

**Universidad Autónoma de Querétaro**  
Facultad de Química  
Programa de Posgrado en Alimentos del Centro de la  
República (PROPAC)

**“Efecto de las condiciones de procesamiento en la calidad nixtamalera, química y nutracéutica de harinas nixtamalizadas por un proceso de calentamiento óhmico continuo”.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Presenta:**

Ing. Jorge Rangel Hernández

**Dirigido por:**

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Santiago de Querétaro, Qro. Noviembre, 2017.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**“Efecto de las condiciones de procesamiento en la calidad  
nixtamalera, química y nutracéutica de harinas nixtamalizadas por  
un proceso de calentamiento óhmico continuo”.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Presenta:**

Ing. Jorge Rangel Hernández

**Dirigido por:**

Dra. Marcela Gaytán Martínez

**SINODALES:**

Dra. Marcela Gaytán Martínez  
Presidente


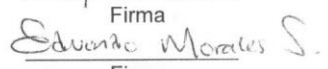
Dr. Eduardo Morales Sánchez  
Secretario


Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas  
Vocal

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Suplente

Dra. Rocío Campos Vega  
Suplente

  
M.S.P. Sergio Pacheco Hernández  
Director de la Facultad de Química

  
Firma  
  
Firma  
  
Firma  
  
Firma  
  
Firma

  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre, 2017

## RESUMEN

En México, el maíz se consume principalmente en productos derivados de la nixtamalización, el principal, la tortilla. La nixtamalización tradicional se usa para producir harinas instantáneas y tortillas, hoy en día tiene modificaciones para su uso a nivel industrial. El calentamiento óhmico puede ser una tecnología alternativa para la producción de harinas nixtamalizadas. Este consiste en el paso de corriente a través de un material que ofrece cierta resistencia, el cual genera un calentamiento uniforme. El proceso es amigable con el ambiente ya que no genera efluentes contaminantes, utiliza el maíz de manera integral, es energéticamente eficiente y tiempos cortos de proceso, lo que representa una ventaja sobre el proceso tradicional.

El objetivo del proyecto fue producir harinas nixtamalizadas por medio de un cocedor óhmico continuo y evaluar el efecto de las condiciones de procesamiento en la calidad nixtamalera, química y nutracéutica. Se utilizó un cocedor óhmico por lote para establecer las condiciones de proceso y poder trasladarlas a un cocedor óhmico continuo. Las variables independientes a evaluar fueron: temperatura (85 ó 90°C), voltaje (120 ó 130V) y tiempo después de alcanzar la temperatura (0, 5 ó 10 min). La molienda de maíz se hizo en un molino Nixtamatic con un tamaño de partícula de 1410  $\mu\text{m}$  predominante, cal a 0.3 % y humedad de 55 %. Harina de nixtamal y comercial fueron usadas como controles. El porcentaje de gelatinización no mostró diferencias significativas, sin embargo, en la evaluación de color no cumplieron con los estándares. Con estos resultados se determinaron las condiciones adecuadas para el calentamiento óhmico continuo. Se eligió un voltaje de 120 V y una velocidad de 5 y 10 rpm. Los resultados de las harinas en propiedades reológicas y térmicas fueron diferentes estadísticamente respecto a los controles; sin embargo, no tuvieron impacto en las propiedades de textura de masa y tortilla ya que fueron similares a los controles, además de presentar mayor rendimiento de masa y tortilla. El color de las tortillas y su rolabilidad fueron al control de harina de nixtamal; en tanto que en tensión y corte fue similar al control de harina comercial, sin embargo, las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico presentaron mayor rendimiento y menor retrogradación respecto a los controles. En la evaluación química y nutracéutica, el calentamiento óhmico preserva el contenido de proteínas, aminoácidos, así como compuestos fenólicos, además de presentar un mayor contenido de fibra dietética total. Se concluye que el calentamiento óhmico continuo es una tecnología alternativa para la producción de harinas nixtamalizadas instantáneas, con características similares al proceso tradicional.

**Palabras clave:** Harinas de maíz nixtamalizadas; calentamiento óhmico continuo; maíz (*Zea mays* L.)

## ABSTRACT

In Mexico, maize is consumed mainly as nixtamalized corn products, especially tortilla. Traditional corn nixtamalization is used to produce instant flours and tortillas; actually, this process has been modified to be used industrially. Ohmic heating may be an alternative technology to produce nixtamalized corn flours. This process is based on the passage of an electrical current through a material, which is used as an electrical resistance; as a result, the material is heated homogeneously. It is environmentally friendly, it does not produce contaminant effluents, and it is energetically efficient and requires short processing time, representing an advantage over the traditional process.

The objective of the project was to produce nixtamalized corn flour by means of a continuous ohmic cooker and to assess the effect of processing on the quality (textural, chemistry and nutraceutical) characteristics of corn flour and tortilla. An ohmic device batch was used to establish the process conditions and to transfer them to a continuous ohmic cooker. The independent variables were: temperature (85 or 90°C), voltage (120 or 130V) and time after reaching the maximum temperature (0, 5, or 10 min). Corn milling was done in a Nixtamatic mill with a particle size of 1410  $\mu\text{m}$ , calcium hydroxide 0.3% and 55% moisture. Gelatinization degree did not show significant differences with the control treatments; however, color did not meet the standard requirements. Results were useful to select the adequate conditions to perform the continuous ohmic heating. So, selected voltage was 120 V, and screw speed 5 and 10 rpm. Nixtamalized corn flour and a commercial corn flour were used as controls. Rheological and thermal characteristics of corn flours showed significant differences with control treatments; however, textural characteristics of masa did not differ from the controls ( $p \leq 0.05$ ) and showed a larger yield. Tortilla color and rollability was similar to the control of corn flour; tension and cutting force were similar to commercial flour, and tortillas from ohmic heating flours presented greater performance and lower retrogradation than controls. Tortillas produced from corn flours obtained by ohmic heating preserve protein and amino acids, as well as phenolic compounds and contain a higher total dietary fiber amount. It is concluded that the continuous ohmic heating is an alternative technology for the production of instant nixtamalized corn flour with characteristics similar to the traditional process, with the advantage of being an environment friendly technology.

**Key word:** Nixtamalization corn flour, ohmic heating, corn (*Zea mays* L.)

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo incondicional en cada uno de los proyectos emprendidos.

A la Dra. Marcela Gaytán Martínez por la dirección y apoyo del proyecto y sobre todo por la gran paciencia hacia mi persona.

A mis asesores, Dr. Eduardo Sánchez Morales, Dr. Juan de Dios Figueroa C., Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca P. y la Dra. Rocío Campos Vega por todas las observaciones en mi tesis y las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto.

A Rubén, mi compañero de maestría por ayudarme en una parte muy importante de mi proyecto y por la disposición de su tiempo.

A la Dra. Ma. de la Luz Reyes Vega y la Dra. Aurea Ramírez por su ayuda técnica, orientación y motivación.

A mis compañeros de laboratorio y maestría Laura, Astrid, Memo, Cynthia, Karlita y Astrid G. por su amistad.

A CONACYT por la beca brindada durante el periodo del programa de maestría.

Al CICATA-IPN, por permitirme realizar parte del proyecto en sus instalaciones y por el apoyo en todo momento.

A CINVESTAV-QRO por permitirme realizar parte del proyecto y por todo el apoyo técnico.

A la UAQ por ser la institución que me forjó profesionalmente durante el curso del posgrado.

Al PRODEP por el apoyo económico para la realización del presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

### Contenido

RESUMEN.....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE GENERAL .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
1 INTRODUCCIÓN .....	1
2 ANTECEDENTES.....	3
2.1 Generalidades del maíz .....	3
2.2 Origen del maíz .....	3
2.3 Estructura del grano de maíz .....	3
2.4 Composición química del grano de maíz .....	5
2.5 Compuestos fitoquímicos del maíz.....	7
2.6 Productos de maíz .....	8
2.7 Proceso de nixtamalización.....	9
2.7.1 Beneficios nutricionales del proceso de nixtamalización .....	11
2.7.2 Desventajas de la nixtamalización.....	12
2.8 Procesos alternativos de nixtamalización.....	14
2.9 Tratamiento térmico por calentamiento óhmico.....	16
2.9.1 Parámetros involucrados para la generación del calentamiento óhmico.....	17
2.9.2 Ventajas del calentamiento óhmico .....	19
2.9.3 Uso del calentamiento óhmico en la industria de los alimentos .....	20
2.9.4 Calentamiento óhmico para la obtención de harinas nixtamalizadas de maíz.....	21

2.10	Parámetros de calidad funcional y química de harinas de maíz nixtamalizado que requiere la industria .....	22
3	JUSTIFICACIÓN .....	25
4	OBJETIVOS .....	25
4.1	Objetivo general .....	25
4.2	Objetivos específicos .....	25
5	MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
5.1	Materiales y equipos .....	26
5.2	Caracterización química del maíz .....	27
5.3	Obtención de harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional .....	27
5.4	Obtención de harinas nixtamalizadas usando calentamiento óhmico .....	27
5.5	Caracterización física de harinas obtenidas por proceso tradicional y calentamiento óhmico continuo .....	28
5.5.1	Distribución del tamaño de partícula .....	28
5.5.2	Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS) .....	29
5.5.3	Perfil de viscosidad.....	29
5.5.4	Propiedades térmicas de las harinas nixtamaliizadas .....	29
5.6	Caracterización de masas obtenidas por método tradicional y método por calentamiento óhmico continuo .....	30
5.6.1	Textura de masas .....	30
5.6.2	Rendimiento de masa.....	30
5.7	Elaboración de tortillas obtenidas por el proceso tradicional y el proceso de calentamiento óhmico .....	30
5.7.1	Inflado de tortilla .....	30
5.7.2	Pérdida de peso en tortillas .....	31
	Donde: PTcruda es el peso de la tortilla cruda y PTcocida es el peso de la tortilla cocida. ....	31

5.7.3 Rendimiento de tortilla .....	31
5.7.4 Rolabilidad.....	31
5.7.5 Textura de tortillas .....	32
5.7.6 Color de las tortillas .....	32
5.8 Caracterización química de harinas obtenidas por el proceso tradicional y proceso por calentamiento óhmico continuo .....	32
5.8.1 Caracterización nutricional .....	33
5.8.2 Determinación de lisina .....	33
5.8.3 Contenido de calcio .....	33
5.9 Cuantificación de compuestos nutraceuticos de harinas nixtamalizadas por diferentes tratamientos.....	34
5.9.1 Fibra dietética total .....	34
5.9.2 Cuantificación de compuestos fenolicos.....	34
5.9.2.1 Extracto metanólico (compuestos fenolicos libres) .....	34
5.9.2.2 Extracto de compuestos fenolicos ligados.....	35
5.9.2.3. Cuantificación de flavonoides totales.....	35
5.9.2.4 Cuantificación de fenoles totales .....	35
5.9.3 Capacidad antioxidante .....	35
5.9.3.1 Método ABTS .....	35
5.9.3.2 Método DPPH.....	36
5.10 Diseño experimental y análisis estadístico .....	37
6 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	37
6.1 Distribución de tamaño de partícula de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) molido para la producción de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico	
37	
6.2 Parámetros eléctricos de las harinas nixtamalizadas al ser procesadas por calentamiento óhmico por lote .....	39



6.3	Caracterización física de harinas obtenidas por proceso tradicional y calentamiento óhmico.....	42
6.3.1	Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS).....	42
6.3.2	Perfil de viscosidad de harinas por calentamiento óhmico ..	43
6.3.3	Propiedades térmicas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico .....	48
6.3.4	Color de tortillas.....	54
6.4	Selección de los parámetros a usar en calentamiento óhmico continuo	56
6.5	Caracterización de harinas nixtamalizadas usando un equipo de calentamiento óhmico continuo .....	58
6.5.1	Caracterización física de harinas.....	58
6.5.2	Propiedades térmicas de harinas nixtamalizadas.....	60
6.5.3	Capacidad de absorción de agua subjetiva de harinas nixtamalizadas .....	63
6.6	Caracterización de masas obtenidas por método tradicional y método por calentamiento óhmico.....	64
6.7	Caracterización de tortilla.....	65
6.8	Selección de condiciones de procesamiento para nixtamalizar harinas usando calentamiento óhmico continuo.....	71
6.9	Caracterización química de harinas obtenidas por el proceso tradicional y proceso por calentamiento óhmico.....	71
6.10	Contenido de compuestos fenólicos libres en harinas nixtamalizadas	75
6.9.1	Contenido de flavonoides totales.....	76
6.9.2	Contenido de taninos condensados .....	77
6.9.3	Fenoles totales .....	77
6.9.4	Capacidad antioxidante .....	78

6.9.2 Cuantificación de compuestos fenólicos libres y ligados por HPLC-DAD en harinas nixtamalizadas por diferentes métodos .....	81
7 CONCLUSIONES .....	84
8 BIBLIOGRAFÍA .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla 1. Parámetros químicos que debe cumplir una harina nixtamalizada de maíz	23
Tabla 2. Capacidad de absorción de agua subjetiva de harinas nixtamalizadas	42
Tabla 3. Propiedades reológicas de harinas por calentamiento óhmico por lote, harina por el proceso tradicional y harina comercial	47
Tabla 4. Propiedades térmicas de harinas por calentamiento óhmico, harina nixtamalizada por el proceso tradicional y harina comercial.	49
Tabla 5. Clasificación de umbrales de tolerancia en base con la norma ISO 12647-2	55
Tabla 6. Parámetros de color de tortillas obtenidas por harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico, tradicional y comercial.	57
Tabla 7. Retrogradación de harinas por calentamiento óhmico por lote, harina por el proceso tradicional y harina comercial	60
Tabla 8. Capacidad de absorción de agua subjetiva	63
Tabla 9. Caracterización de masas obtenidas de harinas por calentamiento continuo.	65
Tabla 10. Parámetros de calidad funcional de harinas procesadas por calentamiento óhmico, proceso tradicional y harina comercial	67
Tabla 11. Parámetro de calidad de tortilla durante la cocción	68
Tabla 12. Parámetro de color de tortillas elaboradas a partir de harinas obtenidas por diferentes procesos	70
Tabla 13. Composición proximal de harinas nixtamalizadas por diferentes métodos*	72
Tabla 14. Contenido de lisina y triptófano en harinas nixtamalizadas por diferentes procesos	75
Tabla 15. Comparación nutracéutica de harinas nixtamalizadas por diferentes procesos	80
Tabla 16. Compuestos fenólicos identificados por HPLC-DAD en harinas nixtamalizadas por diferentes métodos	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1. Estructura del grano de maíz.	5
Figura 2. Estructura de los biopolímeros que forman el almidón: (a) amilosa y (b) amilopectina.	6
Figura 3. Diagrama ilustrativo del principio de calentamiento óhmico	17
Figura 4. Distribución de tamaño de partícula de maíz molido Pulvex (1.3, 3 y 6 mm) y Nixtamatic	39
Figura 5. Viscoamilogramas de harinas por calentamiento óhmico por lote	44
Figura 6. Termogramas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico por lote	52
Figura 7. Micrografías de maíz nixtamalizado por calentamiento con 120 V (a, b, c, d, e, f) y 130 V (g, h, i, j, k, l) a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento	53
Figura 8. Perfil de viscosidad de harinas nixtamalizadas por diferentes procesos. Primero y segundo viscoamilogramas tratamientos por calentamiento óhmico con diferentes condiciones de proceso	59

## 1 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) está dentro de los cereales de mayor importancia a nivel mundial. Se siembra en 125 países, con una superficie de cerca de 100 millones de hectáreas. La producción mundial en 2012, se produjeron 872 millones de toneladas de maíz, lo ubica como el primer cereal en producción. En el caso de México fue el segundo cultivo con mayor producción con 22 millones de toneladas ([FAOSTAT, 2012](#)).

En nuestro país, el maíz es el componente principal de la dieta en la población. El consumo aproximado en las áreas rurales es de 79.5 kg por año, mientras en áreas urbanas es de 56.7 kg por año ([Secretaría de Economía-Dirección General de Industrias Básicas, 2012](#)), por lo que el maíz es el cereal más consumido por los mexicanos.

Las tortillas son el alimento básico más importante para la población mexicana que se obtienen del maíz, las cuales son producidas a partir de masa o bien a partir de harinas, ambas obtenidas por nixtamalización tradicional. Las tortillas han sido fundamentales en la dieta de la población mexicana. En México, representan 38% de proteínas, 45.2% de calorías y 49.15% de calcio del consumo diario de los mexicanos ([Figueroa, 1994](#)).

Actualmente, los procedimientos para obtener nixtamal para la producción de tortilla a nivel industrial son muy similares a los utilizados en el método ancestral de nixtamalización ([Lind y Barham, 2004](#); [Herrera-Corredor et al., 2007](#)). La nixtamalización es un proceso térmico-alcalino que consiste en la cocción en un exceso de agua y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (1 a 2 g/100 g de maíz) posteriormente se reposa y se lava. El maíz nixtamalizado es molido para producir masa con la cual se pueden elaborar tortillas o se puede secar para obtener harinas de maíz nixtamalizada ([Figueroa et al., 2001](#); [Martínez-Flores et al., 2002](#)).

Este proceso térmico-alcalino tiene algunas desventajas, principalmente asociadas con: uso excesivo de agua, por ende, se generan una cantidad importante de desecho a partir del caldo de cocción denominado "nejayote". Este caldo, tiene un pH altamente alcalino, sólidos solubles (2 al 11%), lo que produce

pérdida de nutrientes y alta demanda de oxígeno. Otra desventaja del proceso son los tiempos largos de procesamiento y la alta ineficiencia energética ([Ortega-Moody et al., 2011](#)). Todos estos problemas pueden ser significativos a un fabricante desde el punto de vista económico y ambiental.

Para dar solución a estos problemas, se han propuesto varias tecnologías alternativas a la nixtamalización tradicional. Una de ellas es el calentamiento óhmico, tecnología emergente que puede reemplazar los cocimientos convencionales.

El proceso de calentamiento óhmico consiste en la generación interna de calor *in situ* debido al paso de corriente eléctrica alterna por efecto de la resistencia que ofrece el alimento al paso de la corriente (efecto Joule). La velocidad de calentamiento es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico, la conductividad eléctrica y la composición química del alimento a procesar ([Salengke y Sastry, 2007](#)).

[Gaytán-Martínez et al., \(2012, 2012a\)](#), reportaron el uso de calentamiento óhmico para la obtención de harinas instantáneas en un sistema en lote. Los autores reportaron que las harinas obtenidas por calentamiento óhmico presentaron buenas características funcionales. Por otro lado, reportaron un alto contenido de fibra comparado con una harina comercial y una obtenida por el proceso tradicional. Además de una cantidad similar de calcio, lisina y triptófano comparada con el proceso tradicional.

Por otra parte, [Ménera-López et al., \(2013\)](#) utilizaron un cocedor de calentamiento óhmico continuo diseñado por [Morales et al., \(2010\)](#) para obtener harinas nixtamalizadas. Sus resultados mostraron que se obtenían rendimiento similar a las obtenidas por el proceso tradicional pero las masas eran pegajosas por lo que era difícil procesar.

Por lo anterior es necesario evaluar cómo afectan las variables de proceso al usar calentamiento óhmico en la calidad funcional, química y nutracéutica de las harinas nixtamalizadas por este sistema.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Generalidades del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal con mayor importancia a nivel mundial, se siembra en 125 países con una superficie de cerca de 100 millones de hectáreas. La producción mundial en 2012 fue de 872 millones de toneladas lo que lo ubica en el principal cereal producido a nivel mundial. En México se ubica como el segundo cultivo con mayor producción con 22 millones de toneladas ([FAOSTAT, 2012](#)).

### 2.2 Origen del maíz

México es considerado como el centro de origen y diversidad del maíz. Esta diversidad se ha agrupado en al menos 59 razas con base en características morfológicas, bioquímicas, genéticas y moleculares ([Warburton et al., 2008](#)). Se tiene la teoría de que la diversidad genética se dio por la emigraron de este material de México hacia otras partes del continente americano ([Acosta, 2009](#)).

El maíz cultivado es una planta completamente domesticada y el hombre y el maíz han vivido y han evolucionado juntos desde tiempos remotos. El maíz no crece en forma salvaje y no puede sobrevivir en la naturaleza, siendo completamente dependiente de los cuidados del hombre ([Wilkes, 1989](#); [Galinat, 1988](#); [Dowswell et al., 1996](#)).

En la antigua cultura mesoamericana el maíz fue parte esencial en sus creencias y sus costumbres alimenticias. Los antiguos mesoamericanos fueron capaces de realizar cruza de forma básica y en base a selección e identificación de características propias definidas con propósitos culinarios específicos. A lo largo del tiempo, de usos y costumbres la forma de cultivar los maíces dio origen a la diversidad de clases de maíces que difieren en color, tamaño de grano, peso, contenido de nutrientes y de su mera utilización ([Wilkes, 1989](#)).

### 2.3 Estructura del grano de maíz

El maíz pertenece a la familia de las gramíneas. Su grano o crióspide, según se muestra en la Figura 1, está compuesto por endospermo (80- 85 %), germen (9-

10 %) pericarpio (5-6 %), aleurona (2-3 %) y pedicelo (0.8-1.0 %) ([Watson y Ramstad, 1987](#)).

**Endospermo:** Está compuesto por un gran número de células, cada una de ellas conteniendo gránulos de almidón incrustadas en una matriz continua proteica. La pared celular está compuesta por polisacáridos no almidonosos;  $\beta$ -Glucanos y arabinosilanos, proteínas y ácidos fenólicos. En el grano de maíz se encuentran dos tipos de endospermo, el harinoso y el vítreo. El endospermo harinoso tiene gránulos de almidón poco empaquetados rodeando la fisura central del grano, mientras que el endospermo vítreo contiene gránulos más pequeños y bien empaquetados hacia la periferia. Las proteínas de almacenamiento son conocidas como cuerpos proteicos, y comprenden la matriz proteica. Los cuerpos proteicos están principalmente de una fracción proteica de prolamina conocida como zeína, la cual es altamente baja en aminoácido lisina.

El endospermo contiene alrededor de 85 % de almidón, 8.5 % de contenido proteico y un bajo contenido de grasa de alrededor de 1 %. Los lípidos del endospermo contienen más ácidos saturados que los que se encuentran en el germen ([Prasanna et al., 2001](#)).

**Germen:** Se caracteriza por su alto contenido de grasa (33%), contenido proteico de alrededor de 18%, un bajo contenido de almidón de alrededor de 8% y minerales ([Watson y Ramstad, 1987](#)). Las grasas del germen son ricas en ácidos grasos poliinsaturados. Las grasas del germen son relativamente estables debido al contenido de antioxidantes naturales y considerados benéficos a la salud principalmente por contener ácido oleico y linoleico ([Hauman, 1985; Dupont et al., 1990](#)).

**Pericarpio:** El pericarpio es la capa externa, con alto contenido en fibra cruda, conformada principalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina. El grosor del pericarpio depende del tipo de maíz y se extiende desde la base del grano hasta la base del pedicelo. El pericarpio y pedicelo representan una pequeña porción del total de lípidos del grano ([Hauman, 1985; Dupont et al., 1990](#)).



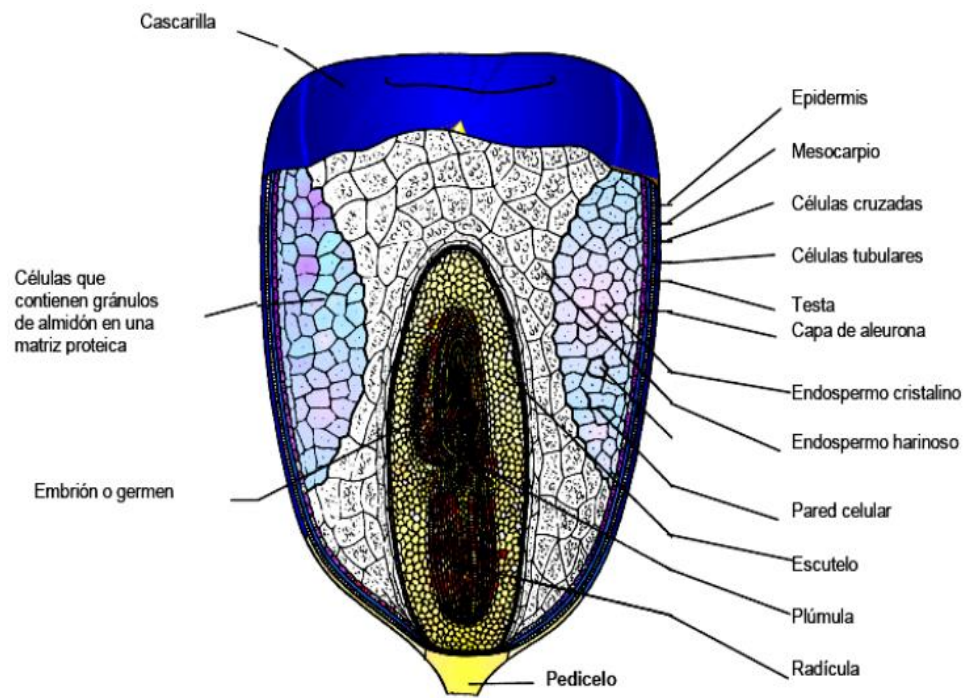


Figura 1. Estructura del grano de maíz.

Fuente: [Wheat Flour Institute, Chicago, Illinois \(1964\)](#)

#### 2.4 Composición química del grano de maíz

La composición química del maíz es compuesta de proteína, almidón y grasa. Este cereal contiene un 8% de proteína. Las proteínas del maíz se encuentran principalmente en el endospermo y germen. Con base en su solubilidad las proteínas del grano se clasifican en: Albúminas (3%) solubles en agua, globulinas (3%) en soluciones salinas, prolaminas son solubles en alcohol, y son denominadas zeínas (60 %) y glutelinas (34 %) ([Osborne y Mendel, 1914](#)).

Las zeínas, es la fracción más importante que compone a las proteínas del maíz y es la responsable de su pobre calidad proteica del maíz ([Vasal, 2000](#)). Lo anterior debido a que, en un maíz normal, la fracción de zeína contiene una alta proporción de leucina (18.7 %), fenilalanina (5.2 %), isoleucina (3.8 %), valina (3.6 %), y tirosina (3.5 %), pero cantidades bajas de aminoácidos esenciales como treonina (3 %), histidina y cisteína (1 %), metionina (0.9 %), y lisina (0.1 %) y carente de triptófano. Las fracciones proteicas que no comprenden a las zeínas contienen un equilibrio en lisina y triptófano ([Chaudhary et al., 2014](#)).

El principal carbohidrato del maíz es el almidón, que contribuye con aproximadamente el 70 % del peso del grano y se encuentra en un 95% en el endospermo. La molécula de almidón es un homopolímero, constituida por unidades repetidas de glucosa unidas por un enlace  $\alpha$ -glucosídico. El almidón se compone de dos cadenas, una lineal llamada amilosa y otra ramificada llamada amilopectina. Se caracterizan por presentar enlaces  $\alpha$ 1-4 para amilosa y al igual que la parte lineal de la amilopectina, sin embargo, esta última presenta ramificaciones con enlaces  $\alpha$ 1-6 (Figura 2). La composición del almidón de un maíz normal comprende 25-30% de amilosa y 70-75% de amilopectina (Nelson y Pan, 1995).

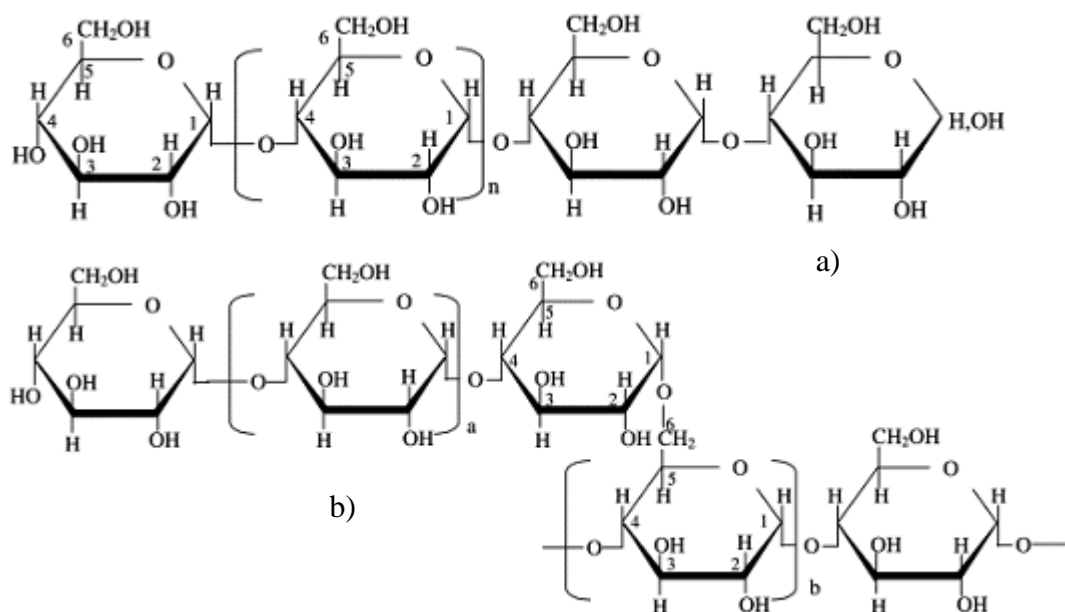


Figura 2. Estructura de los biopolímeros que forman el almidón: (a) amilosa y (b) amilopectina.

Fuente: Tester *et al.*, (2004)

El grano de maíz contiene otros carbohidratos complejos, en el pericarpio, pedicelo, pared celular del endospermo y del germen. Estos carbohidratos son los que constituyen la fibra dietética, entre los que se encuentran la hemicelulosa, celulosa y lignina y representan 75 %, 25 % y 0.1 % respectivamente en base seca respecto al peso del grano (Sandstead *et al.*, 1978; Van Soest *et al.*, 1979).

Los lípidos de maíz constituyen un 5.5% del peso del grano. Este compuesto se concentra principalmente en el germen del grano (85%) y el resto disperso en el endospermo y fracciones del pericarpio (Katragadda *et al.*, 2010). Los lípidos de maíz contienen bajos niveles de ácidos grasos saturados, entre los que se encuentran el palmítico (11%) y esteárico (2%). Asimismo, contiene niveles elevados de ácidos grasos poliinsaturados, principalmente ácido linoleico (24%) y en menores cantidades ácido linolénico (Hauman, 1985; Dupont *et al.*, 1990). El aceite del grano de maíz es reconocido como una fuente de tocoferoles, los cuales funcionan como antioxidantes y proveen una fuente de vitamina E. Los principales tocoferoles encontrados en el aceite del grano de maíz son; alfa, beta, gamma y delta-tocoferol. En la dieta humana los ácidos grasos esenciales y vitamina E son un componente principal ya que no pueden ser sintetizados por el cuerpo. Asimismo, los ácidos grasos poliinsaturados protegen a las membrana celular contra la degradación por las especies reactivas de oxígeno (Dörmann, 2003).

La composición mineral del maíz se encuentra formada por calcio, cobre, zinc, hierro, magnesio, manganeso, fósforo y potasio (Ullah *et al.*, 2010). Estos minerales son considerados esenciales ya que desempeñan funciones fisiológicas importantes como el crecimiento físico, desarrollo de órganos y tejidos; síntesis de vitaminas, enzimas y hormonas; así como mantener saludable el sistema nervioso, sistema circulatorio, homeostasis, integridad celular, contracción muscular y producción de energía (O'Dell y Sunde, 1997).

## 2.5 Compuestos fitoquímicos del maíz

Las propiedades nutracéuticas del maíz están íntimamente ligadas con su composición fitoquímica, y representa actualmente una línea de investigación de interés. El maíz tiene un amplio rango de compuestos fenólicos. El conjunto de compuestos fenólicos está concentrado en el pericarpio y la capa de aleurona, y en menor cantidad germen y endospermo (Sen *et al.*, 1994).

En el maíz al igual que en otros cereales, los compuestos fenólicos pueden dividirse en simples, flavonoides y antocianinas. Todos los maíces contienen fenólicos simples, el principal es el ácido ferúlico. El ácido ferúlico es el

compuesto fenólico presente en mayor cantidad en maíz. Este se puede encontrar en tres formas: ligada, libre y condensada (Serna-Saldívar *et al.*, 2013).

En el pericarpio se encuentra la concentración mayor de antocianinas y una menor cantidad en la capa de la aleurona (Moreno *et al.*, 2005). Las antocianinas son interesantes por dos aspectos relevantes, el primero es por su efecto en las propiedades sensoriales de los alimentos, y el segundo por su implicación en la salud humana, como actividad antioxidante, mejorar la agudeza visual, atrapar radicales libres y pueden tener un papel en las propiedades antidiabéticas, antiinflamatorios y anticancerígenos (de Pascual-Teresa y Sánchez-Ballesta, 2008; Shipp y Abdel-Aal, 2010). Dentro de las antocianinas más identificadas son las derivadas de la cianidina, que se encuentran principalmente en el pericarpio y la capa de la aleurona (70%) (Luo y Wang, 2012).

Los carotenoides son una familia de pigmentos naturales y orgánicos de color amarillo, rojo y naranja. Los carotenoides se dividen en dos clases, carotenos y xantofilas. En el maíz los que predominan son luteínas, zeaxantina,  $\beta$ -caroteno,  $\beta$ -criptoxantina y  $\alpha$ -caroteno (Kurilich y Juvik, 1999). Diversos estudios sugieren que el consumo de alimentos ricos en carotenoides son benéficos para la prevención de ciertas enfermedades como cáncer y enfermedades crónicas (Kurilich y Juvik, 1999; Michaud *et al.*, 2000).

Los granos integrales como el maíz aportan una cantidad considerable de fibra dietética, particularmente la insoluble, esta es muy importante en la dieta humana ya que no se consume en cantidades suficientes y esta presume tener efectos que mejoran la función gastrointestinal y previene constipación, divertículos, hemorroides, cáncer de colon y diabetes. Además, contiene el maíz fitatos, compuestos antinutricios que disminuyen la biodisponibilidad de minerales como el hierro, pero también poseen propiedades anticarcinogénicas (Steer y Gibson, 2002).

## 2.6 Productos de maíz

Los productos alimenticios de maíz pueden ser procesados desde el hogar a escalas pequeñas hasta escalas mayores a nivel industrial, transformando la materia prima en productos alimenticios.

En la industria existen dos procesos de transformación del maíz a productos de consumo humano. El primero es la molienda húmeda y seca. En la molienda húmeda el maíz es separado en cierto grado de pureza de sus componentes, almidón, proteína, aceite y fibra. Estos productos no son generalmente consumidos directamente, sino que requieren procesos adicionales para su consumo final ([Paliwal, 2001](#))

En la molienda en seco incluye la reducción de tamaño de partícula, conservando la totalidad o la parcialidad de alguno de los componentes originales como el germen y fibra ([Rooney & Serna-Saldívar, 1987](#)). Los productos con contenido alto en grasas, debido a productos integrales o parcialmente desgerminados no son estables en almacén. Los productos con mayor estabilidad son aquellos que tienen una mayor remoción de germen y fibra. La reducción de tamaño de partícula se realiza con equipos similares a los utilizados en la industria de harina de trigo o equipos especializados en el procesamiento del grano de maíz. Generalmente estos productos requieren procesos secundarios para su consumo ([Gwartz & García-Casal, 2014](#)).

El segundo proceso industrial es la nixtamalización del cual se pueden obtener harinas instantáneas. La producción de harinas instantáneas se ha incrementado en los últimos años y se ha consolidado en la industria. La ventaja de estas harinas es que se producen productos al rehidratar las harinas, para su posterior procesamiento dependiendo del producto. La nixtamalización es usada para producir totopos, tamales, tortillas, tacos, atoles, pinoles y tortillas de varios tipos ([Rooney & Suhendro, 1999](#)).

## 2.7 Proceso de nixtamalización

La palabra nixtamalización proviene del náhuatl *nixtli*, cenizas, y *tamalli*, masa, este proceso se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica y aún se conserva el método como en tiempos prehispánicos desarrollada por las antiguas civilizaciones como la maya o la azteca ([Paredes-López et al., 2009](#); [Pappa et al., 2010](#)).

La nixtamalización es un proceso que ha trascendido frontera ya que se realiza en otros países de centro América, Estados Unidos y partes de Europa (Niño-Medina *et al.*, 2009; Paredes-López *et al.*, 2009).

El proceso consta de la cocción del grano de maíz con abundante agua e hidróxido de calcio (2-3 litros de agua por kilogramos de maíz y de 1-2 % de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). El maíz se somete a cocción de 25 a 40 minutos a temperaturas cercanas a ebullición; posteriormente se deja reposar de 8 a 16 horas. Enseguida, se decanta el agua de cocción o mejor conocida como nejayote, y el maíz ahora denominado nixtamal, se lava de dos a tres veces o hasta que el agua salga aparentemente limpia, esto con la finalidad de quitar el exceso de cal, y se escurre quedando finalmente el nixtamal con una humedad alrededor de 45 % (Paredes-López *et al.*, 2009).

El nixtamal es molido para producir la masa que posteriormente se utiliza para la elaboración de tortillas u otros productos. Esta molienda se realiza de diferentes formas desde el metate de piedra o molino de mano hasta equipos con un mayor grado de tecnificación como molinos de piedra motorizados. Es importante en la molienda la adición de agua para obtener una masa con una humedad de 48-55% y la reología adecuada.

La masa se puede utilizar para producir tortilla o harinas deshidratadas para su posterior uso en productos derivados (Paredes-López *et al.*, 2009; Serna-Saldívar *et al.*, 1990; Serna-Saldívar y Guerra, 2008; Figueroa *et al.*, 2006). Para obtener, la tortilla se forma de discos aplanados de masa fresca o las masas obtenidas a partir de harinas nixtamalizadas, estos discos se pueden formar manualmente, en prensas manuales y en equipos automáticos que incluyen principalmente la formación y cocción. Las dimensiones del disco pueden variar de 12 a 25 cm de diámetro con un espesor de 1.5 a 2 mm. La cocción se lleva a cabo en una superficie caliente durante 30 a 45 s por un lado, se voltea para cocerla durante un minuto y finalmente se voltea una vez más para dar 30 s más de cocimiento. El producto cocido es la tortilla, nombre otorgado por los españoles, derivado del náhuatl era llamado *tlaxcalli* (Paredes-López *et al.*, 2009).

### 2.7.1 Beneficios nutricionales del proceso de nixtamalización

El proceso de nixtamalización es responsable de dar las características fisicoquímicas, nutricionales y sensoriales de productos de maíz nixtamalizados (Pappa *et al.*, 2010).

En el proceso de nixtamalización uno de los objetivos es suavizar el grano, esto se logra por la absorción de agua por el grano. Durante la cocción alcalina existe un gradiente de concentración de calcio a través de la estructura del pericarpio, esto promueve cambios fisicoquímicos en la estructura interna del grano de maíz, como es el germen y endospermo. Estos cambios modifican la estructura del grano y las propiedades reológicas debido a los fenómenos de transferencia de masa e intercambio de calor (Verma y Prasad, 1999).

Al final de la cocción alcalina el pericarpio aparece de una forma descubierta, debido a la remoción de una capa delgada cerosa, esto permite la penetración del agua dentro del grano y la difusión del calcio dentro del mismo y esto hace posible el fenómeno de gelatinización, principalmente en las capas más externas del endospermo (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010; Rojas-Molina *et al.*, 2007). Hay una relación directa entre la temperatura de cocción y el grado de absorción de agua impactando en el contenido de humedad debido a la remoción del pericarpio (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

La pérdida de materia seca principalmente está constituida por la estructura de la epidermis que corresponde a las capas externas del pericarpio a consecuencia del calor y del medio alcalino de la nixtamalización (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

Quintanar-Guzmán *et al.*, (2009) mostraron que la nixtamalización del maíz ocasiona la ruptura del pericarpio y de la capa de células aleuronas, por lo que ocurre la hidratación del almidón y la solubilidad de cuerpos proteicos aumentando estos efectos respecto del tiempo de cocción. Los gránulos de almidón se hinchan a consecuencia de la absorción de agua durante cocción y el reposo lo que ocasiona la gelatinización del almidón.

La nixtamalización altera la solubilidad, el peso molecular de albuminas, globulinas y prolaminas, teniendo efecto en sus estructuras primaria, secundaria

y terciaria, lo que promueve la formación de enlaces cruzados entre puente disulfuro de los polipéptidos que contienen azufres, lo que resulta en una estructura más ordenada y posiblemente es consecuencia a las interacciones proteína-almidón (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009). Al disminuir la solubilidad de las proteínas aumenta la biodisponibilidad de lisina y triptófano aminoácidos que son esenciales, así como de la niacina (Katz *et al.*, 1974).

Además, el  $\text{Ca(OH)}_2$  controla la actividad microbiana, tiene un efecto en el color, sabor, valor nutritivo del maíz y vida de anaquel. En el proceso ancestral, reduce el contenido de ácido fítico, lo cual mejora la biodisponibilidad de hierro (Urizar y Bressani, 1997).

Las fumonisinas son micotoxinas producidas por la contaminación de hongos en cereales y causan enfermedades en los animales a nivel mundial (Marasas *et al.*, 2000). Se ha reportado que la nixtamalización reduce de manera significativa el contenido de micotoxinas, propiamente fumonisina B<sub>1</sub>, produciendo hidrolizados de fumonisina B<sub>1</sub> debido a la pérdida de las cadenas laterales de ácido tricarbálico. Al reducir la cantidad de fumonisinas por nixtamalización se reduce la elevación de esfingosina en células epiteliales renales de cerdo tratadas con extractos de tortilla comparadas respecto a extractos de maíz contaminado. La esfingosina es un biomarcador estrechamente ligado a la toxicidad de las fumonisinas (Palencia *et al.*, 2003).

El efecto de la cocción alcalina aumenta la actividad antioxidante producida por la liberación de compuestos fenólicos ligados (Serna-Saldívar *et al.*, 2013).

### 2.7.2 Desventajas de la nixtamalización

El proceso de la nixtamalización presenta varios problemas, de los más destacan: uso elevado de energía; requiere grandes cantidades de agua, en la cocción y lavado de nixtamal; la generación de nejayote, efluente contaminante que presentan un elevado pH alcalino, alta concentración cal, sólidos solubles y tejido de pericarpio, la pérdida de algunos nutrientes (Acosta-Estrada *et al.*, 2014).



Rosentrater (2006), reportó que durante el proceso de nixtamalización se pierde sólidos de materia seca de maíz en el nejayote. Las pérdidas oscilan entre 0.5 % y 14.5 % de la materia seca original. Del 50% los sólidos suspendidos del nejayote, el 64% son polisacáridos no almidonosos, 20 % almidón y 1.4% de proteína (Pflugfelder *et al.*, 1988). El resto comprende los sólidos solubles que consisten en proteínas, azúcares, grasas, vitaminas (niacina, riovflavina, tiamina) y fitoquímicos como compuestos fenólicos ligados (Gutiérrez-Urbe *et al.*, 2010). Los sólidos del nejayote contienen altas concentraciones de fibra cruda (19.3 %) y calcio (13.1 %). Nutritionalmente la remoción del pericarpio en la nixtamalización da lugar a harinas con bajo contenido de fibra dietética (Sánchez-Madrigal *et al.*, 2014; Acosta-Estrada *et al.*, 2014).

Por otra parte, Valderrama-Bravo *et al.*, (2012) reportaron que el líquido residual generado durante la nixtamalización, es altamente contaminante. Los autores reportaron su composición la composición sólidos solubles e insolubles orgánicos e inorgánicos, que lo conforma. Se encontró que el nejayote presenta un pH (11.39), sólidos totales (2.28%), cenizas (0.767%), carbohidratos (0.862%), sólidos suspendidos totales (8342.5 mg L<sup>-1</sup>). Además, debido a la composición del nejayote tiene una demanda química de oxígeno (DQO) (40058 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>), demanda biológica de oxígeno (DBO) (14,219 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) y una alcalinidad total (5768 mg L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>).

Las pérdidas de parte del pericarpio, afectada el perfil nutracéutico del maíz, disminuyendo de manera significativa la cantidad de fenólicos totales, ácido ferúlico y la capacidad antioxidante (De la Parra *et al.*, 2007). Una gran cantidad de componentes fenólicos son perdidos, encontrándose una cantidad de 10 a 100 veces más de ácido ferúlico libre que los granos originales. De igual forma los sólidos del nejayote presentaron alrededor de 20 veces más ácido ferúlico ligado respecto a los granos originales o la masa. La actividad antioxidante de compuestos ligados asociados al nejayote fue 193 y 60 veces mayores respecto a los observados en grano crudo y masa respectivamente (Gutiérrez-Urbe *et al.*, 2010).

## 2.8 Procesos alternativos de nixtamalización

A pesar de la importancia económica, social, nutricional y cultural que presenta el método tradicional los pasos básicos del proceso no se han modificado desde las primeras civilizaciones mesoamericanas. Por lo anterior, se han reportado diferentes procesos alternativos a la nixtamalización tradicional ([Cortés-Gómez et al., 2005](#)).

Los procesos alternativos tienen como propósito eliminar las desventajas del proceso tradicional, pero conservando las propiedades nutricionales y funcionales que da el mismo. Los métodos alternativos pueden dividirse en dos tipos: Los que hacen modificaciones al proceso, pero conserva la metodología y equipamiento del proceso tradicional o los procesos que cambian totalmente la forma de obtener el nixtamal.

[Figuroa et al., \(2006\)](#) propusieron un proceso ecológico de nixtamalización enfocado a los retos ambientales y nutricionales. El proceso consiste en hacer modificaciones al proceso tradicional. Para ello se sustituye el hidróxido de calcio por sales de calcio comerciales, como carbonato y propionato de calcio. Los autores reportaron que la masa y tortilla producida por el método ecológico de nixtamalización fueron superiores en apariencia y propiedades sensoriales comparadas con las obtenidas por el método tradicional. [Maya-Cortés et al., \(2010\)](#) reportó que el contenido de fibra total dietaría, fibra insoluble, grasas y proteínas aumentaron en la tortilla obtenida por el proceso ecológico de nixtamalización comparado con el proceso tradicional de nixtamalización. Los autores reportaron que al alimentar ratas con tortillas obtenidas por el proceso ecológico de nixtamalización ganaron peso y presentaron una alta relación de eficiencia proteínica. Otra ventaja es que este proceso provee tortillas con un índice glicémico más bajo respecto a las tortillas elaboradas por el método tradicional además con un mayor contenido de fibra dietaría debido a una mayor retención del pericarpio ([Maya-Cortés et al., 2010](#)). Sin embargo, los tiempos de procesamiento siguen siendo largos.

La extrusión es otro método que se ha usado con el fin de sustituir la nixtamalización tradicional. La extrusión consiste básicamente en comprimir un alimento hasta conseguir una masa semisólida que posteriormente pasa por un

orificio (Méndez-Albores *et al.*, 2013). Este proceso tiene la ventaja de usar el grano integral y el agua necesaria para la cocción por lo que no hay generación de efluente contaminante (Arámbula *et al.*, 1999; Milán-Carrillo *et al.*, 2006; Contreras-Jiménez *et al.*, 2014). Por tanto, las propiedades nutricias asociadas al pericarpio y la capa de aleurona se mantienen (Serna-Saldívar *et al.*, 1988), por lo que el producto final tiene mayor contenido de fibra y de contenido de polifenoles, por lo que mantienen su capacidad antioxidante (De la Parra *et al.*, 2007). Una de las desventajas que presenta la nixtamalización por extrusión es que la masa no tiene las propiedades reológicas adecuadas (Contreras-Jiménez *et al.*, 2014).

El proceso de nixtamalización asistida con ultrasónico y usando frecuencias de 20 a 100 kHz ha sido utilizado como proceso alternativo. El éxito de esta aplicación ha sido el efecto sobre la estructura del pericarpio (Aliyu y Hephher, 2000) causado por cavitación y microcorrientes (Nyborg, 1982) acción producida por el efecto del poder ultrasónico. La finalidad es acelerar el proceso de nixtamalización tradicional, usando el poder ultrasónico con una densidad de energía acústica alrededor de 1.85 W/g por una hora y posteriormente una hora más de reposo. El proceso logró disminuir el tiempo de cocción y el tiempo de reposo del nixtamal, ya que solo se invirtieron dos horas en este proceso lo que comparado con un nixtamal tradicional que es de alrededor de 14 horas. El nixtamal producido por este proceso resultó más blando y con menores pérdidas de sólidos en el nejayote respecto a un control de maíz nixtamalizado. El color y la humedad en general del nixtamal por el ultrasonido resultaron comparables al proceso tradicional (Janve *et al.*, 2013). Aunque se deben considerar, la viabilidad de implementar la tecnología a nivel comercial.

El método por vapor, en donde el maíz es cocido aplicando altas presiones entre 5-25lb/pulgada<sup>2</sup> en un tiempo de aproximadamente 20 min con un reposo de 60 min y agitación en intervalos de 10 min. Este proceso resulta en una degradación fuerte del grano, por lo que genera masa con alta adhesión por lo que no tiene una buena calidad para ser troqueladas durante el procesamiento de tortillas (Bedolla y Rooney, 1982).

En el proceso por microonda se emplea energía calorífica generada por las vibraciones moleculares de los propios compuestos químicos del alimento en cuestión. El maíz, agua y cal se mezcla y se someten a cocción en un horno de microondas, posteriormente se da un reposo de 3 horas, el nixtamal es sometido a molienda para obtener la masa. Este producto resulta en un cocimiento con características inadecuadas a causa de una deshidratación excesiva (Pérez-Flores *et al.*, 2011).

Otro proceso que se ha reportado es el uso de calentamiento óhmico como método de cocción (Gaytán- Martínez *et al.*, 2011, 2012; Ménera-López *et al.*, 2013). Sin embargo, no se ha logrado optimizar a pesar de las ventajas que este presenta.

## 2.9 Tratamiento térmico por calentamiento óhmico

Una de las tecnologías alternativas en especial en el sector de los alimentos es el calentamiento óhmico, ya que ofrece calentamientos por lote o continuo con alta eficiencia de calentamiento y corta duración de procesamiento (Sakr y Liu, 2014).

El calentamiento óhmico es un proceso térmico que consiste en la generación interna de calor por el paso de una corriente eléctrica alterna (I) sobre una matriz que presenta resistencia eléctrica (R), como puede ser una matriz alimenticia. La energía eléctrica que se aplica a la matriz y que se convierte en un incremento de temperatura está dada por la Ley de Joule según la ecuación 1 (Zell *et al.*, 2009).

Ecuación 1

$$\text{Energía consumida} = E = V * I = V^2 / R = R * I^2$$

La potencia eléctrica se define como la energía consumida por unidad de tiempo, por lo tanto (Ecuación 2):

Ecuación 2

$$\text{Potencia eléctrica} = \text{Energía consumida} / \text{tiempo} = (V*I) / s$$

La Figura 3 ilustra el principio del calentamiento óhmico. La razón de calentamiento o energía consumida es directamente proporcional al cuadrado del potencial eléctrico  $V$  sobre la resistencia  $R$  (Ley de joule). La resistencia  $R$  depende de la conductividad eléctrica es decir del tipo de material que será calentado (Salengke y Sastry, 2007). Por ejemplo, si el material a calentar es agua y sal, la conductividad será muy alta debido a los iones de la sal. En cambio, si se tiene agua y azúcar, la conductividad será baja debido a que la azúcar es una molécula polar que no conduce.

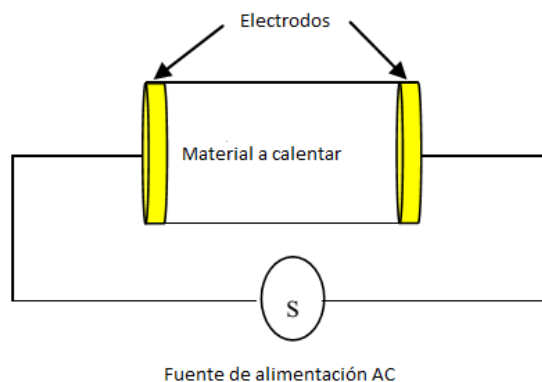


Figura 3. Diagrama ilustrativo del principio de calentamiento óhmico  
Fuente: Sakr y Liu, (2014)

### 2.9.1 Parámetros involucrados para la generación del calentamiento óhmico

En el proceso térmico del calentamiento óhmico se involucran parámetros muy importantes. Un parámetro es la resistencia, otro es el voltaje eléctrico, otro es la corriente y existe un parámetro geométrico dado por la celda que se usa para contener al alimento.

La Figura 3 muestra una celda para calentamiento óhmico con una geometría cilíndrica donde la distancia “ $L$ ” es la distancia entre electrodos y el área “ $A$ ” es el área de los electrodos. El volumen ( $V = L * A$ ) de la celda cilíndrica corresponde a la cantidad de material que se calentará por calentamiento óhmico.

La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) es uno de los parámetros más importantes en el calentamiento óhmico ya que representa al material a calentar es decir al

alimento. La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) depende de la temperatura, concentración de electrolitos del material y de la cantidad de agua interna (humedad) (Assiry *et al.*, 2006). La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) es la propiedad del material que permite el paso de la corriente o carga eléctrica. La conductividad eléctrica depende de la resistencia y de la geometría usada para contener al alimento y se calcula por medio de la ecuación 2.

La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) se puede calcular a través de la siguiente ecuación 3:

Ecuación 3

$$\sigma = \frac{1}{R} \frac{L}{A} = \frac{I}{V} \frac{L}{A}$$

Dónde: L, es la distancia entre los electrodos (m); A, es el área de la sección transversal (m<sup>2</sup>); I, es la corriente que circula a través del material (Ampere); V es el voltaje a través del material (V).

El potencial eléctrico o voltaje aplicado y la corriente que circula por el material tendrán un efecto directo en el calentamiento óhmico de acuerdo a la ley de joule (ecuación 4).

Ecuación 4

$$P = V * I = \frac{V^2}{R} = R * I^2$$

Dónde: P es la potencia (W); V es el voltaje aplicado a través de los electrodos (V) y R es la resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).

Dependencia de la conductividad con la temperatura

La conductividad eléctrica es dependiente de la temperatura. En un alimento a mayor temperatura se tendrá mayor conductividad; esto implica que la energía consumida aumenta porque aumenta la corriente, aunque el potencial se mantenga constante. La dependencia de la conductividad eléctrica con respecto de la temperatura se determina por medio de la siguiente ecuación 5(Wang & Sastry, 1997; Zell *et al.*, 2009):

Ecuación 5

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \gamma (T - T_0))$$

Donde  $\sigma_0$  es la conductividad a temperatura ambiente (20°C) y  $\gamma$  es el coeficiente de temperatura de conductividad del material.

El voltaje aplicado o potencial eléctrico influye en el calentamiento óhmico a través de la amplitud y de la frecuencia. La amplitud influye en la energía consumida (ley de joule  $E = V \cdot I$ ) y por lo tanto en la razón de calentamiento del material alimenticio. La frecuencia del voltaje aplicado influirá en la amplitud de la corriente y por lo tanto en la conductividad eléctrica  $\sigma$  (Sakr & Liu, 2014). En resumen los componentes químicos del material como contenido de sólidos totales, viscosidad, acidez, tamaño, forma y orientación de las partículas que forman el alimento, textura, ingredientes y contenido de humedad, son factores que afectan la eficiencia del calentamiento óhmico (Ramaswamy et al., 2014).

### 2.9.2 Ventajas del calentamiento óhmico

La capacidad para alcanzar una alta calidad de producto, bajo ciertos parámetros, se determina por el rendimiento del sistema de calentamiento en el proceso. La eficiencia energética del calentamiento está determinada por los costos generados de calentamiento por unidad de producción. La eficiencia del calentamiento óhmico es del orden de 95%, esto quiere decir que toda la energía eléctrica consumida se transforma en calor dentro del alimento (la energía del potencial eléctrico o voltaje se disipa en la resistencia de acuerdo a la Ley de Joule ( $E = V^2 / R$ )). Una de las necesidades en la industria moderna es hacer más eficientes a los sistemas de procesamiento de los alimentos y la tecnología de calentamiento óhmico permite mejorar esa eficiencia (Sakr & Liu, 2014).

Algunas ventajas que presenta el calentamiento óhmico en el procesamiento de alimentos son las siguientes: es uniforme, ya que el calor se genera internamente; no hay límite superior de temperatura; las temperaturas alcanzadas por calentamiento óhmico son mayores a las temperaturas de los procesos convencionales; la tasa de calentamiento es controlable, esta característica se logra al manipular la intensidad de campo eléctrico; el costo, los calentadores óhmicos han disminuido su precio, a medida que las fuentes de

poder son menos costosas y el número de fabricantes aumenta; la eficiencia energética, se logran en un 90% o más, por lo cual la mayoría de la energía es entregada a la matriz alimenticia; monitoreo *in situ* y control de alimentación directa, ofrece la posibilidad del monitoreo de entrada de energía y detectar cambios en los parámetros medidos como temperatura y corriente; amplia variedad de diseños, los calentadores óhmicos pueden diseñarse de varias formas ya sea continuos o en lote ya que el producto es parte de la configuración; no se generan efectos térmicos por efecto del campo eléctrico, puede ser una ventaja en la inactivación de microorganismos respecto a tratamientos térmicos (Ramaswamy *et al.*, 2014).

### 2.9.3 Uso del calentamiento óhmico en la industria de los alimentos

Las aplicaciones más comunes de esta tecnología están enfocadas al escaldado, evaporación, deshidratación, extracción, fermentación, calentamiento de alimentos para servir y pasteurización (Ramaswamy *et al.*, 2014; Wang & Sastry, 1997). Frecuentemente estas aplicaciones, son parte de un proceso para la producción de un alimento, más no es en sí un proceso como tal, del cual se obtenga productos terminados.

En alimentos sólidos, el calentamiento óhmico se ha usado en la descongelación de carne. Los resultados mostraron una menor pérdida de peso y una mayor rapidez de descongelamiento respecto al descongelamiento convencional, esto es muy importante ya que, durante el proceso de descongelamiento se pueden ver comprometidos la inocuidad por lo tanto la y calidad de la carne (Duygu y Ümit, 2015).

Respecto a compuestos nutraceuticos, se evaluó la degradación de antocianinas en la pulpa de arándanos. Los resultados mostraron una degradación similar respecto al calentamiento convencional, esto dependiendo del contenido de sólidos y la intensidad de campo (Sarkis *et al.*, 2013).

Se ha estudiado el calentamiento óhmico en el pelado de tomate, tratando de solucionar algunas desventajas medioambientales que presentan los métodos convencionales, ya que en estos se utiliza gran cantidad de agua e hidróxido de



sodio. El calentamiento óhmico mostró ser una buena opción para remediar estos problemas (Wongsa-Ngasri y Sastry, 2015).

#### 2.9.4 Calentamiento óhmico para la obtención de harinas nixtamalizadas de maíz

Gaytán-Martínez *et al.*, (2012), utilizaron un cocedor óhmico por lotes para obtener harinas nixtamalizadas de maíz. Los autores evaluaron el tamaño de partícula de molienda del maíz (0.5, 0.8 y 1.3 mm), la humedad (53 y 60% p/v) y la temperatura final de procesamiento (80 y 90°C). Los resultados mostraron que aplicando una humedad de 53% y a una temperatura de procesamiento de 90°C con un tamaño de partícula de 0.8 mm era posible obtener harinas nixtamalizadas con características funcionales similares a las obtenidas por el proceso tradicional, sin embargo, no se reportaron la calidad química.

Gaytán-Martínez *et al.*, (2012) utilizaron un cocedor óhmico por lotes para obtener harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico. Los autores evaluaron el tamaño de partícula (450, 525 y 600 micras), la humedad de procesamiento (45, 52.5 y 60% p/v) y la temperatura final de procesamiento (70, 80 y 90°C); aplicando una potencia de 1 W/g y evaluaron como estos parámetros afectaron la calidad funcional y química de las harinas procesados por calentamiento óhmico. Los autores reportaron que fue posible obtener harinas con mayor rendimiento de tortilla, mejor textura, mayor contenido de fibra dietética y mayor contenido de proteína cuando se comparaba con una harina comercial y una obtenida por el proceso tradicional de nixtamalización. Sin embargo, con la desventaja del cocedor óhmico por lote que no cumple con los requerimientos de producción de la industria.

Morales-Sánchez *et al.*, (2010) reportó el diseño de un aparato cocedor por calentamiento óhmico para alimentos, y en particular para producir masa y harina maíz nixtamalizada y productos derivados. El equipo es de flujo continuo, cuyas etapas son: molienda del grano entero, mezclado con agua caliente y cal, transporte a presión por una tubería de la mezcla, cocimiento de la mezcla por parte del calentador óhmico continuo y secado de la mezcla mientras fluye por la tubería. El equipo cuenta con dimensiones internas de la celda de 25 cm de longitud, 5 cm de ancho y 2 cm de alto, teniendo una capacidad volumétrica de

250 cm<sup>3</sup>. Cuenta con dos placas de acero inoxidable como electrodos conectadas a una fuente de corriente alterna. El equipo contiene un controlador de temperatura Watlow con un sensor de temperatura, un transformador de voltaje Variac de 60 Hz, un multímetro HP para medir la corriente y el voltaje y un controlador de velocidad Baldor para regular la velocidad del alimentador. Este equipo no genera efluentes contaminantes, el tiempo de procesamiento de nixtamal es muy corto, además que permite utilizar maíz quebrado, y es adaptable a la industria por ser un proceso continuo.

[Ménera-López et al., \(2013\)](#) utilizaron un cocedor de calentamiento óhmico continuo diseñado por [Morales-Sánchez et al., \(2010\)](#). Los autores evaluaron la velocidad de alimentación (10 y 20 rpm), la humedad de acondicionamiento (50 y 60% p/v) y la temperatura de procesamiento (75 y 85°C). Sus resultados mostraron que independientemente de las condiciones de procesamiento se obtenían características de calidad semejantes entre ellas, las cuales presentaban un rendimiento similar a las obtenidas por el proceso tradicional pero no con la textura adecuada para cumplir con la función de una tortilla (muy suaves).

Por lo anterior es menester, en el proceso de calentamiento óhmico continuo además de conocer sus propiedades fisicoquímicas, evaluar el efecto de cada variables así como encontrar las condiciones de operación donde se puedan obtener harinas con características similares a las obtenidas por el proceso tradicional, evaluando la energía consumida, los costos del proceso y reportando las características nutricionales, funcionales y nutracéuticas que presenta respecto a proceso tradicional.

#### 2.10 Parámetros de calidad funcional y química de harinas de maíz nixtamalizado que requiere la industria

De acuerdo a la norma [NMX-F-046-S-1980](#) por definición una harina de maíz nixtamalizado es el producto que se obtiene de la molienda de los granos de maíz (*Zea Mays* L.) sanos, limpios y previamente nixtamalizados y deshidratados y que cumplan con las especificaciones fisicoquímicas, las cuales se describen a continuación:

- Color: Debe ser blanco amarillento o característico de la variedad de grano empleado.
- Olor: Debe ser característico y no presentar signos de rancidez u otro olor extraño.
- Sabor: Debe ser característico del producto y no tener ningún sabor extraño.
- Aspecto: Debe ser granuloso con una finura tal que el 75% como mínimo pase a través de un tamiz de 0.250 mm de abertura de malla, tamiz NOM No. 24 M.-60 US.

La norma marca los parámetros máximos y mínimos que deben cumplir las harinas nixtamalizadas, en cuanto a su contenido químico (Tabla 1)

Tabla 1. Parámetros químicos que debe cumplir una harina nixtamalizada de maíz

<b>Especificaciones</b>	<b>Mínimas (%)</b>	<b>Máximas (%)</b>
Humedad	-	11
Proteínas (Nitrógeno x 6.25)	8.0	-
Cenizas	-	1.5
Extracto etéreo	4.0	-
Fibra cruda	-	2.0

Fuente: NMX-F-046-S-1980

Las características funcionales de las harinas nixtamalizadas de maíz no han sido definidas en la NMX-F-046-S-1980. La norma se refiere principalmente a las características físicas de una harina que se encuentran correlacionadas con su funcionalidad y con esto determinar su uso final de la harina o bien la severidad del proceso. Estas características son: la distribución del tamaño de partícula de las harinas, capacidad de absorción de agua, índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua, la viscosidad y propiedades reológicas de textura en masa (dureza y adhesión) (Gaytán-Martínez *et al.*, 2012).

La textura de las tortillas (fuerza de corte y resistencia a la tensión), rolabilidad, color y el sabor que afectan la calidad sensorial y por ende la aceptación por el

consumidos que nos permiten conocer la calidad de las mismas ([Gaytán-Martínez et al., 2013](#); [Mercado-Pedraza et al., 2014](#)).

### **3 JUSTIFICACIÓN**

En la industria de las harinas de maíz nixtamalizadas se sigue usando el proceso tradicional de nixtamalización, en consecuencia, se presentan algunos problemas tales como: periodos prolongados de proceso, gran cantidad de agua, efluentes contaminantes, ineficiencia energética, no se tiene control de temperaturas, además la pérdida de algunos nutrientes en el proceso de lavado.

El calentamiento óhmico que es una tecnología alternativa, que presenta grandes ventajas tales como: La no generación de efluentes contaminantes, aprovecha hasta un 95 % de la energía, se tiene control del proceso y el tiempo de proceso es muy cortos ([Ramaswamy et al., 2014](#)).

Investigaciones previas mostraron que el calentamiento óhmico en lote puede ser una opción para obtener una buena calidad funcional y química en harinas nixtamalizadas ([Gaytán-Martínez et al., 2012](#))

Por otro lado, se ha reportado que el desarrollo de un equipo de calentamiento óhmico continuo, sin embargo, aunque las harinas obtenidas presentaban un rendimiento similar a las obtenidas por el proceso tradicional, no mostraban la textura adecuada para cumplir con la función de una tortilla (muy suaves), por lo que no se logró encontrar las condiciones de operación del equipo.

Por lo anterior es necesario evaluar cómo afectan las variables de proceso al usar calentamiento óhmico continuo en la calidad funcional, química y nutracéutica de las harinas nixtamalizadas por este sistema.

### **4 OBJETIVOS**

#### **4.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de las condiciones de procesamiento en la calidad física, química y nutracéutica de harinas nixtamalizadas por un proceso de calentamiento óhmico continuo

#### **4.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre la calidad de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico.

- Evaluar el efecto de las variables de proceso sobre las propiedades reológicas y estructurales de harinas procesadas por calentamiento óhmico por lote.
- Evaluar el efecto de las variables de proceso sobre la calidad nixtamalera de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo.
- Seleccionar las condiciones de proceso que permitan obtener harinas nixtamalizadas con una buena calidad nixtamalera comparadas con harinas obtenidas por el proceso tradicional.
- Comparar nutricional y nutraceuticamente las harinas de calentamiento óhmico continuo, harinas obtenidas por el método tradicional y harina comercial.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Materiales y equipos

Los equipos a utilizar en la presente investigación son:

- Criba metálica de abertura de 5 mm
- Molino de nixtamal Nixtamatic (Capacidad 30-45 kg/hr)
- Molino Pulvex con malla 0,8 mm (Pulvex-200, Cabezal de martillo, Pulvex SA de CV, México, DF).
- Aparato cocedor de calentamiento óhmico por lote para obtener masa y harina de maíz nixtamalizada y productos derivados
- Aparato cocedor de calentamiento óhmico continuo para obtener masa y harina de maíz nixtamalizada y productos derivados. Patente con número de expediente MX/a/2010/004151
- Secador flash (Secador flash Tecnología de CINVESTAV-Querétaro, con capacidad de 50 kg/h).
- Molino de piedras (FUMASA, mod. US-25).
- Reómetro (Anton Para Physica Modelo MCR1-101, Australia)
- Texture Analyser TA-XT2 de 25 kg (Texture Technologies Corp., Scardale, N.Y./Stable Micro System, Godalming, Surrey, U.K.).
- Tortilladora manual de rodillos (Tortilladoras González, SA de CV. México).

**Materia prima:** El maíz será de uso comercial para obtención de tortillas proveniente de Sinaloa. Cosecha (2016). Se usará hidróxido de calcio grado alimenticio  $\text{Ca(OH)}_2$ ; agua purificada y harina comercial de más consumo en México.

## 5.2 Caracterización química del maíz

Los contenidos de proteína (método 954), lípidos (método 920.39) y cenizas (método 923.03) se determinarán conforme a los métodos de la [AOAC \(1990\)](#).

## 5.3 Obtención de harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional

Previo al procesamiento del maíz se sometió a una limpieza del maíz con el propósito de eliminar material dañado, podrido y cualquier impureza física. El procedimiento se efectuó con una criba metálica con apertura de malla de 5 mm.

El maíz limpio se coció en una vaporera de aluminio a fuego durante un tiempo de 20 a 25 minutos después de alcanzar una temperatura de  $90^\circ\text{C}$  y después se dejó reposar por 12 horas. La relación fue de 2 L agua/kg maíz, y 1.3 % de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Se procedió a decantar el agua de cocimiento llamado nejayote, el maíz cocido se enjuagó con agua limpia en una relación 1:2 respecto del peso del maíz crudo, se agitó para eliminar el exceso de  $\text{Ca(OH)}_2$  y pericarpio desprendido.

La masa obtenida se secó en un secador tipo flash, con una temperatura de entrada de  $270^\circ\text{C}$  y una temperatura de salida de  $40^\circ\text{C}$ . Las masas deberán de salir con una humedad por debajo de 10%. Una vez secada la masa, se molió con un molino Pulvex con malla de 0.5 mm. La temperatura de almacenamiento fue de  $4^\circ\text{C}$  en bolsas de plástico ([Mauricio et al., 2004](#)).

## 5.4 Obtención de harinas nixtamalizadas usando calentamiento óhmico

El maíz se molió con ayuda de un molino Nixtamatic con disco para molienda seca. El acondicionamiento de las harinas consistió en solvatar 3 g de hidróxido de calcio grado alimenticio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (El Topo, Monterrey, N. L. México) en 550 ml de agua a  $50^\circ\text{C}$  por cada kilo de maíz y mezclar durante 10 minutos en una mezcladora para harinas (Kitchen Aid, 2 kg de capacidad, St Joseph, Michigan, USA)

El material acondicionado se coció en celdas de calentamiento óhmico continuo y por lote. Se aplicó el voltaje de acuerdo al diseño de experimentos. El voltaje se controló de forma manual, la temperatura se midió por medio de un termopar tipo T que fue colocado al centro de los equipos.

Para monitorear el voltaje y obtener la potencia consumida se usó la ecuación 4 ([Gaytán-Martínez et al., 2012](#))

Ecuación 4

$$P = V^2/R$$

Donde P es la potencia (W), V es el voltaje aplicado a través de los electrodos (V) y R es la resistencia eléctrica (Ohm).

Una vez obtenida la masa por medio de los calentadores óhmico continuo y por lote se secó en un secador tipo Flash (Secador Flash Tecnología de CINVESTAV-Querétaro, con capacidad de 50 kg/h) con una temperatura de 270°C a 275°C y con una temperatura de salida de 40°C, esto se realizó con el objetivo de obtener una harina con una humedad de 8 a 11%, en seguida del secado se procedió a una molienda en un molino Pulvex (Pulvex 200, cabezal de martillo Pulvex, SA de CV, México, DF) con malla 0.5 mm. La harina seca se almacenó en bolsas a una temperatura de 4°C hasta su correspondiente análisis.

## 5.5 Caracterización física de harinas obtenidas por proceso tradicional y calentamiento óhmico continuo

### 5.5.1 Distribución del tamaño de partícula

La granulometría de las harinas se determinó utilizando los procedimientos descritos por [Bedolla y Rooney \(1984\)](#). Se procesaron muestras de 50 g en un equipo de tamizado Ro-Tap durante 10 minutos, se separaron y se procedió a pesar las fracciones retenidas en las diferentes mallas y fondo. Las mallas utilizadas fueron 14, 20,30, 40, 60, 80 y 100. La distribución obtenida en cada malla se reportó como el porcentaje de retención en cada malla en base a la muestra inicial de harina, se determinó según la ecuación 6:



## Ecuación 6

$$\%DTP = \left( \frac{g \text{ retenidos en cada malla}}{g \text{ muestra inicial de harina}} \right) \times 100$$

### 5.5.2 Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS)

La CAA se determinó de acuerdo a la metodología descrita por Arámbula *et al.* (2001). Se pesó 0.250 kg de harina y se agregó agua con una bureta, mezclando manualmente, hasta obtener una consistencia propia de una masa; el resultado se expresa como L de agua/kg de harina.

### 5.5.3 Perfil de viscosidad

El método a utilizar fue el método 61-02 aprobado AACCC (2000), con algunas modificaciones propuestas por Ménera-López *et al.*, (2013). Se usó un reómetro de la marca Anton Paar para determinar el perfil de viscosidad; se usaron 3 g de cada muestra de harina nixtamalizada de maíz de los diferentes métodos, se adicionó agua destilada hasta obtener un peso final de 21 g. Se utilizó un agitador a una velocidad de 169 rpm a una temperatura de 50°C durante 2 minutos para estabilización de temperatura y una distribución homogénea de partículas de las muestras. Cada muestra se llevó a 92°C con una tasa de incremento de 5.6°C/min, manteniendo la temperatura durante 5 minutos y continuando con un enfriamiento a 50°C con una tasa de 5.6°C/min. Con este perfil de temperatura se determinaron los valores de viscosidad máxima (cP), temperatura de pastificado (°C), viscosidad mínima (cP), viscosidad final (cP) y viscosidad de retrogradación (cP).

### 5.5.4 Propiedades térmicas de las harinas nixtamaliizadas

Para el análisis térmico se utilizó un equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC). 3 mg de muestra con tamaño de partícula de 250 µm (malla número 60) y 7 mg de agua destilada fueron colocados en un crisol de aluminio de 40 µL y sellados con una prensa Mettler Toledo. La muestra se colocó en el equipo y sometida a una rampa de calentamiento de 30 a 110°C con una tasa de 10°C/min. Por medio del termograma se obtuvieron los parámetros de gelatinización como son: temperatura de inicio (To), temperatura de pico (Tp) y entalpía de gelatinización (ΔHG) (Narváez-González *et al.*, 2006).

## 5.6 Caracterización de masas obtenidas por método tradicional y método por calentamiento óhmico continuo

### 5.6.1 Textura de masas

Se utilizó un texturometro Texture Analyser-TX2 para obtener valores de adhesividad y cohesividad en unidades de fuerza. Para la medición se tomó una porción de masa, la cual se moldeó con un anillo de dimensiones de 0.075 m de diámetro y 0.019 m de altura, en seguida se coloca en la plataforma del equipo, se penetra con la sonda esférica de metal con un diámetro con 0.022 m de diámetro. Los parámetros de medición fueron: velocidad de 0.02 m/s, 0.004 m de penetración y 4 repeticiones, representando la dureza que significa la fuerza máxima requerida para lograr la penetración y la adhesión representando la fuerza de resistencia a la salida de la esfera de 0.5 cm de diámetro (Gaytán-Martínez *et al.*, 2012).

### 5.6.2 Rendimiento de masa

Se determinó el rendimiento de masa de acuerdo a lo descrito por Mauricio *et al.*, (2004). El rendimiento se calcula a partir del valor obtenido de CAAS, sumándose una unidad al mismo; el valor se reportó como kg de masa/ kg de harina

## 5.7 Elaboración de tortillas obtenidas por el proceso tradicional y el proceso de calentamiento óhmico

Se elaboraron tortillas a partir de la masa obtenida de cada harina, con un diámetro de 12.5cm y un grosor de 1.2 mm. La tortilla se puso en un comal caliente con una temperatura de 270°C, el cocimiento duró 17 segundos por la primera cara, en el volteado fue de 50 segundos para la formación de la capa gruesa y nuevamente en la primera cara 17 segundos más para lograr el inflado de la tortilla. Se elaboraron 10 tortillas de cada tratamiento y se realizó por triplicado (Gaytán-Martínez *et al.*, 2012).

### 5.7.1 Inflado de tortilla

Esta prueba se determinó durante la etapa de cocimiento, donde se evalúa el tamaño de la ampolla de acuerdo a una escala subjetiva, se asignó una

calificación de 1 a 3, siendo 1 inflado completo, 2 inflado intermedio y 3 sin inflado (Figueroa *et al.*, 2001).

#### 5.7.2 Pérdida de peso en tortillas

La pérdida de peso es el contenido de humedad de la masa perdido durante el cocimiento de la tortilla que determinado por factores como temperatura y tiempo de cocimiento. Se determinó de acuerdo a lo reportado por Arámbula *et al.* (1999) usando la ecuación 7:

Ecuación 7

$$\%PP = \frac{(PT_{cruda} - PT_{cocida}) * 100}{PT_{cruda}}$$

Donde: PTcruda es el peso de la tortilla cruda y PTcocida es el peso de la tortilla cocida.

#### 5.7.3 Rendimiento de tortilla

Se determinó de acuerdo a lo reportado por Arámbula *et al.*, (1999). El rendimiento se evaluó en función al rendimiento de masa y a la CAAS. Para lo cual se usó la ecuación 8.

Ecuación 8

$$RT = \frac{PT_{cruda}}{PT_{cocida}} * RM$$

Dónde: RT= Rendimiento de tortilla en g de tortilla/ g de harina; PT= Peso de tortilla; RM= Rendimiento de masa en g masa/ g harina

#### 5.7.4 Rolabilidad

La determinación de este parámetro se realizó de manera subjetiva, por medio de una escala de 5 puntos. Se enrollaron en una vara de vidrio de 2 cm de diámetro. Asignando una calificación de 1 a la tortilla que no presentó ruptura, de 2 cuando se rompió aproximadamente el 25% del diámetro de la tortilla, de 3 si se rompió alrededor de 50%, de 4 con una ruptura de aproximadamente de 75% y de 5 cuando la ruptura de la tortilla fue completa. La prueba se llevó a

cabo después de 30 minutos de elaborada la tortilla a una temperatura ambiente (Mauricio *et al.*, 2004).

#### 5.7.5 Textura de tortillas

La textura de las tortillas se determinó por medio del método descrito por Arámbula *et al.*, (2001) y Mauricio *et al.*, (2004). Se eligieron 3 piezas al azar de cada tratamiento, de la parte del centro se corta con una probeta en forma de "I", con dimensiones de 8.9 cm de largo y 2 cm de ancho, la cual tiene en la parte central una parte más estrecha con dimensiones de 3.8 y 1.5 cm. Se utilizará un equipo Texture Analyzer TA-XT2, con accesorio TA-65 para sujetar la probeta de tortilla, los parámetros para realizar la prueba son una velocidad de 2 mm/s, distancia de 15 mm y una corrida por tortilla, por medio del software se determinó la fuerza máxima a la tensión.

La fuerza al corte se realizó con accesorio TA-90, que es una cuchilla de acero plana con 3 mm de espesor y 6.93 cm de ancho, esta punta se conecta al brazo en dirección hacia abajo cortando la tortilla perpendicularmente. Los parámetros usados en la medición fueron: velocidad de 2mm/s y 15 mm de distancia, se realizó 4 repeticiones por muestra.

#### 5.7.6 Color de las tortillas

Para la evaluación del color se utilizó un colorímetro Miniscan Hunter Lab midiendo directamente la cara más gruesa de la tortilla. Se obtuvieron los valores de luminosidad L con una escala de 0 (negro) a 100 (blanco). Así como la descomposición de la luz en colores básicos: la escala "a" que va del rojo al verde y la "b" del amarillo al verde.

### 5.8 Caracterización química de harinas obtenidas por el proceso tradicional y proceso por calentamiento óhmico continuo

De los resultados obtenidos en la caracterización funcional de las harinas procesadas por calentamiento sólo se eligió con ayuda de métodos estadísticos el mejor tratamiento que presente características similares a las de una harina obtenida por el proceso tradicional y/o una harina comercial. A estas se les realizó la caracterización nutricional y nutracéutica.

### 5.8.1 Caracterización nutricional

Se analizó la composición bromatológica de las harinas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico continuo, nixtamalización tradicional y harina comercial. La humedad, cenizas y extracto etéreo usando los métodos 934.01, 942.05 y 920.39 respectivamente de la [AOAC \(1990\)](#). EL contenido de proteína cruda se determinó usando el método aprobado 32.1.22 de la [AACC \(2000\)](#). Fibra cruda se determinó usando el método descrito por [Prosky \*et al.\*, \(1988\)](#)

### 5.8.2 Determinación de lisina

Se determinó según lo reportado por [Tsai \*et al.\* \(1975\)](#) modificado por [Galicia \*et al.\* \(2009\)](#). El método consistió en preparar un hidrolizado de la harina de maíz con papaína (con una concentración de 0.12 mcu) a  $65\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 16 h, una vez fría la muestra, se tomó 1 mL de solución y se colocó en una solución de carbonatos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$ ) 0.05 M con pH 9.0 y  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ , se agitó por 5 min y se centrifugó a 2000 rpm por 5 min. Un mililitro del sobrenadante y se mezcló con 0.1 mL de una solución de 2 cloro-3,5 dinitropiridina, se agitó vigorosamente, se dejó reposar por 2 h, agitando cada 30 min, se agregó HCl y se mezcló para homogenizar, se adicionó la solución extractora de acetato de etilo ( $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$ ) por inversión, se decantó y se extrajo la fase superior, repitiendo el procedimiento 3 veces. La mezcla se leyó a 390 nm contra un blanco de las soluciones usadas en la extracción, pero sin muestra.

Cien miligramos de muestra desengrasada se colocaron en tubos falcón y agregar 5 ml de solución de papaína, e incluir al menos 2 blancos y dos muestras de concentración de lisina conocida, se agitaron sobre un vortex y se procedió a una incubación a  $64^{\circ}\text{C}$  durante 16 horas. Una vez terminada la incubación se centrifugaron las muestras a 2500 rpm por 5 minutos.

### 5.8.3 Contenido de calcio

Se determinó de acuerdo al método [968,08](#) reportado por la [AOAC \(1990\)](#). El contenido de calcio residual se midió con un espectrómetro de absorción atómica de doble haz equipado con una lámpara de deuterio, fondo corrector y una lámpara de cátodo hueco. El equipo se operó con 12 psi de aire seco, 70 psi de acetileno, usando una flama de 422.7 nm, una corriente de la lámpara de 10

mA, y un ancho de rendija de 0.7 nm. Se realizó por triplicado reportándose la media y desviación estándar.

## 5.9 Cuantificación de compuestos nutraceuticos de harinas nixtamalizadas por diferentes tratamientos

### 5.9.1 Fibra dietética total

Se determinó usando el método descrito por [Prosky et al., \(1988\)](#). Se utilizó para determinar la fibra dietaria insoluble (FDI), fibra dietaria soluble (FDS) y la fibra dietaria total (FDT) en el alimento utilizando una combinación de procesos enzimáticos y gravimétricos.

Se pesó 1 g de muestra molida, seca y libre de grasa; se agregaron 50 ml de buffer de fosfatos de 0.08 M y 100 µL de α-amilasa termo-resistente ajustando el pH a 6.0±0.2 con NaOH 0.275 N, se incubó por 30 min a 75-100 °C, con agitación constante. La muestra se atemperó a 30°C, posteriormente se ajustó el pH a 7.5±0.2 mediante la adición de 10 mL de NaOH 0.275 N. Se adicionaron 100 µL de proteasa y se incubó por 30 min a 60 °C, con agitación constante. Se atemperó y se ajustó el pH a 4.0-4.6 adicionando 5 mL de HCL 0.375 N y se añadieron 300 µL de amiloglucosidasa incubando por 30 min a 60°C. La muestra se atemperó y se filtró utilizando papel filtro whatman no. 4 el residuo filtrado se lavó con 10 mL de agua y se colocó el papel filtro en estufa hasta peso constante. Para la determinación de la fibra soluble al sobrenadante obtenido se le adicionaron 4 volúmenes de etanol al 95% y se dejó reposar a temperatura ambiente por 12 h. El líquido se filtró en un papel filtro whatman no. 42 y se lavó con dos porciones de 10 mL de etanol al 75% y 2 porciones de acetona. El papel se colocó en una estufa con una circulación de aire a 105 °C, hasta peso constante. La fibra total se determinó por la suma de la fibra insoluble y la soluble.

### 5.9.2 Cuantificación de compuestos fenólicos

#### 5.9.2.1 Extracto metanólico (compuestos fenólicos libres)

Un gramo de la harina previamente desengrasada, se le adicionó 10 mL de metanol en un matraz protegido de la luz, este se agitó constantemente durante 24 h, posteriormente se centrifugó la suspensión a 5000 rpm por 10 min. El sobrenadante se recuperó, se colocó en un tubo protegido de la luz, y se utilizó en las siguientes determinaciones ([Cardador-Martínez et al., 2002](#)).

#### 5.9.2.2 Extracto de compuestos fenólicos ligados

Se utilizó la metodología descrita por [Adom y Liu \(2002\)](#) con algunas modificaciones. El pellet obtenido después de la extracción de compuestos fenólicos libres, se suspendió en 10 ml de NaOH 2M a temperatura ambiente. La muestra fue hidrolizada a 95 y 25°C en un baño con agitación a 60 rpm por 30 y 60 min, respectivamente. El hidrolizado se neutraliza con una cantidad apropiada de HCl. La solución final se lavó 5 veces con 10 mL de acetato de etilo y el volumen obtenido fue evaporado totalmente. Los compuestos fenólicos se suspendieron en 2 mL de metanol.

#### 5.9.2.3. Cuantificación de flavonoides totales

Se usó lo reportado por [Oomah et al., \(2005\)](#), el cual consiste en colocar 50 µL del extracto metanólico en una microplaca, seguido de 180 µL de metanol y 20 µL de una solución de 2-aminoetil-difenilborato al 1% en metanol. Se mezcló y se determinó su absorbancia en un espectrofotómetro a 404 nm.

La concentración de flavonoides se determinó usando una curva de calibración de rutina con un intervalo de 0 a 50 mg/mL, y los resultados se expresaron como mg equivalentes de rutina por gramo de muestra.

#### 5.9.2.4 Cuantificación de fenoles totales

La cuantificación de fenoles totales se realizó con base a la metodología de [Singleton y Rossi \(1965\)](#) 40 µL del extracto metanólico se mezclaron con 460 µL de agua y se adicionó el reactivo Folin-Ciocalteu (1:10). La reacción de oxidación se neutralizó con carbonato de sodio (7%), manteniendo en reposo durante 2 h en un frasco protegido de la luz. La absorbancia se determinó a 760 nm en un espectrofotómetro (UV-visible). El contenido de fenoles totales se determinó con la ayuda de una curva de calibración de ácido gálico expresados como mg equivalentes de ácido gálico/g de muestra.

### 5.9.3 Capacidad antioxidante

#### 5.9.3.1 Método ABTS

Se determinó de acuerdo a lo reportado por [Nenadis et al., \(2004\)](#) con algunas modificaciones, para la aplicación del método de ABTS 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico). Primeramente, 5 mL de una solución

acuosa de ABTS 7mM y 88  $\mu\text{L}$  de una solución de persulfato de potasio  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  140 Mm se mezcló, cuidando de que esté expuesto a la luz por 12 h, para la generación del radical. Terminado el tiempo, a 500  $\mu\text{L}$  de la solución se les agregaron 25 mL de etanol, teniendo cuidado de que la absorbancia esté entre 0.7 y 1 a 734 nm.

Se adicionaron 20  $\mu\text{L}$  en una microplaca de 96 pozos, así como metanol (blanco). Se les agregó 0.23 mL de solución ABTS, y se leyó al tiempo 0 y 5 min a 734 nm en un lector ELISA. Debe tenerse cuidado de mantener las placas cubiertas (evitando contacto con la luz) y a una temperatura de 27°C.

El porcentaje de inhibición se calculó con la siguiente (ecuación 9):

Ecuación 9

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{(1 - A_{\text{muestra}}) * 100}{A_{\text{control}}}$$

Dónde: % inhibición es la actividad antioxidante de la muestra;  $A_{\text{muestra}}$  es la absorbancia de la muestra a 734 nm y  $A_{\text{control}}$  es la absorbancia del control a 734 nm. Los resultados de capacidad antioxidante se expresaron como  $\mu\text{mol}$  equivalentes de trolox/g de muestra.

#### 5.9.3.2 Método DPPH

Se adicionaron 0.02 mL de extracto metanólico y 0.2 mL de solución de DPPH (150  $\mu\text{M}$ ) en una placa de 96 pozos. Las placas se leyeron a 0, 10, 30, 60, 90 y 120 min a 520 nm en un espectrofotómetro. Las placas se mantienen cubiertas y en la obscuridad a temperatura ambiente.

La actividad antirradical (ARA) se calcula como porcentaje de inhibición de DPPH, usando la siguiente ecuación 10 (Burda y Oleszek, 2001):

Ecuación 1

$$ARA = \left( 100 \left| \frac{1 - A_{\text{muestra}}}{A_{\text{control}}} \right. \right)$$



Donde;  $A_{\text{muestra}}$ = la absorbancia de la muestra a 520 nm y  $A_{\text{control}}$ = la absorbancia de control (ausencia de antioxidante).

#### 5.10 Diseño experimental y análisis estadístico

Equipo CO por lote: Se realizó un análisis aleatorio con un arreglo factorial de 2x2x3 variables independientes: Voltaje (120 y 130 V), temperatura (85 y 90°C) y tiempo de procesamiento (0, 5, y 10 min).

Equipo CO continuo: Se realizó un análisis aleatorio con un arreglo factorial 3x2) las variables independientes fueron: Temperatura (80, 85, 90°C) y velocidad de alimentación (5, 10 rpm).

En los dos casos los datos obtenidos a partir de los resultados se analizaron a través de un análisis de varianza (ANOVA), se expresan como la media  $\pm$  desviación estándar seguido de una comparación de medias por la prueba de Dunnett ( $p \leq 0.05$ ). Los controles usados fueron harina de nixtamal y una harina comercial. El análisis nutricional y nutracéutico se comparó por las diferencias entre las medias (Método de Tukey).

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 6.1 Distribución de tamaño de partícula de maíz (*Zea mays* L.) molido para la producción de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico

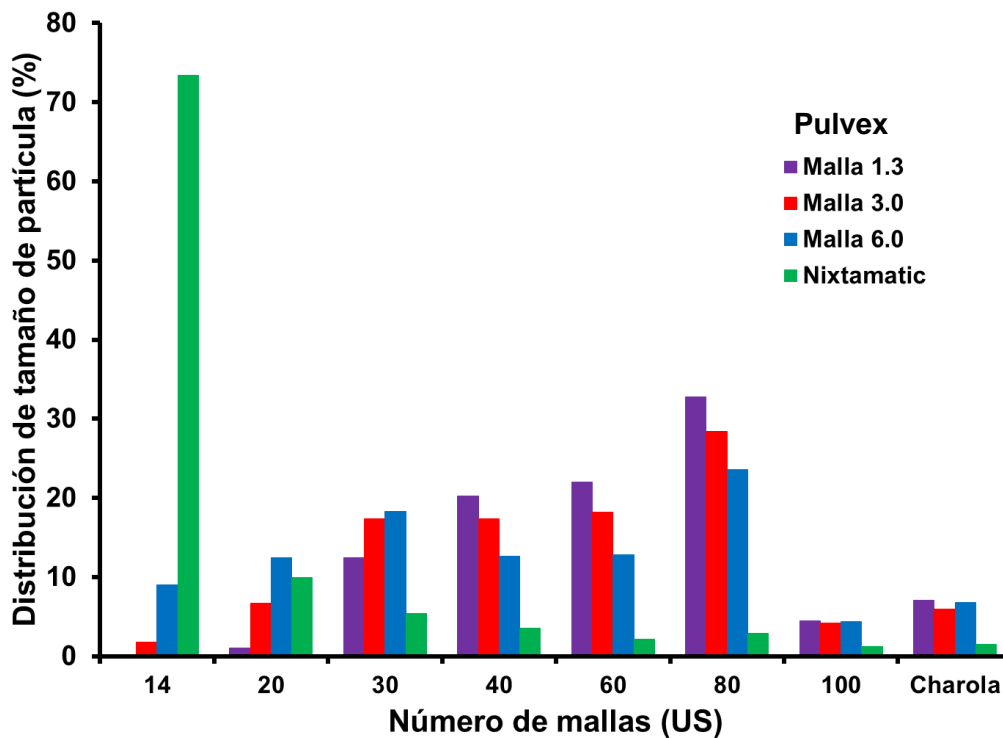
La distribución de tamaño de partícula está estrechamente relacionada con el tipo de molienda y el tipo de molino. Las partículas grandes tienen menor área de contacto entre ellas y entre las superficies del equipo, por ende, son afectadas en menor grado por la temperatura que las partículas más finas (Carvalho *et al.*, 2010).

El tamaño de partícula definido en la molienda del maíz para el procesamiento de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico tendrá consecuencias en la funcionalidad del producto final deseado. Cuando el maíz se muele se ocasiona un daño mecánico en el almidón, este daño incrementa cuando la molienda es fina que en partículas de mayor tamaño. Por ende, las partículas finas son más

propensa a sufrir gelatinización por efecto de temperatura y efecto eléctrico en partículas más finas (Morrison *et al.*, 1994).

La distribución de tamaño de partícula (DTP) para el maíz molido, usando un molino tipo Pulvex y Nixtamatic se muestra en la Figura 4. Se puede observar que al usar las mallas 1.3 mm, el 66.26% del maíz molido presentó un tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$  (No. 60) que representa partículas finas (Figura 4). Un tamaño de partícula en el intervalo de finos se puede presumir que está relacionada con un exceso de trabajo y por consecuencia con un mayor daño de almidón, además de ser susceptible a una mayor gelatinización por efecto de las condiciones de procesamiento. Ménera-López *et al.*, (2013) utilizó una molienda usando una malla 1.3 mm, donde al procesar por calentamiento óhmico resultaba en harinas con un alto grado de gelatinización que ocasionaba tortillas con una textura no adecuada.

Sin embargo, al usar malla de mayor diámetro (3 mm) usando el molino PULVEX, la distribución de tamaño de partícula no presentó diferencias significativas con la DTP del maíz molido usando la malla 1.3 mm (56.84%) sin embargo estas últimas fueron diferentes de la DTP del maíz molido usando malla 6 (47.6%) usando el mismo molino. De cualquier modo, el tamaño de partícula predominante sigue siendo menor a 250  $\mu\text{m}$ . Lo anterior se puede deber a que el molino Pulvex es un molino de alta velocidad adaptado con un rotor de muelas lo que ocasiona un daño mecánico. En base con lo anterior se decidió usar un molino de configuración diferente.



**Figura 4.** Distribución de tamaño de partícula de maíz molido Pulvex (1.3, 3 y 6 mm) y Nixtamatic

El porcentaje DTP para el maíz usando un molino Nixtamatic se muestra en la Figura 4. Se observa que el 7% del maíz molido fue retenido en mallas menores a 250  $\mu$ , predominando el material retenido fue en la malla No. 14, que representa un tamaño de partícula de 1410  $\mu$ m, por lo que este tipo de molino presenta menor daño mecánico. Por lo anterior, el maíz usado para la presente investigación fue molido con ayuda de un molino NIXTAMATIC.

## 6.2 Parámetros eléctricos de las harinas nixtamalizadas al ser procesadas por calentamiento óhmico por lote

En la Figura 5, se presentan los conductigramas obtenidos al procesar el maíz, hidróxido de calcio y agua usando un calentador óhmico por lote. Esto se realizó debido a que al usar calentamiento óhmico es importante determinar las propiedades eléctricas del material a procesar.

El primer parámetro a determinar fue la razón de calentamiento, que se obtiene por la sustracción de la temperatura final menos la temperatura inicial entre el

número de ciclos durante el procesamiento. El programa de calentamiento para las muestras procesada a 120 V fue de 16°C/ min y para las muestras procesadas a 130 V fue de 19°C/min. Lo anterior se debe a que al aplicar mayor potencial se tiene una potencia mayor por lo que el calentamiento es más rápido. La potencia aplicada al alimento se calcula aplicando la Ley de Joule, cuando se conoce la resistencia del alimento. En principio el alimento tiene las mismas condiciones de inicio y por lo tanto la misma resistencia de inicio, la cual se muestra en la Figura 5.

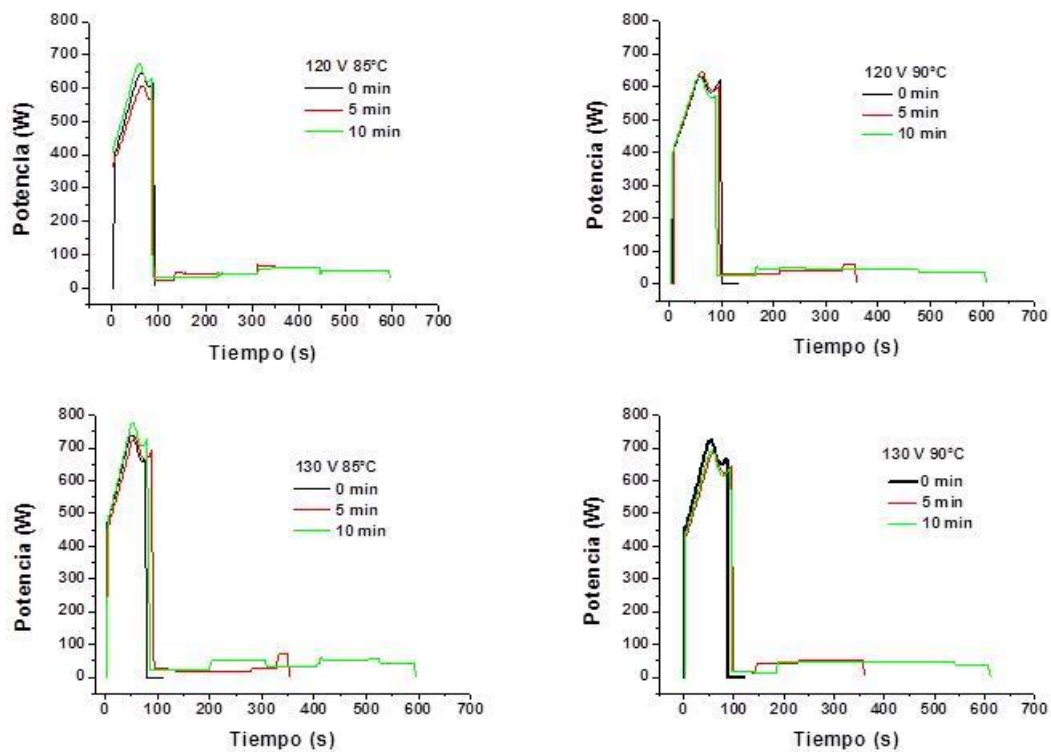


Figura 5. Conductigramas de procesamiento de harinas por calentamiento óhmico por lote

La resistencia del material se obtiene mediante la ecuación 11:

Ecuación 11

$$R=V/I$$

Dónde: R es la resistencia eléctrica ( $\Omega$ ); V es el voltaje aplicado a través de los electrodos (V) e I es la corriente eléctrica.

En promedio la resistencia del material fue de 36.5 Ohms y por lo tanto la potencia aplicada se obtiene de ecuación 4:

Ecuación 4

$$P=V^2/R$$

Dónde: P es la potencia (W); V es el voltaje aplicado a través de los electrodos (V) y R es la resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).

Para las harinas procesadas con 120 V la potencia aplicada fue de 400 watts y para 130 V de 470 watts; es decir, cuando se aplican diferentes voltajes se tiene diferentes potencias, y la potencia influye en la razón de calentamiento; a mayor potencia más rápido se calienta es decir mayor razón de calentamiento. [Gaytán-Martínez et al., \(2012\)](#) menciona que la potencia necesaria para obtener harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico de buena calidad es de 1 W/g, lo que coincide con lo encontrado en el presente trabajo, independientemente del voltaje aplicado. El efecto en tiempo es que tarda menos en llegar a su temperatura y por lo tanto lo que se espera es que haya menor daño al almidón, por lo tanto, menor material gelatinizado siempre y cuando se considere únicamente el efecto de temperatura y no la potencia aplicada.

Independientemente del voltaje aplicado y la temperatura, a mayor tiempo de procesamiento tendrá un mayor cocimiento por lo que se verá reflejado tanto en viscosidad como en gelatinización.

Con respecto al voltaje, se espera que, a un potencial de 120 V a 85°C a 10 minutos, el material tenga menor cocimiento que a 130 a 85° C a 10 minutos. Puede suponerse que el factor que influye es la razón de calentamiento (menor tiempo para alcanzar la temperatura máxima), cuyo resultado esperado es que la muestra procesada a 130 V muestre menor cocimiento. Sin embargo, si estadísticamente no es diferente entonces la suposición será que el tiempo de mantenimiento tiene más peso en el cocimiento (temperatura) que la razón de

calentamiento es decir del potencial. Y que el parámetro importante es el tiempo de mantenimiento. En resumen, si el tiempo de procesamiento es menor, el parámetro que influye es el voltaje, en tanto que a mayores tiempos de proceso el parámetro que influye en la calidad de las harinas es la temperatura.

### 6.3 Caracterización física de harinas obtenidas por proceso tradicional y calentamiento óhmico

#### 6.3.1 Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS)

En la producción de tortilla el contenido de agua que la harina pueda absorber representa un parámetro importante desde el punto de vista económico, ya que impacta de manera directa el rendimiento de masa e influye en las propiedades funcionales de esta misma. La capacidad de absorción de agua está directamente relacionada con el porcentaje de gelatinización, tamaño de partícula, porcentaje de daño de almidón y presencia de gomas naturales derivadas de la hidrólisis del pericarpio, en el caso de harinas comerciales incorporación de aditivos ([Gaytán Martínez et al., 2000](#)).

Los resultados (Tabla 2) mostraron que la temperatura, tiempo y la interacción de voltaje con temperatura tuvieron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en la capacidad de absorción de agua en las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico. Se observó que a temperatura de 90°C y 10 min de procesamiento se tienen mayor capacidad de absorción de agua. La prueba de Dunnett mostró que las harinas obtenidas por calentamiento óhmico no fueron diferentes estadísticamente ( $p < 0.05$ ) con respecto al control de nixtamal, excepto los tratamientos con condiciones de 120 V, 90° C con un tiempo de 5 y 10 minutos que mostraron un valor más alto. Respecto a la harina comercial, las harinas procesadas por calentamiento óhmico presentaron valores significativamente más bajos ( $p < 0.05$ ); sin embargo, las harinas comerciales están adicionadas con gomas lo que hace que retengan más agua ([Flores Farías et al., 2002](#)).

Tabla 2. Capacidad de absorción de agua subjetiva de harinas nixtamalizadas

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>CAAS* (L de agua/ kg de harina)</b>
120	85	0	0.92 ± 0.05 <sup>A</sup>
120	85	5	0.97 ± 0 <sup>A</sup>
120	85	10	1.01 ± 0.02 <sup>A</sup>
120	90	0	1.03 ± 0 <sup>A</sup>
120	90	5	1.05 ± 0.02 <sup>a,A</sup>
120	90	10	1.05 ± 0 <sup>a,A</sup>
130	85	0	0.98 ± 0.01 <sup>A</sup>
130	85	5	1.01 ± 0.02 <sup>A</sup>
130	90	10	1.02 ± 0.01 <sup>A</sup>
130	90	0	1.01 ± 0.02 <sup>A</sup>
130	90	5	1.03 ± 0 <sup>A</sup>
130	90	10	1.04 ± 0.01 <sup>A</sup>
Harina nixtamal			0.97 ± 0.02
Harina comercial			1.32 ± 0.04

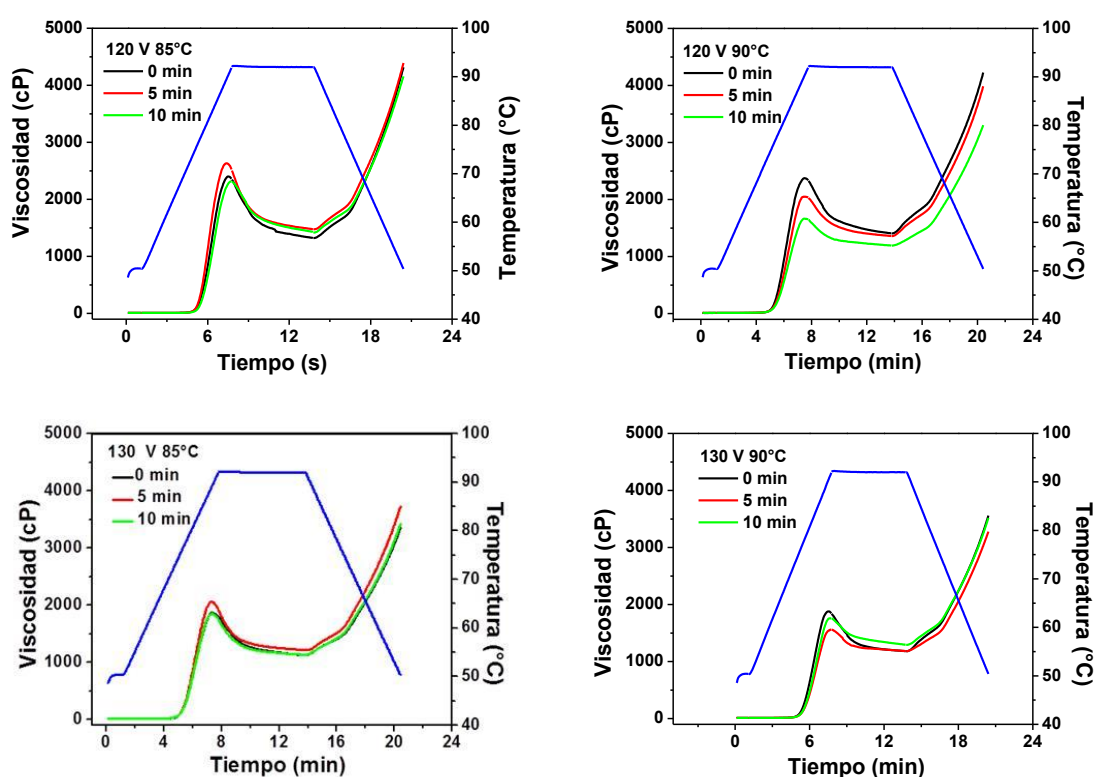
Medias seguidas con letra “a” y “A” en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. \*CAAS: Capacidad de absorción de agua en harinas.

### 6.3.2 Perfil de viscosidad de harinas por calentamiento óhmico

Las propiedades reológicas del almidón principal carbohidrato del maíz, están influenciadas por parámetros intrínsecos como la fuente botánica, forma y tamaño del gránulo de almidón, contenido de amilosa y amilopectina y orden original de estas moléculas en el gránulo de almidón (Vega-Rojas *et al.*, 2017) y de factores extrínsecos como: proceso de nixtamalización, tipo de molienda y proceso de secado, en el presente trabajo únicamente se evaluaron estos últimos factores. El perfil de viscosidad depende en gran parte del grado de gelatinización de los gránulos de almidón y de la velocidad de descomposición molecular y los cambios en el perfil de viscosidad se rigen por las

transformaciones físicas y estructurales inducidas por el calor, cambiando el sistema de gránulos de almidón en agua a un hidrogel (Carvalho *et al.*, 2010; Rincón-Londoño *et al.*, 2016).

En cada una de los gráficos que se muestran en la Figura 5 el decremento en el pico de viscosidad se puede explicar considerando que los tratamientos que han tenido un mayor tiempo de cocción, muestran una mayor cantidad de almidón gelatinizado. El pico de la viscosidad máxima está asociado con la formación del hidrogel por la interacción maíz-cal- agua, lo que representa razón principal del incremento de la viscosidad (Villada *et al.*, 2017).



**Figura 5.** Viscoamilogramas de harinas por calentamiento óhmico por lote

La viscosidad máxima y la viscosidad de retrogradación (La viscosidad de retrogradación se obtiene de la diferencia entre la viscosidad final y viscosidad mínima) (Tabla 3) de los tratamientos por calentamiento óhmico son significativamente diferentes respecto al control de harina de nixtamal y a la harina comercial ( $p < 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de Dunnett, todos ellos con valores por debajo de los controles. En general, el tiempo de procesamiento y el



aumento de temperatura tienen un efecto en la disminución de la viscosidad máxima y de retrogradación. La viscosidad nos permite conocer el grado de modificación del gránulo de almidón ocasionado por el tratamiento ([Villada et al., 2017](#)).

Entonces los valores bajos de viscosidad pueden relacionarse con el tamaño de partícula asociados con las temperaturas de procesamiento. La velocidad de calentamiento de las partículas en un fluido depende de: (i) las conductividades relativas de las fases del sistema y de (ii) el volumen relativo de esas fases ([Sarang et al., 2007](#)), en el caso de las harinas procesadas la conductividad eléctrica fue afectada por el voltaje. Se ha reportado que partículas sólidas de baja conductividad, como es el caso del maíz se calientan más lentamente que el líquido que las circunda. Sin embargo, en condiciones donde la concentración de las partículas es alta, esas mismas partículas de baja conductividad pueden calentarse más rápido que el fluido circundante. Por lo tanto, el fenómeno depende de la importancia de la resistencia parcial de las partículas a la resistencia total del circuito ([Sastry y Palaniappan, 1992](#)). Este fenómeno ocurre, con el aumento de la concentración de las partículas, el camino de la corriente eléctrica a través del fluido se vuelve más tortuoso, forzando un mayor porcentaje de la corriente a pasar a través de las partículas. En el caso del maíz hay que considerar que el componente principal es el almidón el cual tiende a hincharse al entrar en contacto con el agua y la temperatura, lo que puede dar como resultado mayores tasas de generación de energía dentro de los gránulos, lo que se ve reflejado en una mayor gelatinización es decir en viscosidades más bajas (Figura 5).

Otra posible causa de la baja viscosidad puede estar asociada al procesamiento del maíz integral. [Qiu et al. \(2015, 2016\)](#) sugieren que las gomas presentes en la fibra del pericarpio son absorbidas por los gránulos de almidón y forman complejos con la amilosa por medio de enlaces de hidrógeno intermoleculares o redes de cadenas. Además, cuando el peso molecular de las fibras o gomas aumenta, disminuye la lixiviación de amilosa. Fenómeno que se puede asociar con la disminución de la viscosidad máxima, lo anterior se puede confirmar debido a la adición de fibras o gomas disminuye la retrogradación durante el

enfriamiento, produciendo sistemas de gel más estables, mismo que se observa en los resultados obtenidos en la Figura 5.

La viscosidad de retrogradación (Viscosidad de retrogradación = Viscosidad final – Viscosidad mínima) es la re-asociación molecular que se produce durante el enfriamiento y el almacenamiento lo cual forma una estructura ordenada pero diferente a la estructura original del almidón (Wang *et al.*, 2015). En cuanto a este parámetro en la Tabla 3 se puede observar que entre las harinas por calentamiento óhmico no hay diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con valores en un intervalo de 2189-2789 cP, pero si son diferentes estadísticamente a los controles de nixtamal y harina comercial (4280 y 4449 cP, respectivamente).

Durante la cocción de la tortilla se gelatinizan los gránulos de almidón que no han gelatinizado durante la nixtamalización del maíz, gran parte de la amilosa se vuelve insoluble cuando el producto se ha enfriado a temperatura ambiente (Cornejo-Villegas *et al.*, 2010). La retrogradación implica una recristalización rápida de moléculas de amilosa seguido de una recristalización lenta de moléculas de amilopectina (Colussi *et al.*, 2017). La retrogradación de la amilopectina requiere más tiempo y temperatura más baja e implica la asociación de sus ramificaciones externas. Por lo que la retrogradación de amilopectina comienza tiempo después que el producto ha sido enfriado además es responsable del desarrollo a largo plazo de la estructura del gel y la cristalinidad del almidón procesado, que están relacionado con el endurecimiento de los productos de panadería (Gray y Bemiller, 2003; Kelekci *et al.*, 2003; Colussi *et al.*, 2017).

Tabla 3. Propiedades reológicas de harinas por calentamiento óhmico por lote, harina por el proceso tradicional y harina comercial

Variable de proceso			Variable respuesta	
Voltaje (V)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	V <sub>máx</sub> (cP)	Retrogradación (cP)
120	85	0	2244 ± 204 <sup>a, A</sup>	2789 ± 305 <sup>a, A</sup>
120	85	5	2381 ± 292 <sup>a, A</sup>	2772 ± 194 <sup>a, A</sup>
120	85	10	2114 ± 217 <sup>a, A</sup>	2555 ± 259 <sup>a, A</sup>
120	90	0	2179 ± 289 <sup>a, A</sup>	2622 ± 235 <sup>a, A</sup>
120	90	5	1903 ± 186 <sup>a, A</sup>	2418 ± 222 <sup>a, A</sup>
120	90	10	1699 ± 46 <sup>a, A</sup>	2190 ± 69 <sup>a, A</sup>
130	85	0	1882 ± 170 <sup>a, A</sup>	2330 ± 256 <sup>a, A</sup>
130	85	5	1961 ± 180 <sup>a, A</sup>	2416 ± 181 <sup>a, A</sup>
130	85	10	1774 ± 89 <sup>a, A</sup>	2254 ± 64 <sup>a, A</sup>
130	90	0	1861 ± 63 <sup>a, A</sup>	2381 ± 42 <sup>a, A</sup>
130	90	5	1748 ± 139 <sup>a, A</sup>	2274 ± 148 <sup>a, A</sup>
130	90	10	1730 ± 52 <sup>a, A</sup>	2217 ± 63 <sup>a, A</sup>
Harina nixtamal			4887 ± 4	4281 ± 123
Harina comercial			4717 ± 42	4450 ± 202

Medias seguidas con letra "a" y "A" en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. V<sub>máx</sub>: Viscosidad máxima. Retrogradación = Viscosidad final – Viscosidad mínima.

Todas las harinas obtenidas por calentamiento óhmico presentan una viscosidad de retrogradación similar, muy bajas comparadas con harinas de nixtamal y harina comercial. La viscosidad de retrogradación está asociado a la sinéresis del almidón al enfriarse el producto almidonado cocido, esto se agrava cuando

hay un mayor contenido de amilosa en el almidón (Alamri *et al.*, 2013; Sandhu y Singh, 2007) y por consecuencia a la tasa de retrogradación del almidón y pérdida de textura durante el almacenamiento de la tortilla. De forma general altas viscosidades de retrogradación se asocian a una tasa elevada de retrogradación del almidón que afecta la pérdida de textura de la tortilla, sin embargo es deseable en algunas aplicaciones, como en producción de cereales debido a su capacidad de modificación de la estructura, propiedades sensoriales y mecánicas del producto (Rohlfing, 2009; Wang *et al.*, 2015).

Por lo tanto, las harinas generadas por calentamiento óhmico tienen bajas tasas de retrogradación, factor responsable del endurecimiento de la tortilla después del almacenamiento, lo que se vería reflejado en tortillas más suaves. Por otro lado, la retrogradación se asocia a la disminución de la digestibilidad del almidón lo que provoca que los alimentos a base de almidón bajen el valor de índice glicémico (Colussi *et al.*, 2017).

### 6.3.3 Propiedades térmicas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico

Las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico presentan valores de temperatura inicial y pico ( $T_o$  y  $T_p$ ) de gelatinización significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) de la harina de nixtamal y comercial (Tabla 4). Las temperaturas finales de las harinas por calentamiento óhmico fueron iguales a la harina comercial, con excepción de la muestra procesada a 130 V, 90°C y 10 min usando calentamiento óhmico. Se puede sugerir que este incremento en las temperaturas de transición de gelatinización es provocado por el tratamiento de calentamiento óhmico, el cual puede ser atribuido a un mayor colapso del orden cristalino dentro de los gránulos del almidón (Barichello *et al.*, 1990 ).

Variables de proceso			Variable respuesta					
Voltaje (V)	Temperatura (°C)	Tiempo (Min)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)	Gelatinización (%)
120	85	0	65.82 <sup>A</sup>	72.45 <sup>a</sup>	79.84	14.01	3.97	48.44
120	85	5	66.14 <sup>a, A</sup>	72.63 <sup>a</sup>	80.83	14.69	4.66 <sup>A</sup>	39.49 <sup>A</sup>
120	85	10	66.91 <sup>a, A</sup>	73.21 <sup>a, A</sup>	81.35 <sup>a</sup>	14.44	4.21	45.39
120	90	0	66.73 <sup>a, A</sup>	73.3 <sup>a, A</sup>	81.19 <sup>a</sup>	14.46	3.74	51.49
120	90	5	66.8 <sup>a, A</sup>	73.72 <sup>a, A</sup>	81.08 <sup>a</sup>	14.27	3.02	60.76
120	90	10	67.11 <sup>a, A</sup>	73.87 <sup>a, A</sup>	81.26 <sup>a</sup>	14.15	2.78 <sup>a</sup>	63.94 <sup>a</sup>
130	85	0	66.66 <sup>a, A</sup>	73.04 <sup>a, A</sup>	80.4	13.73	3.69	52.14
130	85	5	66.17 <sup>a, A</sup>	73.22 <sup>a, A</sup>	81.15 <sup>a</sup>	14.98	3.28	57.39
130	85	10	66.65 <sup>a, A</sup>	73.22 <sup>a, A</sup>	79.01	12.36 <sup>A</sup>	3.17	58.88
130	90	0	67.35 <sup>a, A</sup>	73.81 <sup>a, A</sup>	80.88	13.53	3.48	54.86
130	90	5	66.71 <sup>a, A</sup>	73.46 <sup>a, A</sup>	80.91	14.19	3.02	60.76
130	90	10	67.56 <sup>a, A</sup>	74.21 <sup>a, A</sup>	82.3 <sup>a, A</sup>	14.74	4.38	43.19
Harina nixtamal			65.10	70.97	78.96	13.86	4.24	44.94
Harina comercial			64.39	71.63	79.57	15.18	3.0	61.02

Tabla 4. Propiedades térmicas de harinas por calentamiento óhmico, harina nixtamalizada por el proceso tradicional y harina comercial.

Medias seguidas con letra “a” y “A” en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett.. To: temperatura inicial; Tp: Temperatura pico; Tf: Temperatura final;  $\Delta T = T_f - T_o$ ;  $\Delta H$ : Entalpía; Respecto a la entalpía del maíz crudo

La transición de gelatinización se puede observar como un pico endotérmico, este proceso fue afectado por la temperatura y el tiempo de procesamiento. En la Figura 7, se observa la entalpía, la cual disminuye conforme aumenta la temperatura y el tiempo de procesamiento. El voltaje también presentó efecto significativo en la entalpía, provocando una disminución de esta.

Los valores bajos de entalpía se han asociado con un alto porcentaje de gelatinización, estos valores se determinaron respecto al maíz crudo por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Gelatinización} = (1 - (\Delta H_o - \Delta H_m)) \times 100$$

Donde  $\Delta H_o$  es la entalpía de las muestras procesadas por calentamiento óhmico y  $\Delta H_m$  es la entalpía de maíz sin procesar.

Las harinas procesadas a 130 V presentaron los mayores valores de gelatinización respecto a los del control de nixtamal, lo cual es evidencia de mayor transformación del gránulo de almidón.

La temperatura de transición de gelatinización de las harinas está relacionada con el grado de cristalinidad del almidón (Singh *et al.*, 2003). Un aumento en la temperatura de transición ( $T_p$ ) es proporcional al aumento de cristalinidad del almidón lo que provoca mayor estabilidad en el almidón y por ende lo hace más resistente a la gelatinización (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2009). Los resultados obtenidos sugieren que el tiempo de procesamiento afecta el incremento de la temperatura de gelatinización, así como la disminución de la entalpía posiblemente una estructura mayor ordenada.

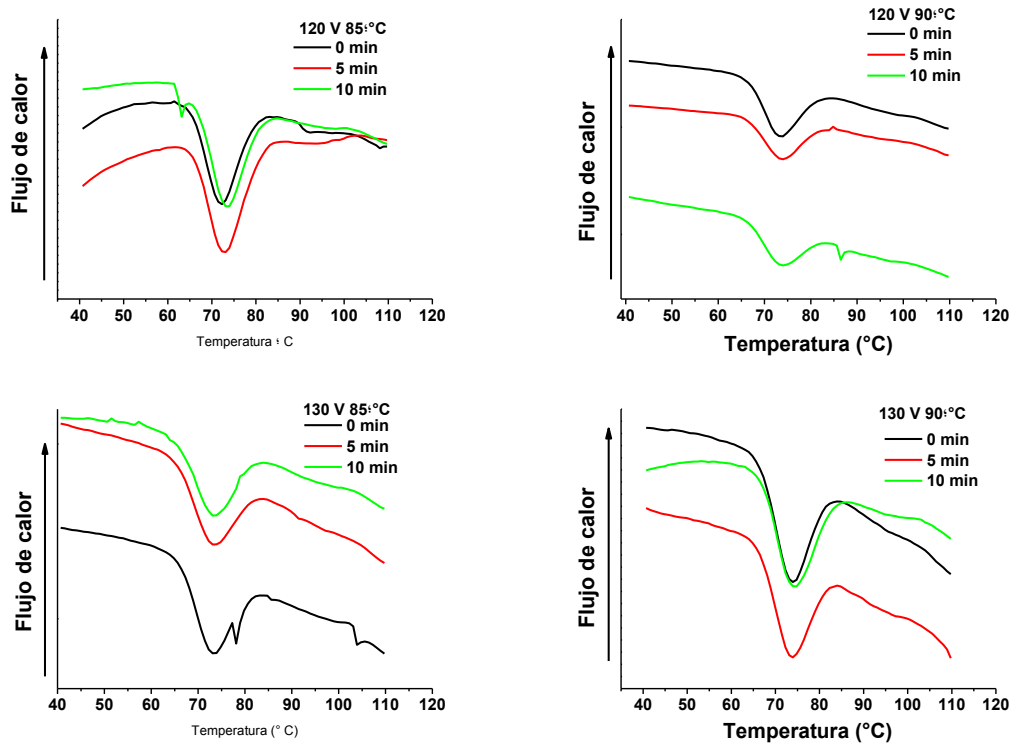


Figura 6. Termogramas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico por lote

Además, las temperaturas de transición de gelatinización del almidón han sido asociadas al grado de cristalinidad del almidón, lo que las relaciona, a su vez, al grado de estabilidad estructural de los gránulos de almidón (Guzmán *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2003). Sin embargo, estos datos son contrarios a lo que se esperaría debido a las bajas viscosidades obtenidas en las harinas procesadas por calentamiento óhmico, sin embargo los valores de gelatinización no muestran alto grado de gelatinización.

La electroporación es la formación de poros en las membranas celulares, aumentando la permeabilidad provocada por un campo eléctrico, esto se hace intencionalmente para procesos de extracción de solutos (Lima y Sastry, 1999; Zhu *et al.*, 2015). La Figura 8 presenta las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras tratadas por calentamiento óhmico. Se puede observar gránulos de almidón gelatinizados, así como la formación de poros. El fenómeno de electroporación es más visible cuando se aplica voltaje de 130 V, en tanto que en las muestras procesadas con potencial de 120 V los poros son apenas visibles. Sin embargo, a la temperatura



de 90°C durante 10 min, los tratamientos por calentamiento óhmico presentan un mayor grado de gelatinización.

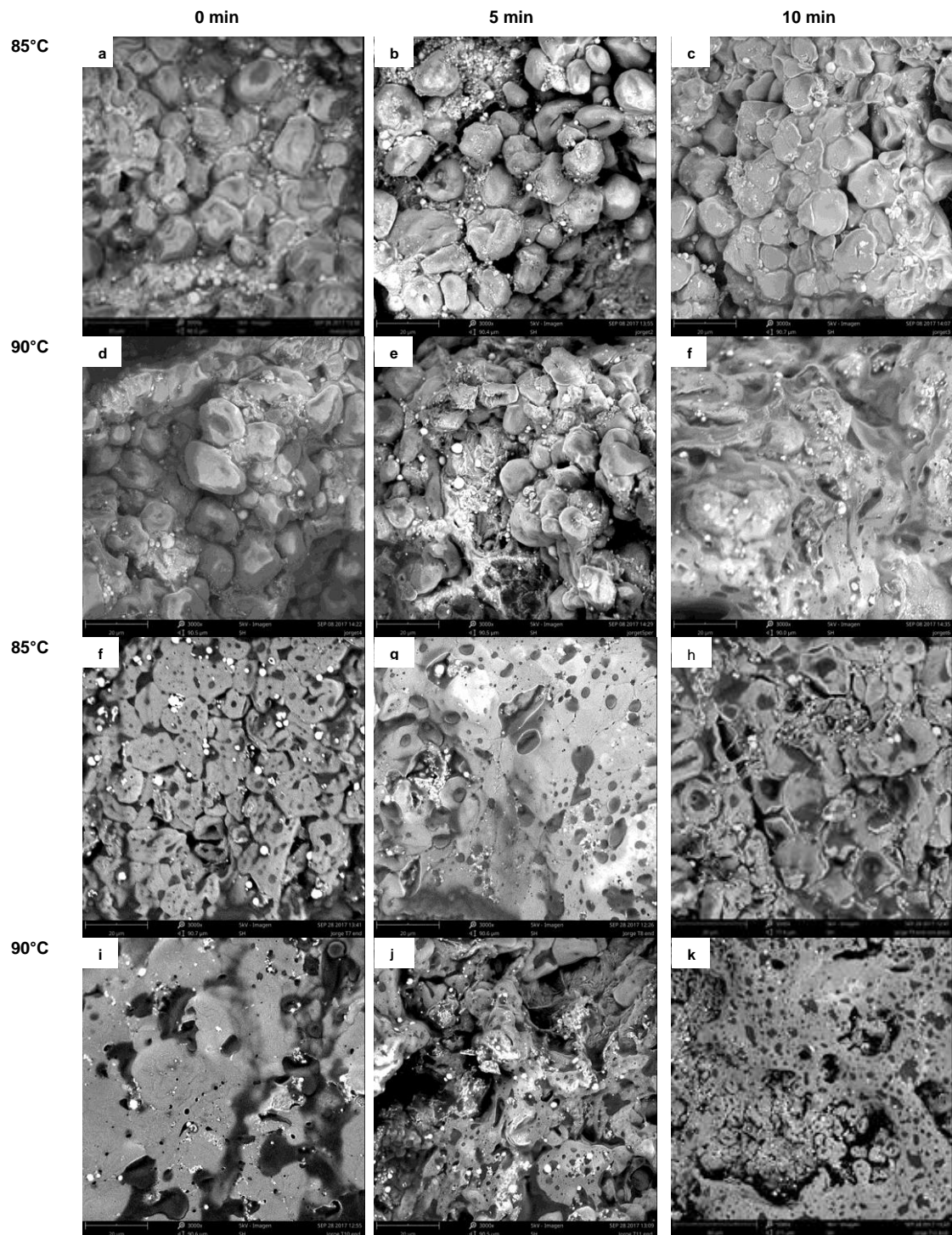


Figura 7. Micrografías de maíz nixtamalizado por calentamiento con 120 V (a, b, c, d, e, f) y 130 V (g, h, i, j, k, l) a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento

Sun *et al.*, (2008) reportan que el calentamiento óhmico puede presentar daño celular no térmico debido al campo eléctrico. La razón principal del efecto adicional del tratamiento óhmico puede ser su baja frecuencia (generalmente 50-60 Hz), lo que permite que las paredes celulares acumulen cargas y formen poros, los cuales se pueden observar principalmente en las muestras tratadas a 130 V. Por lo que entonces, el hecho de que se tengan bajas viscosidades en las harinas procesadas por calentamiento óhmico está asociado no solo a la gelatinización sino también con la electroporación de los gránulos de almidón.

#### 6.3.4 Color de tortillas

A partir de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico se elaboraron tortillas y fueron caracterizadas en cuanto a sus propiedades funcionales (datos no mostrados debido a que no mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ )), sin embargo, el color, fue el parámetro afectado en las tortillas.

La evaluación de color de las tortillas fue determinada 30 minutos después de elaboradas (20° C). Los datos de color obtenidos para el parámetro de luminosidad (L) no muestran diferencias significativas entre los tratamientos con un intervalo de 56.45 a 58.87, ni tampoco con el control de nixtamal con un valor de 63.11 pero sí difieren significativamente ( $p < 0.05$ ) con del control de harina comercial que presentó el valor más alto (72.24) (Tabla 6). Los resultados para el parámetro (a) no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos por calentamiento óhmico. En el parámetro (b) la intensidad de la coloración amarilla en los tratamientos por calentamiento óhmico presenta un intervalo de 16.88 a 17.54, no presenta diferencias significativas respecto a las tortillas elaboradas con nixtamal con valor de 17.61 pero sí respecto al control de tortillas de harina comercial donde estas presentan una menor intensidad de coloración amarilla con un valor de 14.43.

Las tortillas preparadas con harina comercial presentaron mayor luminosidad (L) y menor coloración amarilla, esto puede ser debido a que en el proceso industrial

no se permiten tiempos largos de reposo evitando las reacciones entre los pigmentos naturales como flavonoides y la cal, este efecto si se refleja en el proceso tradicional aumentando la coloración amarilla y disminuyendo la luminosidad debido a la caramelización y las reacciones de Maillard (Ruiz-Gutiérrez *et al.*, 2012).

La norma ISO 12647-2 se aplica a los estándares de impresión, entre otras muchas definiciones, aborda los umbrales de tolerancia para delta E, que es la diferencia entre dos muestras de color, conocido como el  $\Delta E$  o lo que es lo mismo el error delta o el “delta E”. Donde la letra griega delta es usada en matemáticas para denotar diferencia y la “E” proviene del término alemán Empfindung o Sensación, por lo que su traducción literal es la “diferencia de sensación” que percibimos al exponernos a dos colores (NOM-ISO 12647-2).

Hay varias fórmulas para el cálculo de delta E, siendo la más común y sencilla de implementar la CIE76  $\Delta E^* = ((L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2)^{1/2}$ . Si  $\Delta E^*$  se aproxima a 2.3 siendo en todo caso inferior a 3, estaríamos hablando del JND por sus siglas en inglés “just noticeable difference” que lo podríamos traducir como “diferencia apenas perceptible” que se produce entre dos niveles de intensidad de un estímulo sensorial. O lo que es lo mismo, una diferencia de color muy difícilmente apreciable. Esta calidad de color la podemos clasificar de acuerdo a la Tabla 5.

El fenómeno de color puede ser atribuido a reacciones de Maillard, debido a que las muestras procesadas a 130 V presentan mayor gelatinización por lo tanto mayor disponibilidad de azúcares disponibles por lo que la reacción puede ser favorecida (Gómez *et al* 1987).

Tabla 5. Clasificación de umbrales de tolerancia en base con la norma ISO 12647-2

$\Delta E^*$	Calidad
1	Excelente
1-2	Buena
2-4	Normal

Con base en la referencia todos los tratamientos por calentamiento óhmico procesados a 120 V excepto el tratamiento con condiciones de 90° C y 10 min tienen un valor de  $\Delta E^*$  con una calidad suficiente, no así todos aquellos tratamientos que fueron procesados a 130 V donde tiene valores mayores a 5 representando una calidad mala.

Con los resultados anteriores obtenidos por calentamiento óhmico por lote, nos dieron las herramientas necesarias para elegir las condiciones adecuadas de procesamiento para obtener harinas por calentamiento óhmico continuo. Para la elección de voltaje, se consideró solamente 120 V debido a que las tortillas elaboradas con harinas procesadas con 130 V no cumplieron los parámetros de calidad en la evaluación sensorial de color, además de que estas mismas harinas presentaban valores mayores de gelatinización.

#### 6.4 Selección de los parámetros a usar en calentamiento óhmico continuo

Debido a que las harinas procesadas por calentamiento óhmico a 120 V las que presentaron menor grado de gelatinización lo que se ve reflejado en un color aceptable, fue el voltaje que se usó en el cocedor óhmico continuo. El equipo continuo tiene una cámara de calentamiento 25 x 5 x 2 cm lo que representa un volumen de 250 cm<sup>3</sup>, por lo tanto, para mantener la harina dentro de la celda y evaluar el efecto de la temperatura y voltaje, se usó una velocidad de alimentación de 5 y 10 rpm, con el fin de que se tuvieran los tiempos de 5 y 10 min que representan los tiempos de procesamiento usados en lote.

Tabla 6. Parámetros de color de tortillas obtenidas por harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico, tradicional y comercial.

Variables de proceso			Variables respuesta				
Voltaje (V)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	L	a	b	ΔE	ΔE <sup>2</sup>
						Harina nixtamal	Harina comercial
120	85	0	58.29 ± 0.16 <sup>A</sup>	2.26 ± 0.47 <sup>A</sup>	17.30 ± 0.63 <sup>A</sup>	4.88	14.91
120	85	5	58.38 ± 1.95 <sup>A</sup>	2.12 ± 0.15 <sup>A</sup>	16.99 ± 0.70 <sup>A</sup>	4.81	14.27
120	85	10	58.79 ± 1.51 <sup>A</sup>	1.90 ± 0.04 <sup>A</sup>	17.12 ± 0.89 <sup>A</sup>	4.36	13.87
120	90	0	58.15 ± 3.13 <sup>A</sup>	2.05 ± 0.00 <sup>A</sup>	17.29 ± 0.64 <sup>A</sup>	4.99	14.54
120	90	5	58.87 ± 4.56 <sup>A</sup>	2.01 ± 0.52 <sup>A</sup>	17.16 ± 0.49 <sup>A</sup>	4.29	13.81
120	90	10	56.89 ± 2.01 <sup>A</sup>	2.41 ± 0.19 <sup>a, A</sup>	17.07 ± 0.31 <sup>A</sup>	6.31	15.78
130	85	0	55.53 ± 1.29 <sup>A</sup>	2.44 ± 0.15 <sup>a, A</sup>	17.23 ± 0.28 <sup>A</sup>	7.64	17.14
130	85	5	56.61 ± 2.21 <sup>A</sup>	2.32 ± 0.24 <sup>a, A</sup>	17.06 ± 0.78 <sup>A</sup>	6.57	16.04
130	90	10	56.45 ± 1.10 <sup>A</sup>	2.68 ± 0.07 <sup>a, A</sup>	17.21 ± 0.28 <sup>A</sup>	6.77	16.28
130	90	0	57.13 ± 2.69 <sup>A</sup>	2.3 ± 0.08 <sup>A</sup>	17.17 ± 0.57 <sup>A</sup>	6.05	15.55
130	90	5	56.78 ± 3.42 <sup>A</sup>	2.28 ± 0.33 <sup>A</sup>	16.88 ± 0.09 <sup>A</sup>	6.42	15.84
130	90	10	58.06 ± 2.03 <sup>A</sup>	2.43 ± 0.01 <sup>a, A</sup>	17.54 ± 0.55 <sup>A</sup>	5.13	14.74
Harina nixtamal			63.11 ± 1.21	1.53 ± 0.03	17.61 ± 0.10	Referencia	Referencia
Harina comercial			72.24 ± 0.10	-0.14 ± 0.10	14.43 ± 0.38	Referencia	Referencia

Medias seguidas con letra "a" y "A" en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. Control 1: Harina comercial; Control 2: Harina nixtamal.

## 6.5 Caracterización de harinas nixtamalizadas usando un equipo de calentamiento óhmico continuo

### 6.5.1 Caracterización física de harinas

En la Figura 9 se presentan en los viscoamilogramas obtenidos de las harinas nixtamalizadas. Las harinas nixtamalizadas usando un equipo de calentamiento óhmico continuo mostraron diferencias significativas en el perfil de viscosidad respecto a la harina obtenida por el proceso tradicional y una harina comercial. Las harinas nixtamalizadas por óhmico continuo presentaron valores de viscosidad máxima entre 994 a 1380 cP, en tanto que la harina nixtamalizada de 4887 cP y la harina comercial de 4717.

Las diferencias en los valores de viscosidad se pueden deber a la gelatinización del almidón o bien a la electroporación que se genera por el potencial aplicado durante el tratamiento óhmico. Se puede observar que conforme aumenta la temperatura de procesamiento, la viscosidad disminuye, por lo que se puede inferir que se tiene mayor grado de gelatinización. Además, sumar el efecto de electroporación (que es la formación de poros en las membranas celulares lo que las hace permeables provocado por un campo eléctrico), se ve reflejado en bajos valores de viscosidad.

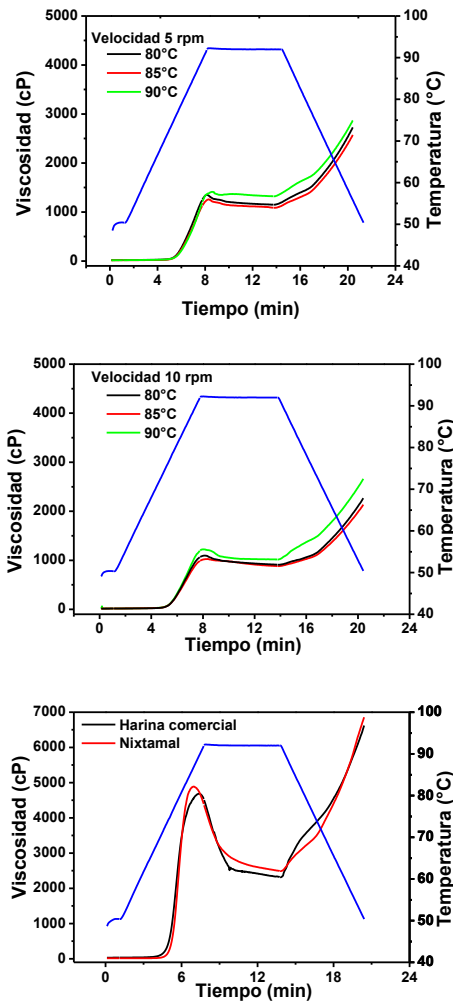


Figura 8. Perfil de viscosidad de harinas nixtamalizadas por diferentes procesos. Primero y segundo viscoamilogramas tratamientos por calentamiento óhmico con diferentes condiciones de proceso

Otra posible causa, como ya se mencionó es la hidrólisis de los xilanos, presentes en el pericarpio del maíz, ya que se ha sugerido que estos pueden interactuar con la amilosa formando complejos. Por lo que los complejos hacen que se tenga menos lixiviación de amilosa lo que provoca la disminución de la viscosidad (Qiu *et al.*, 2015, 2016).

Una ventaja de la interacción de la amilosa con los xilanos u otras gomas presentes en el pericarpio del maíz es que disminuye la retrogradación, lo que concuerda con los resultados obtenidos ya que las harinas procesadas por

calentamiento óhmico continuo presentan valores de retrogradación más bajos comparados con la harina tradicional y comercial (Tabla 7).

Tabla 7. Retrogradación de los diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, harina por el proceso tradicional y harina comercial

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Retrogradación (cP) <sup>2</sup>
90	10	1591 ± 109 <sup>a, A</sup>
85	10	1234 ± 128 <sup>a, A</sup>
80	10	1311 ± 48 <sup>a, A</sup>
90	5	1578 ± 54 <sup>a, A</sup>
85	5	1503 ± 16 <sup>a, A</sup>
80	5	1508 ± 21 <sup>a, A</sup>
Harina nixtamal		4281 ± 128
Harina comercial		4450 ± 203

Medias seguidas con letra “a” y “A” en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente. Vmax: Viscosidad máxima. Viscosidad de retrogradación = Viscosidad final – Viscosidad mínima.

### 6.5.2 Propiedades térmicas de harinas nixtamalizadas

Los resultados de las propiedades térmicas de las harinas procesadas por calentamiento óhmico continuo, tradicional y la harina comercial se presentan en la Tabla 8. Las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo, harina de nixtamal y harina comercial mostraron una transición endotérmica de 69-84, 65-79 y 64-80° C respectivamente. Las harinas obtenidas por calentamiento óhmico mostraron valores de temperatura inicial, pico y final ( $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_f$ ) de gelatinización significativamente ( $p < 0.05$ ) mayores a las de nixtamal y harina comercial, sin embargo el  $\Delta T$  no es diferente estadísticamente. Lo anterior es importante porque representan el gasto energético que se tiene al procesar la masa a tortilla. Esto es una evidencia de reacomodo del almidón, y los resultados están de acuerdo con la literatura que indica que el incremento de la temperatura en las propiedades térmicas es causado por la modificación del almidón en el proceso de nixtamalización (Figueroa *et al.*, 2013; Rendon-Villalobos *et al.*, 2002), en este caso por calentamiento óhmico. En cuanto a la entalpía, los tratamientos con condiciones de 85° C y 10 rpm y 80° C y 5 rpm no



son significativamente diferentes a la harina comercial; sin embargo, todas las harinas procesadas por óhmico son estadísticamente diferentes a la harina procesada por el método tradicional. Por lo tanto,  $\Delta T$  y  $\Delta H$  menores en las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico indicando menor estabilidad de la región cristalina durante el calentamiento y mayor desorganización de las dobles hélices de las cadenas de amilopectina, reflejándose en un mayor porcentaje de gelatinización.

Tabla 8. Propiedades térmicas de los diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	To (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)	Gelatinización (%)
90	10	69.65 <sup>a, A</sup>	75.80 <sup>a, A</sup>	82.50 <sup>a</sup>	12.85	1.79 <sup>a, A</sup>	76.71 <sup>a, A</sup>
85	10	69.42 <sup>a, A</sup>	75.47 <sup>a, A</sup>	82.50 <sup>a</sup>	13.08	2.39 <sup>a</sup>	68.93 <sup>a</sup>
80	10	69.42 <sup>a, A</sup>	75.64 <sup>a, A</sup>	82.39 <sup>a</sup>	12.97	2.30 <sup>a, A</sup>	70.10 <sup>a, A</sup>
90	5	71.27 <sup>a, A</sup>	77.38 <sup>a, A</sup>	83.93 <sup>a, A</sup>	12.66	1.46 <sup>a, A</sup>	80.99 <sup>a, A</sup>
85	5	70.76 <sup>a, A</sup>	76.56 <sup>a, A</sup>	84.50 <sup>a, A</sup>	13.74	2.15 <sup>a, A</sup>	72.11 <sup>a, A</sup>
80	5	70.84 <sup>a, A</sup>	76.74 <sup>a, A</sup>	83.60 <sup>a, A</sup>	12.77	2.33 <sup>a</sup>	69.77 <sup>a</sup>
Harina nixtamal		65.10	70.97	78.96	13.86	4.15	46.17
Harina comercial		64.39	71.63	79.57	15.18	3.07	60.18

Medias seguidas con letra "a" y "A" en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. To: temperatura inicial; Tp: Temperatura pico; Tf: Temperatura final;  $\Delta T = T_f - T_o$ ;  $\Delta H$ : Entalpía; Respecto a la entalpía del maíz crudo

### 6.5.3 Capacidad de absorción de agua subjetiva de harinas nixtamalizadas

La capacidad de absorción de agua subjetiva es una propiedad importante de las harinas de maíz nixtamalizadas, con un interés económico, debido a que impacta directamente en el rendimiento de masa y por ende de tortilla (Gaytán-Martínez *et al.*, 2012). En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS) de las harinas procesadas por calentamiento óhmico, tradicional y una harina comercial. La CAAS de las harinas procesadas por calentamiento óhmico fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ ) respecto al control de harina de nixtamal ( $0.98 \pm 0.02$  l de agua/kg de harina), presentando valores superiores a esta (1.18-1.33 l de agua/kg de harina).

Tabla 9. Capacidad de absorción de agua subjetiva de los diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	CAAS (l agua/ kg harina)
90	10	$1.24 \pm 0.01^a$
85	10	$1.18 \pm 0.02^{a, A}$
80	10	$1.21 \pm 0.01^{a, A}$
90	5	$1.33 \pm 0.04^a$
85	5	$1.22 \pm 0.02^{a, A}$
80	5	$1.26 \pm 0.01^a$
Harina nixtamal		$0.98 \pm 0.02$
Harina comercial		$1.32 \pm 0.04$

Medias seguidas con letra "a" y "A" en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. CAAS: Capacidad de absorción de agua subjetiva (l de agua / kg harina).

Los valores de CAAS que presentan las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico representan una ventaja desde el punto de vista económico ya que tendrá un mayor rendimiento de masa. Las harinas procesadas a 90° C de temperatura, 10 y 5 rpm y 80° C de temperatura con 5

rpm usando calentamiento óhmico no son diferentes significativamente ( $p < 0.05$ ) de la harina comercial. Lo anterior es importante ya que las harinas comerciales están adicionadas de gomas (Flores-Farías *et al.*, 2002) en tanto que las harinas nixtamalizadas usando calentamiento óhmico no se les adicionó ningún aditivo, lo que implica un ahorro y obteniendo de igual manera la ventaja económica que representa una harina con un valor alto de CAAS. Jiménez-Pérez *et al.* (2015), demostraron que para valores altos de CAAS, la masa es moldeable y las tortillas son más fácil de enrollar, lo cual corresponde con los resultados encontrados en la presente investigación.

Gaytán-Martínez *et al.* (2012) reporta valores de CAAS de harinas procesadas por calentamiento óhmico en lote, de 1.19 a 1.31 L de agua/kg de harina, similares a los reportados en el presente trabajo.

#### 6.6 Caracterización de masas obtenidas por método tradicional y método por calentamiento óhmico

La firmeza o dureza de la masa está determinada por la variedad de maíz, dureza del grano, condiciones de molienda, condiciones de secado, la absorción de agua de la harina y el porcentaje de gelatinización del almidón (Bedolla y Rooney, 1984). La textura de la masa es crucial durante la producción de tortillas. Tanto, en el proceso industrial como en el tradicional, la masa debe ser cohesiva para permitir la formación de una lámina y por lo tanto, favorecer su corte y conformado de discos redondos, pero si es demasiado cohesiva, no se puede formar en tortillas (Antuna *et al.*, 2008; Quintanar Guzmán *et al.*, 2009).

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos en los tratamientos obtenidos por calentamiento óhmico, el proceso tradicional y harina comercial, los cuales no presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en adhesión y cohesión, lo que significa que las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico no deberán tener problemas en el troquelado de la tortilla. En la nixtamalización de las harinas usando calentamiento óhmico el grano se utiliza de manera integral lo que implica que no se pierden los polisacáridos contenidos en el pericarpio. Estos tienen propiedades funcionales como agentes espesantes, estabilizantes, emulsionantes y formadores de gel (Gurkin, 2002). Por lo anterior, las gomas naturales del pericarpio representan una ventaja debido a que mejora la calidad

de la tortilla, las hace más fácil de enrollar después que han sido almacenadas (Twillman and White, 1988).

Los valores obtenidos para el rendimiento de masa en las harinas nixtamalizadas usando calentamiento óhmico continuo (Tabla 10), presentaron un intervalo de 2.18-2.26 kg harina/kg, mayores que la harina de nixtamal por el proceso tradicional (1.97 kg harina kg de masa). En cuanto a la harina comercial (2.32 kg harina/ kg de masa), las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico usando 90° C con 10 y 5 rpm y 80° C y 5 rpm mostraron valores iguales desde el punto de vista estadístico.

Tabla 10. Caracterización de masas obtenidas por diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial de harinas por calentamiento continuo.

Variables de proceso		Variables respuesta		
Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Rendimiento de masa*	Cohesión (g/F)	Adhesión (g/F)
90	10	2.24 ± 0.01 <sup>a</sup>	120.70 ± 7	12.65 ± 0.9
85	10	2.18 ± 0.02 <sup>a,A</sup>	99.84 ± 16.5	13.00 ± 2
80	10	2.20 ± 0.01 <sup>a, A</sup>	87.12 ± 2.8	10.65 ± 0.6
90	5	2.32 ± 0.04 <sup>a</sup>	119.16 ± 15.6	12.15 ± 2.2
85	5	2.2 ± 0.01 <sup>a, A</sup>	121.85 ± 9	12.61 ± 2.9
80	5	2.26 ± 0.01 <sup>a</sup>	106.38 ± 8.3	9.81 ± 0.5
Harina nixtamal		1.97 ± 0.02	101.89 ± 9.3	10.41 ± 0.6
Harina comercial		2.32 ± 0.04	106.03 ± 8.5	12.24 ± 1.9

Medias con letra "a" y "A" muestran diferencias significativas (p < 0.05) con control de harina de nixtamal y harina comercial respectivamente. \*kg harina/ kg masa

### 6.7 Caracterización de tortilla

Los valores obtenidos para el rendimiento de tortilla usando harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo presentaron valores de 1.77 a 1.81 kg tortilla/ kg harina, valores estadísticamente diferentes respecto a los rendimientos presentado en la harina nixtamalizadas de forma tradicional (1.43 kg tortilla/ kg harina) y la harina comercial (1.60±0.18 kg de tortilla/kg de harina).

Un alto rendimiento de tortilla trae importantes beneficios comerciales para la industria de la tortilla ya que casi la mitad del peso de la tortilla es debido al agua.

Para el valor de pérdida de peso para tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo presentaron un intervalo de 19.76 a 20.75%, no mostraron diferencias significativas con las tortillas elaboradas con harina de nixtamal de forma tradicional ( $20.75 \pm 1.49\%$ ) así como con tortillas elaboradas con harina comercial ( $19.29 \pm 2.46\%$ ). [Gaytán-Martínez et al., \(2012\)](#) reportaron que este parámetro es reflejo de las interacciones de los componentes de la masa lo que permiten retener más agua y al recalentarse se producen tortillas más suaves. La literatura reporta para tortillas obtenidas por el proceso tradicional valores que van 16 a 20%, además que se menciona que para obtener una tortilla con textura óptima debe tener una pérdida menor al 20% ([Arámbula-Villa et al., 2001](#)), por lo que las tortillas elaboradas con harinas por calentamiento óhmico están dentro de este intervalo.

[Gaytán-Martínez et al., \(2012\)](#) reportaron que la fuerza al corte simula la acción de los molares, así como la fuerza a la tensión en el análisis textura de la tortilla simula el rompimiento con la mano, estos parámetros reflejan la textura de la tortilla. Se busca que las harinas nixtamalizadas permitan obtener tortillas suaves. Los valores de corte obtenidos para las diferentes harinas se muestran en la Tabla 11. Los valores para fuerza al corte en tortillas obtenidas de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo (810-1043 g-F) presentaron diferencias significativas respecto a las tortillas obtenidas de nixtamal (1502 g-F). Sin embargo, las tortillas obtenidas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico no muestran diferencias significativas con las tortillas obtenidas de harina comercial lo que sugiere una suavidad similar. [Figueroa et al., \(2001\)](#) reporta valores de 14.2 a 9.19 N (1447 a 937 g-F) para tortillas suaves, fáciles de morder, valores similares a los obtenidos en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico.

Tabla 11. Parámetros de calidad funcional de diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial.

Variables de proceso		Variables respuesta			
Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	RT	PPT	Corte (g/F)	Tensión (g/F)
90	10	1.80 ± 0.05 <sup>a</sup>	20.08 ± 2.46	1043.18 ± 50.1 <sup>a</sup>	128.29 ± 8.21 <sup>a</sup>
85	10	1.80 ± 0.01 <sup>a</sup>	19.84 ± 0.84	967.95 ± 151 <sup>a</sup>	121.17 ± 33.7 <sup>a</sup>
80	10	1.81 ± 0.001 <sup>a</sup>	19.36 ± 0.04	810.27 ± 41 <sup>a</sup>	107.86 ± 13.76 <sup>a</sup>
90	5	1.77 ± 0.02 <sup>a</sup>	21.07 ± 1.26	820.66 ± 73.2 <sup>a</sup>	110.67 ± 24.13 <sup>a</sup>
85	5	1.80 ± 0.02 <sup>a</sup>	19.79 ± 1.19	890.39 ± 73.6 <sup>a</sup>	124.03 ± 5.27 <sup>a</sup>
80	5	1.78 ± 0.02 <sup>a</sup>	20.75 ± 1.24	1008.93 ± 28.6 <sup>a</sup>	115.42 ± 0.55 <sup>a</sup>
Harina nixtamal		1.43 ± 0.11	20.75 ± 1.49	1502.89 ± 34.2	221.62 ± 54.67
Harina comercial		1.60 ± 0.18	19.29 ± 2.46	993.4 ± 170.2	157.53 ± 17.65

Medias con letra "a" y "A" muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con control de harina de nixtamal y harina comercial respectivamente. RT: Rendimiento de tortilla (kg de tortilla/ kg de harina); PPT: Pérdida de peso en tortilla (% pérdida de peso).

En cuanto a la fuerza de tensión (Tabla 11), las tortillas obtenidas de harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico mostraron valores menores (07-128 g-F) y fueron diferentes estadísticamente respecto al control de tortillas de nixtamal (221 g-F), no así para tortillas del control de harina comercial ( $p < 0.05$ ). Los resultados mostraron que las tortillas elaboradas por calentamiento óhmico son igual de suaves que las obtenidas con harina comercial. Es importante recordar que en las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico, el maíz se procesa integral, es decir no se pierde el pericarpio. El pericarpio de maíz está formado por celulosa, hemicelulosa, lignina, en los cuales incluyen arabinosilanos, estos compuestos son gomas naturales que contribuyen con la retención de agua y la suavidad de las tortillas (Qiu *et al.*, 2015, 2016).

Tabla 12. Parámetro de calidad de tortilla durante la cocción obtenidas de diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial

Variable de proceso		Variable respuesta	
Temperatura (°C)	Tiempo (rpm)	Rolabilidad	Inflado
90	10	1± 0	1± 0
85	10	1± 0	1± 0
80	10	1± 0	1± 0
90	5	1± 0	1± 0
85	5	1± 0	1± 0
80	5	1± 0	1± 0
Harina nixtamal		1± 0	1± 0
Harina comercial		1± 0	1± 0

Rolabilidad (1= no presenta ruptura, 2= 25 % ruptura, 3= 50 % ruptura, 4= 75 % ruptura y 5= ruptura completa. Inflado (1= inflado completo, 2= Inflado intermedio y 3= sin inflado).

El inflado de tortilla no presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico, las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas de forma tradicional y con harina comercial (Tabla 12). Durante la cocción de las tortillas se forma una capa delgada y una gruesa, la capacidad que presenta la capa delgada de formar una burbuja (inflado) lo que se relaciona con una buena interacción entre los



componentes de masa. La formación de la ampolla se presenta por la evaporación del agua, lo cual se relaciona con la facilidad de enrollar la tortilla incluso después del recalentamiento (Jiménez-Pérez *et al.*, 2015), lo que corresponde con los resultados encontrados en el presente trabajo (Tabla 12).

El color de las tortillas en el parámetro “L” no fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ ) entre las tortillas elaboradas con las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico (59.4- 62.4) y las tortillas elaboradas con harina de nixtamal (63.1), excepto el tratamiento con condiciones de 80° C y 10 rpm que presentó un valor menor (Tabla 13).

Los resultados para el parámetro “a” los tratamientos por calentamiento óhmico presentan valores de 1.74-2.43, siendo todos diferentes estadísticamente ( $p < 0.05$ ) respecto a los controles de tortilla elaborada con harina de nixtamal y harina comercial (1.53 y -0.15 respectivamente), excepto el tratamiento con condiciones de 80°C de temperatura y 5 rpm (Tabla 13).

En cuanto al parámetro “b” que es la intensidad de la coloración amarilla, los tratamientos por calentamiento óhmico continuo presentaron valor de 17.45-18.38 los cuales no son diferentes estadísticamente ( $p < 0.05$ ) respecto al control de tortillas elaboradas con harina de nixtamal (17.61), excepto el tratamiento con condiciones de 85° C y 10 rpm que presentó un valor mayor.

En cuanto al valor de  $\Delta E^*$  respecto al nixtamal todas las tortillas elaboradas por las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo presentaron una calidad de normal a excelente (Tabla 5). Esto indica que el calentamiento óhmico continuo mejoró el color de las tortillas respecto a las obtenidas por calentamiento óhmico por lote, lo que representa una ventaja ya que el consumidor no detectará diferencias entre una tortilla obtenida de una harina nixtamalizada usando óhmico y una obtenida del proceso tradicional.

Tabla 13. Parámetro de color de tortillas elaboradas a partir de diferentes tratamientos de harinas por calentamiento óhmico continuo en diferentes condiciones, proceso tradicional y harina comercial.

Variable de proceso		Variable respuesta				
Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	L	a	b	DE Nixtamal	DE Comercial
90	10	62.43 ± 0.42 <sup>A</sup>	2.22 ± 0,14 <sup>a,A</sup>	17.77 ± 0.06 <sup>A</sup>	0.98	10.63
85	10	61.23 ± 1.19 <sup>A</sup>	2.43 ± 0,12 <sup>a,A</sup>	18.38 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	2.22	11.98
80	10	59.94 ± 0.17 <sup>a, A</sup>	2.14 ± 0,04 <sup>a,A</sup>	18.03 ± 0.10 <sup>A</sup>	3.25	13.01
90	5	62.11 ± 0.06 <sup>A</sup>	2.28 ± 0,24 <sup>a,A</sup>	17.91 ± 0.33 <sup>A</sup>	1.29	10.99
85	5	61.12 ± 1.07 <sup>A</sup>	2.16 ± 0,22 <sup>a,A</sup>	17.97 ± 0.31 <sup>A</sup>	2.12	11.89
80	5	61.57 ± 1.32 <sup>A</sup>	1.75 ± 0,13 <sup>A</sup>	17.45 ± 0.09 <sup>A</sup>	1.57	11.26
Harina nixtamal		63.12 ± 1.21	1.54 ± 0,03	17.61 ± 0.10 <sup>A</sup>	0	9.81
Harina comercial		72.25 ± 0.10	-0.14 ± 0.01	14.43 ± 0.38	9.81	0

Medias seguidas con letra “a” y “A” en la misma columna presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con harina de nixtamal y harina comercial respectivamente por la prueba de Dunnett. Control 1: Harina comercial; Control 2: Harina nixtamal.

## 6.8 Selección de condiciones de procesamiento para nixtamalizar harinas usando calentamiento óhmico continuo.

Se seleccionó un voltaje de 120 V debido a que fueron las harinas con mejores características y una velocidad de alimentación de 5 y 10 rpm ya que estas representan un tiempo de proceso de 10 y 5 minutos respectivamente con una temperatura de 80, 85 y 90° C.

## 6.9 Caracterización química de harinas obtenidas por el proceso tradicional y proceso por calentamiento óhmico

La composición proximal de harinas nixtamalizadas por diferentes métodos es mostrada en la Tabla 14.

El contenido de proteínas no mostró diferencias significativas entre las harinas obtenidas por diferentes métodos y el maíz crudo. [Campechano et al., \(2012\)](#) reportaron 31.2, 0.3, 2.9, 41.2 y 24.4 % de cenizas, grasa, proteína, fibra dietaria y extracto libre de nitrógeno respectivamente para su composición de nejayote. Lo anterior indica que el aumento de proteínas en la harina de nixtamal de forma tradicional es atribuido a una concentración de proteínas por la pérdida de sólidos.

[Gaytán-Martínez et al., \(2012\)](#) reportan valores similares de proteínas para harina comercial (8.04%), maíz crudo (8.62%), nixtamal (7.95%) y para harinas procesadas usando un equipo calentamiento óhmico de lotes un intervalo entre 8.23 a 8.51%, valores que se encuentran dentro de lo encontrado en el presente trabajo.

El contenido de grasa de maíz crudo fue de  $4.37 \pm 0.4$  %, mientras que para harina comercial de  $4.27 \pm 0.03$  %, harina de nixtamal  $3.96 \pm 0.25$  % y harina nixtamalizada por calentamiento óhmico de  $3.89 \pm 0.25$  %. Las diferencias encontradas entre la harina nixtamalizada por óhmico y el maíz se puede deber a se forman complejos amilosa-lípidos y saponificación de lípidos ([Mariscal-Moreno et al., 2017](#); [Yahuaca-Juárez et al., 2013](#)). En el calentamiento óhmico el maíz se utiliza molido, lo que puede favorecer las interacciones entre la cal, grasas y amilosa para la formación de complejos de amilosa-lípidos y en consecuencia se ve reflejado en un menor contenido de grasas. Lípidos

presentes en almidón nativo en maíz, durante la cocción como extrusión y gelatinización se pueden formar complejos con amilosa (Becker, Hill, y Mitchell, 2001).

En cuanto al contenido de cenizas la harina nixtamalizada por calentamiento óhmico y de forma tradicional no fue estadísticamente diferente, sin embargo, si fueron estadísticamente diferentes respecto de la harina comercial y maíz crudo. Durante la nixtamalización la absorción de calcio se presenta durante el tratamiento térmico y el reposo (Palacios-Fonseca *et al.*, 2009), en tanto en el calentamiento óhmico únicamente se agrega la cantidad de hidróxido de calcio necesaria (0.3% respecto al peso del maíz). La diferencia con las harinas comerciales, se debe a que estas son lavadas de manera excesiva con el fin de tener una tortilla más blanca, por lo se pierde el calcio.

Gaytán-Martínez *et al.*, (2012) reportaron para maíz crudo un contenido de cenizas de 1.08%, para harina comercial valores de 1.19%, nixtamalizadas de forma tradicional un 1.30% y para tortillas obtenidas por calentamiento óhmico valores entre 1.18 a 1.39 % de cenizas, lo que concuerda con los resultados encontrados en la presente investigación.

Tabla 14. Composición proximal de harinas nixtamalizadas por diferentes métodos\*

Componente químico (%)	Harina			
	Óhmico	Tradicional	Comercial	Maíz
Proteína	7.95 ± 0.02 <sup>a</sup>	7.94 ± 0.39 <sup>a</sup>	7.89 ± 0.2 <sup>a</sup>	7.75 ± 0.43 <sup>a</sup>
Grasa	3.89 ± 0.19 <sup>b</sup>	3.96 ± 0.25 <sup>a,b</sup>	4.27 ± 0.03 <sup>b</sup>	4.37 ± 0.41 <sup>a</sup>
Cenizas	1.34 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.34 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.02 ± 0.01 <sup>b</sup>
Carbohidratos	86.82	86.76	86.67	86.86
FDT	18.85 ± 0.62 <sup>a</sup>	9.13 ± 0.50 <sup>c</sup>	9.40 ± 0.32 <sup>c</sup>	16.44 ± 0.46 <sup>b</sup>
FDI	16.90 ± 0.38 <sup>a</sup>	7.67 ± 0.44 <sup>b</sup>	7.71 ± 0.44 <sup>b</sup>	15.35 ± 0.34 <sup>a</sup>
FDS	2.41 ± 0.11 <sup>a</sup>	1.46 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.69 ± 0.12 <sup>b</sup>	1.09 ± 0.46 <sup>b</sup>

Medias seguidas con letra diferentes en la misma fila presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas. Harina de calentamiento óhmico procesada a 85°C y 5 rpm; FDT: Fibra dietaria total; FDI: Fibra soluble dietaria; FDS: Fibra dietaria soluble. \*Resultados en base seca.

El contenido de fibra dietaria total (Tabla 15) presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las harinas nixtamalizadas. Los valores fueron de  $18.85 \pm 0.62$  % para las harinas procesadas por calentamiento óhmico, mientras que para harina de nixtamal fue de  $9.13 \pm 0.50$  %, para harina comercial  $9.40 \pm 0.32$  % y para maíz crudo fue de  $16.44 \pm 0.46$  %. Las harinas obtenidas por calentamiento óhmico tienen un alto contenido de fibra dietaria total, lo que las convierte en una buena fuente de carbohidratos indigeribles

En cuanto a la fibra dietaria insoluble, las harinas obtenidas por calentamiento óhmico fueron las que presentaron los valores más altos ( $16.90 \pm 0.38$ %), seguida del maíz ( $15.35 \pm 0.34$ %), de la harina obtenida por el proceso tradicional y la comercial ( $7.67 \pm 0.44$  % y  $7.71 \pm 0.44$  % respectivamente). La harina nixtamalizada por calentamiento óhmico tiene mayor contenido de fibra dietaria comparadas con la harina nixtamalizada de forma tradicional, es debido a que en este último se pierden el 80% del pericarpio por efecto pH alcalino ([Acosta-Estrada et al., 2014](#); [Campechano et al., 2012](#)) y en el calentamiento óhmico el maíz se procesa integral, se usa el agua necesaria por lo que no se presentan pérdidas.

La harina nixtamalizada por calentamiento óhmico presentan un valor mayor de fibra dietaria insoluble, soluble y total, lo que representa una ventaja ya que estos polisacáridos contribuyen con mayor retención de agua por las heces fecales lo que aumenta su aumento de volumen, facilitando el tránsito a través de intestino, lo que se relaciona a una menor incidencia de padecer enfermedades cardiovascular y cáncer de colon ([Slavin, 2013](#)).

El maíz al igual que los cereales son deficientes en aminoácidos esenciales, específicamente lisina y triptófano. El proceso térmico alcalino hace que los aminoácidos, lisina, triptófano y metionina sean más disponibilidad ([Pearson et al., 1957](#); [Trejo-Gonzalez et al., 1982](#); [Warinner y Tuross, 2009](#)).

En cuanto al contenido de aminoácidos en la harina nixtamalizada por calentamiento óhmico presentó 0.218% de lisina y 0.034 % de triptófano, para

harina nixtamalizada de forma tradicional 0.221% de lisina y 0.027% de triptófano, para harina comercial de 0.221% de lisina y 0.034% de triptófano y para maíz crudo un valor de 0.202% de lisina y 0.032 % de triptófano (Tabla 15). Cabe destacar que la proporción de contenido de lisina y triptófano en maíz crudo se mantiene en los tratamientos por calentamiento óhmico, esto es muy importante ya que [Scrimshaw et al., \(1958\)](#) menciona que la falta relativa de lisina o triptófano reduce el valor biológico de la proteína, además que la falta de triptófano afectan la disponibilidad de niacina, ya que esta es derivada de triptófano ([Gutiérrez-Dorado et al., 2008](#)).

[Gaytán-Martínez et al., \(2012\)](#) reportaron contenidos de lisina de 0.245- 0.275 % para harinas obtenidas por calentamiento óhmico, para harina del proceso tradicional de 0.268 %, harina comercial de 0.284 % y maíz crudo de 0.256 %, estos valores son similares a los encontrados en nuestro estudio.

El contenido de calcio es incorporado durante la nixtamalización, es importante por dos razones. La primera porque influye en las propiedades sensoriales y fisicoquímicas de la tortilla; y la segunda, desde el punto de vista nutricional ya que contribuye con la formación del hueso. Las tortillas son una fuente importante de calcio para la población mexicana y sobre todo para población de bajos recursos, por lo que no es recomendable reducir este elemento en las harinas nixtamalizadas.

La harina nixtamalizada por calentamiento óhmico y la obtenida por el proceso tradicional no mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas (1.56 y 1.55 mg/g respectivamente). En tanto, si son diferentes a la harina comercial y maíz crudo, estos con valores menores de 0.96 y 0.54 mg/g respectivamente.

El calentamiento óhmico produce harina para la elaboración de tortillas con un adecuado contenido de calcio como las que se producen por el proceso tradicional, con la ventaja que en el calentamiento óhmico no hay exceso y por ende desperdicio de este mineral.

Tabla 15. Contenido de aminoácidos de lisina y triptófano y calcio en harinas nixtamalizadas por diferentes procesos

Harina	Lisina (%) <sup>*</sup>	Triptófano (%) <sup>*</sup>	Calcio (mg/100 g)
<b>Calentamiento óhmico</b>	0.218 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.034 ± 0.01 <sup>a</sup>	156 ± 1 <sup>a</sup>
<b>Harina nixtamal</b>	0.221 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.027 ± 0.01 <sup>a</sup>	155 ± 2 <sup>a</sup>
<b>Harina comercial</b>	0.221 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.034 ± 0.01 <sup>a</sup>	96 ± 1 <sup>b</sup>
<b>Maíz crudo</b>	0.202 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.032 ± 0.01 <sup>a</sup>	54 ± 2 <sup>c</sup>

<sup>\*</sup>Porcentaje respecto al contenido de proteína; Calentamiento óhmico se procesó a una temperatura de 85°C y 5 rpm. Medias seguidas con letra diferentes en la misma fila presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas. Harina de calentamiento óhmico procesada a 85°C y 5 rpm

#### 6.10 Contenido de compuestos fenólicos libres en harinas nixtamalizadas

Existen evidencias de que el proceso tradicional de nixtamalización afecta el contenido de componentes bioactivos del grano de maíz debido a una serie de fenómenos químicos y físicos. En primer lugar, el pH durante el procesamiento es altamente alcalino, por otra parte ciertos componentes se lixivian al agua de cocción que se retira durante los lavados del nixtamal (Méndez *et al.*, 2013), lo que genera pérdidas importantes de compuestos fenólicos. Una de las ventajas del proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico es que no utiliza exceso de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  además de que utiliza el grano integral, lo que permite la conservación del pericarpio y compuestos asociados.

El principal compuesto fenólico en el maíz es el ácido ferúlico que representa alrededor del 85%, este ácido se concentrado principalmente en el pericarpio del grano de forma libre o ligada a polisacáridos en la pared celular (de la Parra *et al.*, 2007).

Debido a que los compuestos fenólicos libres, glicosilados y esterificados en el grano de maíz están principalmente en las capas externas, éstos se pierden en el proceso tradicional de nixtamalización (Yu *et al.*, 2001). Se ha reportado que el principal contribuyente a la actividad antioxidante son los polifenoles y la actividad antioxidante hidrofílica representa el 98% de la actividad total antioxidante en el maíz (Adom y Liu, 2002; Lopez-Martinez *et al.*, 2011; de la

Parra *et al.*, 2007), por esta razón, la actividad antioxidante puede verse disminuida, tanto por el pH alcalino que ocasiona la remoción del pericarpio y sus compuestos asociados (Aguayo-Rojas *et al.*, 2012).

### 6.9.1 Contenido de flavonoides totales

Uno de los grupos más abundantes dentro de los compuestos fenólicos son los flavonoides. En la Figura 10, se presentan los resultados de flavonoides totales cuantificados en las harinas nixtamalizadas por proceso tradicional, calentamiento óhmico y una harina comercial. Los tratamientos no mostraron diferencias significativas entre sí ( $p < 0.05$ ). Las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico presentó 29.14 mg eq rutina/g, la harina de nixtamal de forma tradicional 26.74 mg eq rutina/g, en tanto que la harina comercial 35.3 mg eq rutina/g y el maíz crudo de 39.18 mg eq rutina/g, Lo que sugieren las harinas nixtamalizadas presentan un potencial anitinflamatorias, antioxidantes, antitrombóticas y anticarcinogénicas (Frenkel, 1997) similar sin embargo debe comprobarse.

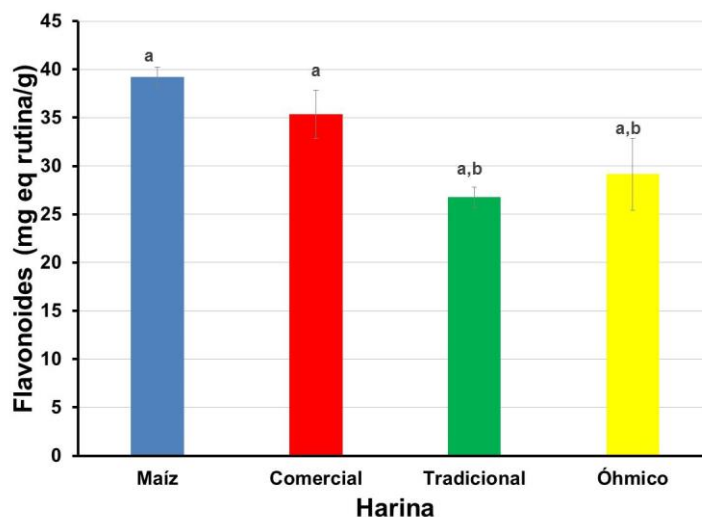


Figura 10. Contenido de flavonoides en harinas nixtamalizadas por diferentes procesos. Medias seguidas con letras diferentes presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas. Harina de calentamiento óhmico procesada a 85°C y 5 rpm.



### 6.9.2 Contenido de taninos condensados

Los taninos condensados (TC) comprenden un amplio grupo de compuestos fenólicos, principalmente polímeros de flavonoides, especialmente de catequina y epicatequina. En la Tabla 16 se muestra el contenido de TCs en las diferentes harinas. Se observa las harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional y calentamiento óhmico presentaron la mayor concentración de estos compuestos, siendo significativamente diferente a la harina comercial y el maíz crudo. Se ha reportado que el contenido de TCs es más importante en variedades azules y rojas que en variedades blancas; de acuerdo a los resultados obtenidos, las concentraciones encontradas en este estudio para los diferentes tratamientos son menores a lo reportado para harinas de maíz azul (Bello-Pérez *et al.*, 2015) pero más altos que lo reportado por Treviño-Mejía *et al.*, (2016). Se ha propuesto que los TCs tienen un importante aporte a la capacidad antioxidante en conjunto con el ácido ferúlico.

### 6.9.3 Fenoles totales

La Tabla 16 muestra los valores de fenoles totales para la fracción libre y ligada de las harinas de maíz nixtamalizadas por los diferentes tratamientos en estudio. La mayor concentración de la fracción libre se encontró en la harina nixtamalizada por calentamiento óhmico (0.85 mg eq ácido ferúlico/g) y tratamiento tradicional (0.91 mg eq ácido ferúlico/g), seguida del maíz crudo (0.77 mg eq ácido ferúlico/g), que fueron diferentes estadísticamente a la harina de maíz comercial (0.7 mg eq ácido ferúlico/g). Se sabe que en el maíz crudo los compuestos fenólicos se encuentran mayoritariamente en forma ligada (De la Parra *et al.*, 2007), por lo que se sugiere que al aplicar un tratamiento térmico-alcalino como en el caso de las harinas nixtamalizadas de forma tradicional y con óhmico, éstos pueden liberarse de la matriz, aumentando el nivel de fenoles libres, como se observó en este estudio. La mayor proporción de fenoles se encontró en su forma ligada en la harina nixtamalizada por calentamiento óhmico (1.13 mg eq. Ácido ferúlico/g) y harina comercial (1.3 mg eq. Ácido ferúlico/g), mientras que la harina obtenida de forma tradicional tuvo los menores valores (0.8 mg eq. Ácido ferúlico/g). Se observó una mayor pérdida de fenoles ligados en la muestra de maíz nixtamalizado por proceso tradicional, esto es debido a la

remoción del pericarpio en donde se encuentran asociados una gran cantidad de compuestos fenólicos (Das y Singh, 2015). En el caso de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico, el pericarpio se conserva, lo que explica la mayor cantidad de compuestos fenólicos.

#### 6.9.4 Capacidad antioxidante

La importancia de los compuestos fenólicos está relacionada con la capacidad antioxidante que poseen, misma que se asocia con la prevención y disminución del riesgo de desarrollar ciertas enfermedades crónico-degenerativas (Cardador-Martínez *et al.*, 2002). En la Tabla 16 se observa los resultados obtenidos para la capacidad antioxidante de los diferentes harinas medida por dos métodos diferentes: el ensayo de DPPH y ABTS. Para ambos métodos, esta capacidad se expresa como la capacidad de cada muestra de inhibir un radical libre (DPPH o ABTS) en relación a un antioxidante de referencia (Trolox).

La capacidad antioxidante por el método de DPPH obtenidas de las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico (21.21 %) y la harina comercial (23.21 %) no mostraron diferencias significativas, siendo las que presentaron la menor capacidad antioxidante en comparación con maíz crudo y el tratamiento tradicional. En contraste, el tratamiento tradicional fue el que presentó una mayor capacidad antioxidante (34.94%), lo cual coincide con la mayor cantidad de fenoles libres que presentó. Esto indica que la mayor contribución a la capacidad antioxidante puede estar dada por esta fracción debido a que al estar en forma libre, tiene una mayor facilidad para neutralizar los radicales libres del medio. Los valores que se observaron están por arriba de lo reportado por otros autores para maíz crudo (Cuéllar-Núñez *et al.*, 2014, Treviño-Mejía *et al.*, 2013).

Por el método de ABTS, se obtuvieron mayores valores de capacidad antioxidante que por el método de DPPH. La discrepancia en ambos métodos puede deberse a que ABTS  $\bullet+$  reacciona con cualquier compuesto aromático hidroxilado, independientemente de su potencial antioxidante real (Rogisky *et al.*, 2005). Por otra parte, el DPPH es más selectivo, razón por la que no reacciona con los flavonoides carentes de grupos hidroxilo en el anillo B, ni con ácidos

aromáticos que contengan un solo grupo hidroxilo ([Roginsky et al., 2005](#)), dando valores más bajos que el otro método.

En cuanto a los valores obtenidos, se tuvo la misma tendencia que se observó en el método de DPPH, siendo la harina tradicional la que presentó mayor capacidad antioxidante ( $85.16 \pm 1.4\%$ ), mientras que la harina nixtamalizada por óhmico continuo tuvieron valores de  $60.35 \pm 2.79\%$ . Estos valores son mayores a los reportados por [Cuéllar-Núñez et al. \(2014\)](#) para maíz crudo.

Tabla 16. Comparación nutracéutica del contenido de compuestos fenólicos libres (fenoles totales, taninos condensados y flavonoides) y capacidad antioxidante de harinas nixtamalizadas por diferentes procesos

Harina	Taninos (mg eq +catequina/ g)	Flavonoides (mg eq rutina/g)	ABTS (% de inhibición)	DPPH (% de inhibición)	Fenoles totales (mg eq ácido ferúlico/g)	
	Libres	Libres	Libres	Libres	Libres	Ligados
<b>Maíz crudo</b>	0.02 ± 0.01 <sup>d</sup>	39.18 ± 1.89 <sup>a</sup>	54.02 ± 1.78 <sup>b,c</sup>	28.42 ± 1.07 <sup>b</sup>	0.77 ± 0.03 <sup>a,b,c</sup>	1.13 ± 0.06 <sup>a</sup>
<b>Comercial</b>	0.11 ± 0.01 <sup>c,d</sup>	35.36 ± 4.3 <sup>a</sup>	51.17 ± 7.19 <sup>c</sup>	23.21 ± 0.95 <sup>b,c</sup>	0.7 ± 0.03 <sup>b,c</sup>	1.3 ± 0.01 <sup>d</sup>
<b>Tradicional</b>	0.3 ± 0.01 <sup>a,b,c</sup>	26.74 ± 1.83 <sup>a,b</sup>	85.16 ± 1.4 <sup>a</sup>	34.94 ± 1.67 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.8 ± 0.00 <sup>b,c</sup>
<b>Óhmico</b>	0.43 ± 0.1 <sup>a</sup>	29.14 ± 7.78 <sup>a,b</sup>	60.35 ± 2.79 <sup>b,c</sup>	21.21 ± 2.27 <sup>c</sup>	0.85 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.35 ± 0.2 <sup>e</sup>

Medias seguidas con letras diferentes presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas. Harina de calentamiento óhmico procesada a 85°C y 5 rpm

### 6.9.2 Cuantificación de compuestos fenólicos libres y ligados por HPLC-DAD en harinas nixtamalizadas por diferentes métodos

En cuanto a los compuestos fenólicos individuales en harinas y maíz crudo analizados por HPLC-DAD, los cambios en compuestos libres y ligados se observan en la Tabla 17.

El compuesto más abundante en todos los tratamientos fue el ácido ferúlico; este ácido está asociado principalmente con los arabinosilanos y otros polisacáridos presentes en la pared celular (Yadav *et al.*, 2007). El tratamiento con mayor contenido de este compuesto fue la harina obtenida por proceso tradicional (74.14  $\mu\text{g}$  ácido ferúlico/g muestra), presentando diferencias significativas con la harina comercial (26.31  $\mu\text{g}$  ácido ferúlico/g muestra), calentamiento óhmico (8.29  $\mu\text{g}$  ácido ferúlico/g muestra) y maíz crudo con un valor de  $2.37 \pm 0.19 \mu\text{g}$  ácido ferúlico/g muestra. Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado en la literatura, ya que en el proceso tradicional de nixtamalización, el pH altamente alcalino provoca que los enlaces éster entre el ácido ferúlico y los arabinosilanos se rompan liberando el ácido ferúlico (Campechano *et al.*, 2012); por ende se presenta mayor abundancia de este compuesto en su forma libre en el proceso tradicional. En cuanto al ácido gálico, no se presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el maíz crudo, calentamiento óhmico y proceso tradicional con valores de 65.59, 34.21 y 11.67  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente. Este compuesto no se identificó en harina comercial debido a que se realizan lavados para eliminar la totalidad del pericarpio. Para ácido clorogénico, catequina, rutina y quercetina, no presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el maíz crudo y el calentamiento óhmico, con valores para ácido clorogénico de 43.31 y 25.16  $\mu\text{g/g}$ ; para catequina de 53.12 y 35.73  $\mu\text{g/g}$ ; para rutina de 60.62 y 52.71  $\mu\text{g/g}$  y quercetina de 46.06 y 26.50  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente. En harinas por el proceso tradicional y harina comercial no se identificaron estos compuestos, lo que sugiere que el calentamiento óhmico preserva estos compuestos fenólicos.

La fracción de compuestos ligados se sometió al mismo análisis de compuestos fenólicos. Esta fracción tuvo el mayor contenido de compuestos fenólicos, siendo el más abundante el ácido ferúlico. En cuanto al contenido de ácido ferúlico no se presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre maíz crudo, harina

comercial y calentamiento óhmico, pero sí con la harina de nixtamal con valores de 368.11, 321.43, 302.87 y 157.94  $\mu\text{g/g}$  respectivamente. El calentamiento óhmico muestra valores altos respecto a los otros tratamientos, esto debido a que el pericarpio no se pierde en este proceso. En cuanto al contenido de ácido gálico los valores presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) siendo el maíz crudo con el más alto (32.26  $\mu\text{g/g}$ ), seguido de harina de nixtamal (28.64  $\mu\text{g/g}$ ), calentamiento óhmico de 30.36  $\mu\text{g/g}$  y por último de harina comercial (24.4  $\mu\text{g/g}$ ). Respecto a ácido clorogénico el valor más alto fue para calentamiento óhmico seguido de harina de nixtamal y maíz crudo con valores de 12.34, 6.53 y 5.12  $\mu\text{g/g}$  respectivamente, aunque no presentaron diferencias significativas, harina comercial no se identificó este compuesto.

Respecto a ácido cumárico si mostraron diferencias significativas siendo el valor más alto para maíz crudo con un valor de 164.64  $\mu\text{g/g}$ , seguido de calentamiento óhmico con un valor de 125.72  $\mu\text{g/g}$ , después harina de nixtamal con un valor de 113.46  $\mu\text{g/g}$  y por último harina comercial con un valor de 64.22  $\mu\text{g/g}$ .

En cuanto al contenido de flavonoides, el contenido de catequina no mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con los valores obtenidos para calentamiento óhmico, harina de nixtamal, maíz crudo y harina comercial de 34.75, 33.11, 20.44 y 16.56  $\mu\text{g/g}$  respectivamente.

Para el compuesto de rutina no mostraron diferencias significativas teniendo valores de 91.72, 81.85, 80.83 y 75.42  $\mu\text{g/g}$  para harina de nixtamal, harina de calentamiento óhmico, maíz crudo y harina comercial respectivamente.

Tabla 17. Compuestos fenólicos identificados por HPLC-DAD en harinas nixtamalizadas por diferentes métodos

Compuesto ( $\mu\text{g/g}$ )	Comercial	Maíz	Óhmico	Tradicional
<b>Compuestos fenólicos libres</b>				
<b>Ácido ferúlico</b>	$26.31 \pm 0.13^b$	$2.37 \pm 0.19^e$	$8.29 \pm 0.06^c$	$74.14 \pm 0.16^a$
<b>Ácido gálico</b>	ND	$65.59 \pm 29.33^a$	$34.21 \pm 17.97^a$	$11.67 \pm 1.14^a$
<b>Ácido clorogénico</b>	ND	$43.31 \pm 19.37^a$	$25.16 \pm 12.58^a$	ND
<b>Ácido cumárico</b>	ND	ND	ND	ND
<b>Catequina</b>	ND	$53.12 \pm 23.76^a$	$35.73 \pm 17.87^a$	ND
<b>Rutina</b>	ND	$60.62 \pm 27.11^a$	$52.71 \pm 26.35^a$	ND
<b>Quercetina</b>	ND	$46.06 \pm 20.60^a$	$26.50 \pm 13.25^a$	ND
<b>Compuestos fenólicos ligados</b>				
<b>Ácido ferúlico</b>	$321.43 \pm 15.28^{ab}$	$368.11 \pm 48.82^a$	$302.87 \pm 164.05^{ab}$	$157.94 \pm 4.75^b$
<b>Ácido gálico</b>	$24.40 \pm 0.55^c$	$32.26 \pm 0.53^a$	$30.36 \pm 0.47^{ab}$	$28.64 \pm 1.07^b$
<b>Ácido clorogénico</b>	ND	$5.12 \pm 2.29^{bc}$	$12.34 \pm 1.05^{ab}$	$6.53 \pm 2.92^{bc}$
<b>Ácido cumárico</b>	$64.22 \pm 1.21^b$	$164.64 \pm 19.87^a$	$125.72 \pm 13.10^{ab}$	$113.46 \pm 1.39^{ab}$
<b>Catequina</b>	$16.56 \pm 1.73^b$	$20.44 \pm 4.11^b$	$34.75 \pm 2.31^{ab}$	$33.11 \pm 5.46^{ab}$
<b>Rutina</b>	$75.42 \pm 4.12^a$	$80.83 \pm 9.78^a$	$81.85 \pm 10.40^a$	$91.72 \pm 3.29^a$

## **7 CONCLUSIONES**

- El tamaño de partícula de la molienda del maíz es un parámetro que determina en la calidad funcional de las harinas nixtamalizadas.
- El voltaje fue un parámetro importante durante el procesamiento óhmico de harinas nixtamalizadas.
- Las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico presentaron gelatinización y electroporación que en conjunto determinan la calidad de las harinas y por ende de sus productos.
- El voltaje de 120 v permitió obtener harinas con un porcentaje de gelatinización parecido al de las harinas procesadas por nixtamalización tradicional.
- Al nixtamalizar harinas por calentamiento óhmico continuo la temperatura fue el parámetro determinante en la calidad.
- Los rendimientos de masa y tortilla en las harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico fueron mayores respecto al nixtamal tradicional lo que es una ventaja desde el punto de vista económico.
- Las tortillas obtenidas con harinas nixtamalizadas por calentamiento óhmico continuo presentan un color de excelente a normal según la norma ISO 12647-2 lo que resulta en un producto que el consumidor no apreciaría diferencias entre ellas.
- Los parámetros de 85°C y 5 rpm usados en calentamiento óhmico continuo permiten obtener harinas nixtamalizadas para la elaboración de tortilla con calidad similar a la obtenida por nixtamalización tradicional.
- El calentamiento óhmico mejora la calidad nutricional, nutracéutica y funcional de las harinas y tortillas ya que el grano es utilizado de forma integral y no hay pérdida de nutrientes.
- El calentamiento óhmico es un proceso emergente que presenta un gran potencial para ser implementado en la industria de las harinas nixtamalizadas.

## **8 BIBLIOGRAFÍA**



- AACC. (2000). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists (10<sup>th</sup> ed.). Minneapolis, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Acosta-Estrada, B. A., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2014). Bound phenolics in foods, a review. *Food Chem.* 152, 46–55.
- Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. *El maíz en Cuba.* (Spanish). *Maize Crop Its Orig. Classif. Maize Cuba Engl.* 30, 113–120.
- Acosta-Estrada, B.A., Lazo-Vélez, M.A., Nava-Valdez, Y., Gutiérrez-Urbe, J.A., & Serna-Saldívar, S.O. (2014). Improvement of dietary fiber, ferulic acid and calcium contents in pan bread enriched with nejayote food additive from white maize (*Zea mays*). *J. Cereal Sci.* 60, 264–269.
- Adom, K.K., & Liu, R.H. (2002). Antioxidant Activity of Grains. *J. Agric. Food Chem.* 50, 6182–6187.
- Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E.O., Serna-Saldivar, S.O., Gutierrez-Urbe, J.A., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2012). Phytochemicals and Antioxidant Capacity of Tortillas Obtained after Lime-Cooking Extrusion Process of Whole Pigmented Mexican Maize. *Plant Foods Hum. Nutr.* 67, 178–185.
- Alamri, M.S., Mohamed, A.A., & Hussain, S. (2013). Effects of alkaline-soluble okra gum on rheological and thermal properties of systems with wheat or corn starch. *Food Hydrocoll.* 30, 541–551.
- Aliyu, M., & Hephher, M. J. (2000). Effects of ultrasound energy on degradation of cellulose material. *Ultrasonics Sonochemistry*, 7(4), 265–268.
- Antuna Grijalva, O., Rodríguez Herrera, S.A., Arámbula Villa, G., Palomo Gil, A., Gutiérrez Arías, E., Espinosa Banda, A., Navarro Orona, E.F., & Andrio Enríquez, E. (2008). Calidad nixtamalera y tortillera en maíces criollos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(3).
- AOAC. (1990). Official methods of Analysis AOAC International (16th ed.). Arlington, VA: AOAC International.
- Arámbula-Villa, G., Barron-Avila, L., Gonzalez-Hernández, J., Moreno-Martinez, E., & Luna-Barcenas, G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, estructurales y reológicas, estructurales y texturales, masa y tortilla de maíz. *Arch. Latinoam. Nutr.* 51, 187–194.

- Assiry, A.M., Sastry, S.K., & Samaranayake, C.P. (2006). Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochemistry* 68, 7–13.
- Barichello, V., Yada, R.Y., Coffin, R.H., & Stanley, D.W. (1990). Low temperature sweetening in susceptible and resistant potatoes: starch structure and composition. *J. Food Sci.* 55, 1054–1059.
- Becker, A., Hill, S. E., & Mitchell, J. R. (2001). Relevance of Amylose- Lipid Complexes to the Behaviour of Thermally Processed Starches. *Starch-Stärke*, 53(3- 4), 121-130.
- Bedolla, S., and Rooney, L.W. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World*.
- Bedolla, S., and Rooney, L. W. (1982). Cooking maize for masa production. *Cereal Foods World*, 27(5), 219-221.
- Burda, S., and Oleszek, W. (2001). Antioxidant and Antiradical Activities of Flavonoids. *J Agric and Food Chem*, 49(6), 2774–2779.
- Campechano Carrera, E.M., Figueroa Cárdenas, JD., Arámbula Villa, G., Martínez Flores, H.E., Jiménez Sandoval, S.J., and Luna Bárcenas, J.G. (2012). New ecological nixtamalisation process for tortilla production and its impact on the chemical properties of whole corn flour and wastewater effluents. *Int. J. Food Sci. Technol.* 47, 564–571.
- Cardador-Martínez, A., Loarca-Piña, G., & Oomah, B. D. (2002). Antioxidant Activity in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *J Agric and Food Chem*, 50(24), 6975–6980.
- Carvalho, C.W.P., Takeiti, C.Y., Onwulata, C.I., & Pordesimo, L.O. (2010). Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *J. Food Eng.* 98, 103–109.
- Chaudhary, D.P., Kumar, S., & Yadav, O.P. (2014). Nutritive Value of Maize: Improvements, Applications and Constraints. In *Maize: Nutrition Dynamics and Novel Uses*, D.P. Chaudhary, S. Kumar, and S. Langyan, eds. (Springer India), pp. 3–17.
- Colussi, R., Kaur, L., Zavareze, E. da R., Dias, A.R.G., Stewart, R.B., & Singh, J. (2017). High pressure processing and retrogradation of potato starch:

- Influence on functional properties and gastro-small intestinal digestion in vitro. *Food Hydrocoll.* 75, 131–137.
- Contreras-Jiménez, B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M. L., & Gaytán-Martínez, M. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. *CyTA - J Food*, 12(3), 263–270.
- Cornejo-Villegas, M.A., Acosta-Osorio, A.A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M.A., Gaytán, M., Herrera, G., & Rodríguez-García, M.E. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *J. Food Eng.* 96, 401–409.
- Cortés-Gómez, A., San Martín-Martínez, E., Martínez-Bustos, F., & Vázquez-Carrillo, G.M. (2005). Tortillas of blue maize (*Zea mays L.*) prepared by a fractionated process of nixtamalization: analysis using response surface methodology. *J. Food Eng.* 66, 273–281.
- Dörmann, P. (2003). Corn with enhanced antioxidant potential. *Nat. Biotechnol.* 21, 1015–1016.
- Dowswell, C.D., Paliwal, R.L., & Cantrell, R.P. (1996). *Maize in the third world*. Boulder, CO, USA (Westview Press).
- Dupont, J., White, P.J., Carpenter, M.P., Schaefer, E.J., Meydani, S.N., Elson, C.E., Woods, M., & Gorbach, S.L. (1990). Food uses and health effects of corn oil. *J. Am. Coll. Nutr.* 9, 438–470.
- Duygu, B., and Ümit, G. (2015). Application of Ohmic Heating System in Meat Thawing. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 195, 2822–2828.
- FAOSTAT, (2012). Disponible en línea: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acceso: 31/05/16
- Figuroa, J. D., Acero, G. M. G., Vasco, M. N., Lozano, G. A., Flores, A. L., & González, H. J. (2001). Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal. *ALAN* 51:3: 293-302.
- Figuroa, J. D., Martínez, B. F., González, H. J., Sánchez, S. F., Martínez, J. L., & Ruiz, M. T. (1994). Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización. *Avance y perspectiva*, 13, 323-329.

- Flores Farías, R., Martínez Bustos, F., Salinas Moreno, Y., & Ríos, E. (2002). Caracterización de harinas comerciales de maíz nixtamalizado. *Agrociencia* 36
- Frankel, E. N. (1997). Nutritional benefits of flavonoids. In *Food Factors for Cancer Prevention* (pp. 613-616). Springer, Tokyo.
- Galicia, L.N., Rosales, E., & A Palacios Rojas, N. (2009). Laboratory protocols 2008: Maize nutrition quality and plant tissue analysis laboratory (CIMMYT).
- Galinat, W. C. (1988). The origin of corn. In G.F. Sprague & J.W. Dudley, eds. *corn and corn improvement*, 3rd ed. Madison, WI, USA, American Society of Agronomy. pp. 1-31
- Gaytán Martínez, M., Martínez Bustos, F., & Morales Sánchez, E. (2000). Aplicación de un proceso de cocimiento dieléctrico en la elaboración de harinas instantáneas de maíz amarillo para preparación de frituras de masa y tortillas. *Arch Latinoam Nutr* 50, 366–373.
- Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J. D. C., Morales-Sánchez, E., Vázquez-Landaverde, P. A., & Martínez-Flores, H. E. (2011). Physicochemical properties of masa and corn tortilla made by ohmic heating. *African Journal of Biotechnology*, 10(71), 16028–16036.
- Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J. D. C., Vázquez-Landaverde, P. A., Morales-Sánchez, E., Martínez-Flores, H. E., & Reyes-Vega, M. L. (2012). Physicochemical, functional, and chemical characterization of nixtamalized corn flour obtained by ohmic heating and traditional process. *CyTA - Journal of Food*, 10(3), 182–195.
- Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J.D.C., Vazquez-Landaverde, P.A., Morales-Sanchez, E., Martínez-Flores, H.E., & Reyes-Vega, M.L. (2012a). Caracterización fisicoquímica, funcional y química de harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico y proceso tradicional. *CyTA-J. Food* 10, 182–195.
- Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J.D.C., Morales-Sánchez, E., Vázquez-Landaverde, P.A., & Martínez-Flores, H.E. (2013). Physicochemical properties of masa and corn tortilla made by ohmic heating. *Afr. J. Biotechnol.* 10, 16028–16036.

- Gaytán-Martínez, M., Cabrera-Ramírez, Á.H., Morales-Sánchez, E., Ramírez-Jiménez, A.K., Cruz-Ramírez, J., Campos-Vega, R., Velazquez, G., Loarca-Piña, G., & Mendoza, S. (2017). Effect of nixtamalization process on the content and composition of phenolic compounds and antioxidant activity of two sorghums varieties. *J. Cereal Sci.* 77, 1–8.
- Gray, J. A, and Bemiller, J. N. (2003). *Bread Staling: Molecular Basis and Control. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2, 1–21.
- Gomez, M. H., Rooney, L. W., Waniska, R. D., & Pflugfelder, R. L. (1987). *Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. Cereal foods world (USA).*
- Goñi, I., García-Diz, L., Mañas, E., & Saura-Calixto, F. (1996). Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. *Food Chemistry*, 56(4), 445–449.
- Gurkin, S. (2002). Hydrocolloids-Ingredients that Add Flexibility to Tortilla Processing. *Cereal Foods World* 47, 41–43.
- Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Rojas, A., Arjona, J.L., Cornejo-Villegas, M.A., Zepeda-Benítez, Y., Velázquez-Hernández, R., Ibarra-Alvarado, C., & Rodríguez-García, M.E. (2010). Microstructural changes in the maize kernel pericarp during cooking stage in nixtamalization process. *J. Cereal Sci.* 51, 81–88.
- Gutiérrez-Dorado, R., Ayala-Rodríguez, A.E., Milán-Carrillo, J., López-Cervantes, J., Garzón-Tiznado, J.A., López-Valenzuela, J.A., Paredes-López, O., & Reyes-Moreno, C. (2008). Technological and Nutritional Properties of Flours and Tortillas from Nixtamalized and Extruded Quality Protein Maize (*Zea mays* L.). *Cereal Chem.* 85(6), 808-816.
- Gutiérrez-Urbe, J.A., Rojas-García, C., García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S.O. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *J. Cereal Sci.* 52, 410–416.
- Guzmán, A.Q., Jaramillo Flores, M.E., Feria, J.S., Méndez Montealvo, M.G., & Wang, Y.J. (2011). Rheological and thermal properties of masa as related to changes in corn protein during nixtamalization. *J. Cereal Sci.* 53, 139–147.

- Gwartz, J.A., and Garcia-Casal, M.N. (2014). Processing maize flour and corn meal food products. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1312, 66–75.
- Hauman, B.F. (1985). Corn oil. *J Am Oil Chem Soc* 62, 1524–1531.
- Herrera-Corredor, J. A., Saidu, J. E. P., Khachatryan, A., Prinyawiwatkul, W., Carballo-Carballo, A., & Zepeda-Bautista, R. (2007). Identifying drivers for consumer acceptance and purchase intent of corn tortilla. *Journal of Food Science*, 72(9), S727–S731.
- Icier, F., and Ilicali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Res. Int.* 38, 1135–1142.
- Janve, B., Yang, W., Kozman, A., Sims, C., Texeira, A. Gunderson, M.A., & Rababa, T.M. (2013). Enhancement of corn nixtamalization by power ultrasound. *Food and Bioprocess Technology* 6, 1269-1280.
- Jiménez-Pérez, C., Ramírez-Romero, G., and Morán-Bañuelos, S.H. (2015). Instant flour from red and blue nixtamalized maize: Production and Textural Properties of Tortilla. *J. Food Process. Preserv.* 39, 38–46.
- Katragadda, H.R., Fullana, A., Sidhu, S., & Carbonell-Barrachina, Á.A. (2010). Emissions of volatile aldehydes from heated cooking oils. *Food Chem.* 120, 59–65.
- Katz, S.H., Hediger, M.L., & Valleroy, L.A. (1974). Traditional maize processing techniques in the new world. *Science* 184, 765–773.
- Kelekci, N.N., Pascut, S., & Waniska, R.D. (2003). The effects of storage temperature on the staling of wheat flour tortillas. *J. Cereal Sci.* 37, 377–380.
- Kurilich, A.C., and Juvik, J.A. (1999). Quantification of carotenoid and tocopherol antioxidants in *Zea mays*. *J. Agric. Food Chem.* 47, 1948–1955.
- Lima, M., and Sastry, S.K. (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *J. Food Eng.* 41, 115–119.
- Lind, D., and Barham, E. (2004). The social life of the tortilla: Food, cultural politics, and contested commodification. *Agriculture and Human Values*, 21(1), 47–60.
- López, O.P., Lara, F.G., & Pérez, L.A.B. (2009). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias* 60–70.

- Lopez-Martinez, L.X., Parkin, K.L., & Garcia, H.S. (2011). Phase II-inducing, polyphenols content and antioxidant capacity of corn (*Zea mays* L.) from phenotypes of white, blue, red and purple colors processed into masa and tortillas. *Plant Foods Hum. Nutr. Dordr. Neth.* 66, 41–47.
- Luo, Y., & Wang, Q. (2012). Bioactive compounds in corn. *Cereals and Pulses: Nutraceutical Properties and Health Benefits*, 85-103.
- Martínez-Flores H.E., Martínez-Bustos F., Figueroa J.D.C., & González-Hernández J. (2002). Estudios and biological assays in corn tortillas made from fresh masa prepared by extrusion and nixtamalization processes. *J Food Scien* 67 (3):1196-1199.
- Marasas, W.F.O., Miller, J. D., Riley, R. T. & Visconti, A. (2000). Environmental Health Criteria 219: Fumonisin B1, International Programme on Chemical Safety, United Nations Environmental Programme, the International Labour Organization and the World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Mariscal-Moreno, R.M., de Dios Figueroa Cárdenas, J., Santiago-Ramos, D., Rayas-Duarte, P., Veles-Medina, J.J., & Martínez-Flores, H.E. (2017). Nixtamalization process affects resistant starch formation and glycemic index of tamales. *J. Food Sci.* 82, 1110–1115.
- Mauricio, S. R. A. Figueroa, J. D. C., Taba, S., Reyes V. M. L. Rincón., S. F., & Mendoza, G. A. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(3), 213–222.
- Maya-Cortés, D.C., Figueroa Cárdenas, J.D., Garnica-Romo, M.G., Cuevas-Villanueva, R.A., Cortés-Martínez, R., Véles-Medina, J.J., & Martínez-Flores, H.E. (2010). Whole-grain corn tortilla prepared using an ecological nixtamalisation process and its impact on the nutritional value. *Int. J. Food Sci. Technol.* 45, 23–28.
- Méndez, L.I.R., Figueroa Cárdenas, J. de D., Gómez, M.R., & Lagunas, L.L.M. (2013a). Nutraceutical properties of flour and tortillas made with an ecological nixtamalization process. *J. Food Sci.* 78, C1529–C1534.
- Ménera-López, I., Gaytán-Martínez, M., Reyes-Vega, M.L., Morales-Sánchez, E., & Figueroa, J.D.C. (2013). Physico-chemical properties and quality assessment of corn flour processed by a continuous ohmic heating system and traditional nixtamalization. *CyTA - J. Food* 11, 8–14.

- Mercado Pedraza, E. B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M., Gaytán-Martínez, M., & Ortega Moody, J. A. (2014). Effects of a low-shear transport system on the physicochemical characteristics of nixtamal corn flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 1330–1338.
- Michaud, D.S., Feskanich, D., Rimm, E.B., Colditz, G.A., Speizer, F.E., Willett, W.C., & Giovannucci, E. (2000). Intake of specific carotenoids and risk of lung cancer in 2 prospective US cohorts. *Am J Clin Nutr. Am. J. Clin. Nutr.* 72, 990–997.
- Milán- Carrillo, J., Gutiérrez- Dorado, R., Perales- Sánchez, J. X. K., Cuevas-Rodríguez, E. O., Ramírez- Wong, B., & Reyes- Moreno, C. (2006). The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(7), 727-736.
- Morales-Sánchez, E., Figueroa J.D.C., Gaytán-Martínez, M. (2010). Proceso y aparato cocedor de calentamiento óhmico continuo para obtener masa y harina de maíz nixtamalizado y productos derivados. Solicitud de patente: MX/a/2010/004151.
- Moreno, Y.S., Hernandez, D.R., & Velazquez, A.D. (2005). Extraction and use of pigments from maize grains (*Zea mays* L) as colorants in yogurt. *Arch. Latinoam. Nutr.* 55, 293–298.
- Morrison, W. R., Tester, R. F., & Gidley, M. J. (1994). Properties of damaged starch granules. II. Crystallinity, molecular order and gelatinisation of ball-milled starches. *Journal of Cereal Science*, 19(3), 209-217.
- Narváez-González, E. D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Taba, S., Tostado, E. C., Peniche, R. Á. M., & Sánchez, F. R. (2006). Relationships between the microstructure, physical features, and chemical composition of different maize accessions from Latin America. *Cereal Chem Journal*, 83(6), 595–604.
- Nelson, O., and Pan, D. (1995). Starch synthesis in maize endosperms. *Annu. Rev. Plant Biol.* 46, 475–496.
- Nenadis, N., Wang, L.-F., Tsimidou, M., & Zhang, H.Y. (2004). Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS•+ Assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4669–4674.



- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Márquez-Escalante, J. A., Gardea, A., Martínez-López Ana L., & Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry*, 115(4), 1286–1290.
- NMX-F-046-S-1980 online. (1980). Banco de Normas. Harina de Maíz Nixtamalizado Norma Mexicana. Dirección General de Normas. En línea en <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-046-S-1980.PDF>
- Nyborg, W. L. (1982). Ultrasonic microstreaming and related phenomena. *The British Journal of Cancer. Supplement*, 5, 156–160.
- O'Dell, B.L., and Sunde, R.A. (1997). *Handbook of nutritionally essential mineral elements* (CRC Press).
- Oomah, B. D., Cardador-Martínez, A., & Loarca-Piña, G. (2005). Phenolics and antioxidative activities in common beans (*Phaseolus vulgaris* L). *J Sci of F and Agric* 85(6), 935–942.
- Ortega-Moody, J., Morales-Sánchez, E., Hernández-Román, M.A., & Ruíz-Torres, M. (2011). Sistema para producir harina nixtamalizada con transporte de bajo cizallamiento. *Ing.- Mecánica Technol.- Desarro.* 4, 033–042.
- Osborne, T. B., & Mendel, L. B. (1914). Nutritive properties of proteins of the maize kernel. *Journal of Biological Chemistry*, 18(1), 1–16.
- Palacios-Fonseca, A.J., Vazquez-Ramos, C., & Rodríguez-García, M.E. (2009). Physicochemical characterizing of industrial and traditional nixtamalized corn flours. *J. Food Eng.* 93, 45–51.
- Palencia, E., Torres, O., Hagler, W., Meredith, F.I., Williams, L.D., & Riley, R.T. (2003). Total fumonisins are reduced in tortillas using the traditional nixtamalization method of mayan communities. *J. Nutr.* 133, 3200–3203.
- de la Parra, C., Serna Saldívar, S. O., & Liu, R. H. (2007). Effect of Processing on the Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Corn for Production of Masa, Tortillas, and Tortilla Chips. *J Agric and Food Chem*, 55(10), 4177–4183.
- de Pascual-Teresa, S. de, & Sánchez-Ballesta, M. T. (2007). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemistry Reviews*, 7(2), 281–299.

- de Pascual-Teresa, S., & Sánchez-Ballesta, M. T. (2008). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemistry reviews*, 7(2), 281–299.
- Paliwal, R. L. (2001). Usos del maíz. *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*, 1.
- Pappa, M.R., de Palomo, P.P., & Bressani, R. (2010). Effect of lime and wood ash on the nixtamalization of maize and tortilla chemical and nutritional characteristics. *Plant Foods Hum. Nutr.* 65, 130–135.
- Paredes- López, O., Guevara Lara, F., & Bello Pérez, L. A. (2010). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias*, 92(92).
- Pérez-Flores, G. C., Moreno-Martínez, E., & Méndez-Albores, A. (2011). Effect of microwave heating during alkaline-cooking of aflatoxin contaminated maize. *Journal of Food Science*, 76(2), T48–T52.
- Pflugfelder, R.L., Rooney, L.W., & Waniska, R.D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chem* 65(2), 127–132.
- Prasanna, B. M., Vasal, S. K., Kassahun, B., & Singh, N. N. (2001). Quality protein maize. *Current Science* 81:1308–1319
- Prosky, L., Nils-Georg, A.S.P., Schweizer, F.T., DeVries, W.J., & Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemistry*, 71, 1017–1023.
- Pearson, W.N., Stempfel, S.J., Valenzuela, J.S., Utley, M.H., and Darby, W.J. (1957). The influence of cooked vs. raw maize on the growth of rats receiving a 9% casein ration. *J. Nutr.* 62, 445–463.
- Pérez-Flores, G. C., Moreno-Martínez, E., & Méndez-Albores, A. (2011). Effect of Microwave Heating during Alkaline-Cooking of Aflatoxin Contaminated Maize. *J. Food Sci.* 76, T48–T52.
- Pflugfelder, R.L., Rooney, L.W., & Waniska, R.D. Dry matter losses in commercial corn masa production. *ResearchGate* 65, 127–132.
- Prasanna, B.M., Vasal, S.K., Kassahun, B., & Singh, N.N. (2001). Quality protein maize.
- de la Parra, C., Serna Saldivar, S.O., & Liu, R.H. (2007b). Effect of Processing on the Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Corn for Production of Masa, Tortillas, and Tortilla Chips. *J. Agric. Food Chem.* 55, 4177–4183.

- Qiu, S., Yadav, M.P., Chen, H., Liu, Y., Tatsumi, E., & Yin, L. (2015). Effects of corn fiber gum (CFG) on the pasting and thermal behaviors of maize starch. *Carbohydr. Polym.* 115, 246–252.
- Qiu, S., Yadav, M.P., Liu, Y., Chen, H., Tatsumi, E., & Yin, L. (2016). Effects of corn fiber gum with different molecular weights on the gelatinization behaviors of corn and wheat starch. *Food Hydrocoll.* 53, 180–186.
- Quintanar-Guzmán, A., Jaramillo Flores, M.E., Mora Escobedo, R., Chel Guerrero, L., & Solorza Feria, J. (2009). Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic properties of corn (*Zea mays* sp.) under different nixtamalization conditions. *Carbohydr. Polym.* 78, 908–916.
- Ramaswamy, H. S., Marcotte, M., Sastry, S., & Abdelrahim, K. (2014). Ohmic heating in food processing. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Rendon-Villalobos, R., Bello-Pérez, L. A., Osorio-Díaz, P., Tovar, J., & Paredes-López, O. (2002). Effect of storage time on in vitro digestibility and resistant starch content of nixtamal, masa, and tortilla. *Cereal Chemistry*, 79(3), 340.
- Rincón-Londoño, N., Vega-Rojas, L.J., 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. *Int. J. Biol. Macromol.* 91, 106–114.
- Rochfort, S., and Panozzo, J. (2007). Phytochemicals for health, the role of pulses. *J. Agric. Food Chem.*
- Rohlfing, K.A. (2009). Thermal characterization of corn starch mutants and textural effects on tortillas. M.S.
- Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortez, E., Palacios-Fonseca, A., Baños, L., Pons-Hernández, J. L., Guzmán-Maldonado, S. H., ... Rodríguez, M. E. (2007). Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry Journal*, 84(4), 304–312.
- Rooney, L. W., and Serna-Saldivar, S. O. (1987). Food uses of whole corn and dry-milled fractions. In: Watson SA., Ramstad editors. *Corn: Chemistry and technology*. St. Paul. Minn: American Association of Cereal Chemists. 426 p.p 399-429.

- Rooney, L. W., & Suhendro, E. L. (1999). Perspectives on nixtamalization (alkaline cooking) of maize for tortillas and snacks. *Cereal Foods World*, 44(7), 466–470.
- Rosentrater, K. A. (2006). A review of corn masa processing residues: Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management*, 26(3), 284–292
- Ruiz-Gutiérrez, M.G., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C.O., Talamás-Abbud, R., Barnard, J., Márquez-Meléndez, R., & Lardizábal-Gutiérrez, D. (2012). Nixtamalization in two steps with different calcium salts and the relationship with chemical, texture and thermal properties in masa and tortilla. *J. Food Process Eng.* 35, 772–783.
- Sakr, M., and Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 262–269.
- Salengke, S., and Sastry, S.K. (2007). Experimental investigation of ohmic heating of solid–liquid mixtures under worst-case heating scenarios. *J. Food Eng.* 83, 324–336.
- Sánchez-Madrigal, M. Á., Quintero-Ramos, A., Martínez-Bustos, F., Meléndez-Pizarro, C. O., Ruiz-Gutiérrez, M. G., Camacho-Dávila, A., Torres-Chávez, P., & Ramírez-Wong, B. (2014). Effect of different calcium sources on the bioactive compounds stability of extruded and nixtamalized blue maize flours. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2701–2710.
- Sánchez, R.A.M., Figueroa Cárdenas, J. de D., Taba, S., Vega, M. de la L.R., Sánchez, F.R., & Galván, A.M. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 27, 213–222.
- Sandhu, K.S., and Singh, N. (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chem.* 101, 1499–1507.
- Sarkis, J. R., Jaeschke, D. P., Tessaro, I. C., & Marczak, L. D. F. (2013). Effects of ohmic and conventional heating on anthocyanin degradation during the processing of blueberry pulp. *LWT - Food Science and Technology*, 51(1), 79–85.
- Sandstead, H.H., Muñoz, J.M., Jacob, R.A., Klevay, L.M., Reck, S.J., Logan, G.M., Dintzis, F.R., Inglett, G.E., and Shuey, W.C. (1978). Influence of dietary fiber on trace element balance. *Am. J. Clin. Nutr.* 31, S180–S184.

- Sastry, S. K., & Palaniappan, S. (1992). Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater. *Journal of Food Process Engineering*, 15(4), 241-261.
- Scrimshaw, N.S., Bressani, R., Béhar, M., and Viteri, F. (1958). Supplementation of cereal proteins with amino acids I. Effect of amino acid supplementation of corn-masa at high levels of protein intake on the nitrogen retention of young children. *J. Nutr.* 66, 485–499.
- Sen, A., Bergvinson, D., Miller, S.S., Atkinson, J., Fulcher, R.G., & Arnason, J.T. (1994). Distribution and Microchemical Detection of Phenolic Acids, Flavonoids, and Phenolic Acid Amides in Maize Kernels. *J. Agric. Food Chem.* 42, 1879–1883.
- Serna-Saldivar, S.O., Gomez, M.H., & Rooney, L.W. (1990). Technology, chemistry, and nutritional value of alkaline cooked maize products. In: Pomeranz, Y. (Ed.), *Advances in Cereal Science and Technology*, vol. 10. AACC International, St. Paul MN, pp. 243e307.
- Serna-Saldívar, S. O., & Amaya-Guerra, C. A. (2008). Nixtamalización del maíz a la tortilla: Aspectos Nutrimientales y Toxicológicos. El papel de la tortilla nixtamalizada en la nutrición y alimentación. Universidad de Querétaro, Series Ingeniería. México. Rodríguez García, M., Serna Saldivar, SO y Sánchez Senecio, F. pp, 105-151.
- Serna-Saldívar, S.O., Gutiérrez-Urbe, J.A., Mora-Rochin, S., and García-Lara, S. (2013). Potencial nutraceutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Rev. Fitotec. Mex.* 36, 295–304.
- Serna-Saldívar, S. O., Knabe, D. A., Rooney, L. W., Tanksley, T. D., & Sproule, A. M. (1988). Nutritional value of sorghum and maize tortillas. *Journal of Cereal Science*, 7(1), 83–94.
- Shipp, J., and Abdel-Aal, E.-S.M. (2010). Food applications and physiological effects of anthocyanins as functional food ingredients. *Open Food Sci. J.* 4.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh Sodhi, N., & Singh Gill, B. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chem.* 81, 219–231.

- Singleton, V. L., and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158.
- Steer, T.E., and Gibson, G.R. (2002). The microbiology of phytic acid metabolism by gut bacteria and relevance for bowel cancer. *Int. J. Food Sci. Technol.* 37, 783–790.
- Slavin, J. (2013). Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417-1435.
- Tester, R.F., Karkalas, J., and Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *J. Cereal Sci.* 39, 151–165.
- Trejo-González, A., Feria-Morales, A., & Wild-Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. In *Modification of Proteins*, (American Chemical Society), pp. 245–263.
- Tsai, C.Y., Dalby, A., & Jones, R.A. (1975). Lysine and tryptophan increases during germination of maize seed. *Cereal Chem.*
- Twillman, T. J., & White, P. J. (1988). Influence of monoglycerides on the textural shelf life and dough rheology of corn tortillas. *Cereal Chemistry*, 65(39), 253-257.
- Ullah, I., Ali, M., and Farooqi, A. (2010). Chemical and nutritional properties of some maize (*Zea mays* L.) varieties grown in NWFP, Pakistan. *Pak. J. Nutr.* 9, 1113–1117.
- Urizar Hernández, A., & Bressani, R. (1997). Efecto de la nixtamalización del maíz sobre el contenido de ácido fítico, calcio y hierro total y disponible. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 47(3), 217–23.
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J. C., Rojas-Molina, A., Beristain, F., & Rodríguez-García, M. E. (2012). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 478–486.
- Van Soest, P.J., Fadel, J., & Sniffen, C.J. (1979). Discount factors for energy and protein in ruminant feeds [Formulation of diets]. In *Proceedings Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers*, p.
- Vasal, S. K. (2000). The quality protein maize story. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(4), 445-450.

- Vega Rojas, L.J., Rojas Molina, I., Gutiérrez Cortez, E., Rincón Londoño, N., & Acosta Osorio, A.A., Del Real López, A., and Rodríguez García, M.E. (2017). Physicochemical properties of nixtamalized corn flours with and without germ. *Food Chem.* 220, 490–497.
- Verma, R.C., and Prasad, S. (1999). Kinetics of absorption of water by maize grains. *J. Food Eng.* 39, 395–400.
- Villada, J.A., Sánchez-Sinencio, F., Zelaya-Ángel, O., Gutiérrez-Cortez, E., & Rodríguez-García, M.E. (2017). Study of the morphological, structural, thermal, and pasting corn transformation during the traditional nixtamalization process: From corn to tortilla. *J. Food Eng.* 212, 242–251.
- Wang, W.-C., and Sastry, S.K. (1997). Starch gelatinization in ohmic heating. *J. Food Eng.* 34, 225–242.
- Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 14, 568–585.
- Warburton, M. L., Reif, J. C., Frisch, M., Bohn, M., Bedoya, C., Xia, X. C., Crossa, J., Franco, J., Hoisington, D., Taba, S. & Melchinger, A. E. (2008). Genetic diversity in CIMMYT nontemperate maize germplasm: landraces, open pollinated varieties, and inbred lines. *Crop Science*, 48(2), 617-624.
- Warinner, C., and Tuross, N. (2009). Alkaline cooking and stable isotope tissue-diet spacing in swine: archaeological implications. *J. Archaeol. Sci.* 36, 1690–1697.
- Watson, S.A., and Ramstad, P.E. (1987). Structure and composition. *Corn Chem. Technol.* 53–82.
- Wilkes, H. G. (1989). Maize: domestication, racial evolution and spread. In D.R. Harris & G.C. Hillman, eds. *Forage and farming*. London, Unwin Hyman. pp. 440-454
- Wongsa-Ngasri, P., and Sastry, S.K. (2015). Effect of ohmic heating on tomato peeling. *LWT - Food Sci. Technol.* 61, 269–274.
- Yadav, M.P., Moreau, R.A., & Hicks, K.B. (2007). Phenolic Acids, Lipids, and Proteins Associated with Purified Corn Fiber Arabinoxylans. *J. Agric. Food Chem.* 55, 943–947.
- Yahuaca-Juárez, B., Martínez-Flores, H.E., Huerta-Ruelas, J.A., Vázquez-Landaverde, P.A., Pless, R.C., & Tello-Santillán, R. (2013). Effect of

thermal-alkaline processing conditions on the quality level of corn oil.  
CyTA - J. Food 11, 1–7.

- Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., & Cronin, D.A. (2009). Development of rapid response thermocouple probes for use in a batch ohmic heating system. J. Food Eng. 93, 344–347.
- Zhu, Z., Bals, O., Grimi, N., Ding, L., & Vorobiev, E. (2015). Better damage of chicory tissue by combined electroporation and ohmic heating for solute extraction. Food Bioprod. Process. 94, 248–254.(2014).