen menor solubilidad en agua, teniendo un comportamiento similar con las harinas de nixtamal y comerciales.

## RECOMENDACIONES

Las harinas de maíz con almidón retrogradado pueden producirse como alternativa para la producción de derivados de maíz con un bajo costo además de servir para aprovechar las tortillas que endurecen rápidamente, este tipo de productos tienen un bajo índice glucémico lo que los convierte en productos saludables. Sin embargo la molienda de tortillas de nixtamal requiere mayor energía y tiempo para producir la harina y obtener un tamaño de partícula conforme a lo requerido en la NMX-F-046-S-1980, además por las características de textura que se obtienen en las harinas retrogradadas, se requiere de la adición de aditivos para obtener un producto agradable al consumidor.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida-Domínguez, H. D., Cepeda, M., Rooney, L. W. (1996). Properties of commercial nixtamalized corn flours. American association of cereal chemists, inc. 41(7): 624-630.
- Anderson, RA. (1982). Water absorption and solubility and amylograph characteristics of roll-cooked small grain products. Cereal Chem 59: 265–269.
- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis, 17th Ed. Methods 955.01 and 965.17, 968.08. The Association: Gaithersburg, MD.
- Arenas, A.J., (1999). Microscopía electrónica de barrido de bajo vacío. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). UNAM, México. pp. 13–35.
- Bello-Pérez, L. A.; Osorio, D. 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.
- Blago, R. (1994). CONTROL DE CALIDAD DE INSUMOS Y DIETAS ACUICOLAS. Food and Agriculture Organization of the United Nation. <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S04.htm>
- Bressani, R., and Billeb, A. C. (2001). Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. Arch. Lat. Nut. 51:86.
- Bressani, R., Benavidez, B. Acevedo, E. y Ortíz, M. A. (1990). Changes in selected nutrient content and protein quality of corn masa and quality protein maize during rural tortilla preparation. Cereal Chemistry, 67; 515- 518.
- Bressani, R., Rooney, L. W., and Serna, S. O. (1997). Nutritional quality of nixtamalized corn masa flour. Achievement though fortification with micronutrients. Fortification of Corn Masa Flour with Iron and/or Other Nutrients- A Literature and Industry Experience Review. Pages 120-150.
- Bressani, R., Turcios, J. C., Reyes, L., Mérida, R. (2001). Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 51; 309-313.
- Campas Baypoli, O. N., Rosas Burgosa, E. C., Torres Chávez, P. I., Ramírez Wonga, B. y Serna Saldívar S. O. (2002). Physicochemical Changes of Starch



in Maize Tortillas During Storage at Room and Refrigeration Temperatures. *Starch/Stärke* 54: 358–363.

Campas Baypoli, O. N., Rosas-Burgos E. C., Torres Chávez, P. I., Ramírez Wong, B., Serna-Saldívar, S. O. (1999). Physicochemical Changes of Starch During Maize Tortilla Production. *Starch/Stärke*. 51; 173–177.

Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2014). Consumo, distribución y producción de alimentos: el caso del complejo maíz-tortilla.

Chang L., Hernández U., Bencomo E., Falco S., Tarrau A. and Troya Y. (2003). Empleo de atmosfera modificada en la conservación de la tortilla de maíz. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. 13.2.

CIMAV, (2016), Microscopía electrónica de barrido, <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>, consultado el: 17 de Junio,2016

Cortazar, L., Meléndez, R. y Oliver, D.M. (2008). Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) y pimienta negra (*Piper nigrum* L). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 7: 123-130.

Cruz-Huerta and Verdalet-Guzmán, 2007 elaboración de tortilla

Domínguez et al. (1996) Distribución de tamaño

Excelsior, (2014), Estadísticas de consume de tortilla, <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2014/09/19/982604>., consultado el 19 de abril, 2017.9

Departamento de Agricultura, FAO. (1993). El maíz en la nutrición humana. Alimentación y nutrición. Roma. No. 25. Consultado el 7 de abril de 2017. <http://www.fao.org/docrep/t0395s/T0395S08.html>.

Departamento de Agricultura, FAO. (1994). Apoyo a las actividades regionales de acuicultura en America Latina y el Caribe. México. Consultado el 10 de Octubre de 2017. <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S00.htm#pub>



- FAOSTAT. (2009). Food Supply. Crops Primary Equivalent. Data Base. Consultado el 7 de mayo de 2013. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD> (Mayo 2013).
- Fenemma, Owen R., (2000), Química de los Alimentos, Acribia, 2ª ed., España, p. 1166.
- Fernández-Muñoz J. L, Rodríguez, M. E., Pless, R. C., Martínez-Flores, H. E., Leal, M., Martínez, J. L. Baños, L. (2002). Changes in nixtamalized corn flours dependent postcooking Steeping time. *Cereal Chemistry*. 79(1): 162-166.
- Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Ríos, E. (2002). Characterization of commercial nixtamalized maize flours. *Agrociencia*. 36: 557-567.
- García-Urigüen P., (2012), La Alimentación de los Mexicanos. Cambios Sociales y Económicos, y su Impacto en los Hábitos Alimenticios. Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA) D.F., México. 162 p.
- Gómez, M. H., McDonough, C. M., Rooney, L. W., and Waniska, R. D. (1989). Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *J. Food Science*. 54: 330-336.
- Gómez-Aldapa, C. A., Martínez-Bustos, F. Figueroa-Cárdenas, J. D., Ordorica-Falomir, C. A., and González-Hernández, J. (1996). Cambios en algunos componentes químicos y nutricionales durante la preparación de tortillas de maíz elaboradas con harinas instantáneas obtenidas por extrusión continua. *Arch. Latinoam. Nutr.* 46:315-316.
- Gutiérrez-Cortez E., Rojas Molina, J., Pons Hernández H., Guzmán, B., Aguas, Angel, J., Arenas, P., Fernández, A., Palacios Fonseca, G. y Rodríguez, M. E. (2007). Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. *Cereal Chemistry*. 84; 186-194.
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28, 718–726. doi:10.1590/S0101-20612008000300031



- Islas Hernández, J. J., Rendón Villalobos, R., Agama Acevedo, E., Gutiérrez Meraza F., Tovar, J., Arámbula Villa, G. y Bello Pérez L. A. (2006). In vitro digestion rate and resistant starch content of tortillas stored at two different temperatures. *LWT*. 39: 947–951. Doi: 10.1016/j.lwt.2005.06.010.
- Kawas, M.L. y Moreira, R.G. (2001). Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering*, 47, 97-107.
- Kerr W.L., Ward C.D.W., McWatters K.H., Resurreccion V.A.. (2000). Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour. *Cereal Chemistry*, 77, pp. 213-219.
- Kite F.E, Maywald E.C, Schoch T.J. (1963). Functional properties of food starches *Starke*, 15, pp. 131-138
- Konica Minolta, (2014), Entendiendo el espacio de color Cielab. <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/> Consultado el 24/05/17.
- Lindeboom, N.; Chang, P. R. and Tyler, R. T. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Starke*. 56:89-99.
- Lorenzo, M., Reyes, A., Blanco, I., Vasallo, M. (2010). Determinación de Ca, Cu, Fe y Pb por espectrofotometría de absorción atómica en aguardientes de caña. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Pp. 3-6.
- Mariscal Moreno, R. M., Figueroa, J.D.C., Santiago Ramos, D., Arámbula Villa G., Jiménez Sandoval, S., Rayas-Duarte, P., Veles Medina, J.J. y Martínez Flores H. E. (2015). The effect of different nixtamalization processes on some physicochemical properties, nutritional composition and glycemic index. *Journal of Cereal Science*. 65: 140-146. Doi: 10.1016/j.jcs.2015.06.016.
- Méndez Montealvo Guadalupe, García Suárez Francisco J., Paredes López Octavio, Bello Pérez Luis A. (2007). Effect of Nixtamalization on Morphological and Rheological Characteristics of Maize Starch. *Journal of Cereal Science*. Doi: doi:10.1016/j.jcs.2007.10.007



- Moreira R. G., Xiuzhi Sun Youhong Chen, (1997). Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 31: 485-498.
- Muñoz, Miriam. (2014). *Tablas de uso práctico de los alimentos de mayor consumo*. Mc Graw Hill. México. 3ª ed. Pp. 33.
- NMX-187-SSA1/SCFI-2002 y NMX-046-S-1980 Norma Mexicana de Maíz Nixtamalizado Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
- NMX-F-046-S-1980, Harina De Maíz Nixtamalizado Norma Mexicana. Dirección General De Normas.
- NMX-FF-034/1-SCFI-2002, Productos No Industrializados Para Consumo Humano- Cereales- Parte I: Maíz Blanco Para Proceso Alcalino Para Tortillas De Maíz Y Productos De Maíz Nixtamalizado- Especificaciones Y Métodos De Prueba.
- NOM-187-SSA1-2002. Productos y Servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. Información comercial. Métodos de prueba.
- Palacios-Fonseca, A. J., Vázquez-Ramos, C., Rodríguez-García, M. E. (2009). Physicochemical Characterizing of industrial and tradicional nixtamalized corn flours. *Journal of food Engineering*. 93, 45-51.
- Paredes-López, O., Serna-Saldívar, S. O., and Guzmán-Maldonado, S. H. (2000). La nixtamalización y la producción de tortilla. in: *Los Alimentos Mágicos de las Culturas Indígenas de México-El Caso de la Tortilla*. El Colegio de Sinaloa: Culiacán, Sinaloa, México, Pages 22-33.
- Pena, Antonio. (2004). *Bioquímica*. Editorial Limusa. 2ª Edición. México. 144-146.
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L. W., and Waniska, R. D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chem*. 65:127-132.
- Rendón Villalobos R., Agama Acevedo E., Islas-Hernández J.J., Sánchez Muñoz J.y Bello-Pérez L.A. (2005). In vitro starch bioavailability of corn tortillas with hydrocolloids. *Food Chemistry*. 97: 631–636. Doi:10.1016/j.foodchem.2005.04.026.



- Rincón Londoño N., Vega Rojas L., Contreras Padilla M., Acosta Osorio A. A., Rodríguez García M. E. (2016). Analysis of the pasting profile in corn starch: structural, morphological and thermal transformations Part I. *international Journal of Biological Macromolecules*. Elsevier. 91: 106-114.
- Rincón Londoño Natalia. (2013). *Obtención y Caracterización de Almidón Aislado y Modificado a Partir de Arracacha Blanda (Arracacia xanthorrhiza Bancroft)*. Universidad del Quindío. Armenia-Quindío.
- Rojas Molina Isela, Gutiérrez Cortés Elsa, Palacios Fonseca Alin, Baños Leticia, Pons Hernández J. L., Guzmán Maldonado S. H., Pineda Gómez P. y Rodríguez M. E. (2007). Study of Structural Thermal Changes in Endosperm of Quality Protein Maize During Traditional Nixtamalization Process. *Cereal Chemistry*. 84: 304-312. Doi: 10.1094/CCHEM-84-4-0304.
- Rojas Molina Isela, Gutiérrez E., Cortés Acevedo M. E., Falcón A., Bressani R., Rojas A., Ibarra C., Pons Hernández J. L., Guzmán Maldonado S. H., Cornejo Villegas A. y Rodríguez M. E. (2008). Analysis of Quality Protein Changes in Nixtamalized QPM Flours as a Function of the Steeping Time. *Cereal Chemistry*. 85: 409-416. Doi: 10.1094/CCHEM-85-3-0409.
- Sahai, D.; Buendia, M. O. y Jackson, D. S. (2001) Analytical techniques for understanding nixtamalized corn flour: Particle size and functionality relationships in masa flour sample. *Cereal Chemistry*, 78 (1):14-18.
- Salinas, M. Y., Arcelano, J, L. Martínez, F.(1992). Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíz híbrido procesados para valles altos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 42, 161- 167.
- Secretaría de Economía, Dirección General de Industrias Básicas. (2012). *Análisis De La Cadena De Valor Maíz-Tortilla: Situación Actual Y Factores De Competencia Local*.
- Serna-Saldívar S O, C A Amaya-Guerra, (2008), El papel de la tortilla nixtamalizada en la nutrición y la alimentación. *Nixtamalización del Maíz a la Tortilla. Aspectos Nutrimientales y Toxicológicos*. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.e pp: 105-151.



Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA. (2016). Atlas Agroalimentario.102-103.

Sosa-Morales y Vélez-Ruiz, (2009), Estudio del Efecto Combinado del Secado y Freido en las Propiedades de Tortillas Tostadas, Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas, Puebla, 22: 56-67.

TESIS Plata León, María Rebeca. (2016). Comparación de molienda tradicional y criomolienda de canela a partir del consumo de potencia, distribución de tamaños, color y pérdida de componentes volátiles. UNAM.

Trejo González, A., Feria Morales, A. y Wild Altamirano C. (1982). The roll of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. American Chemical Society. 198; p. 245- 263.

Zeki Berk, (2009), Food Process Engineering and Technology, Elsevier, Department of Biotechnology and Food Engineering Israel Institute of Technology, 605.