



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN
POR CALENTAMIENTO ÓHMICO COMO UN MÉTODO DE
DESTOXIFICACIÓN DE AFLATOXINAS EN LAS
TORTILLAS DE MAÍZ”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

URIEL DE JESUS CRUZ CALDERÓN

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

CO-DIRIGIDA POR

Dra. ANAI ZAVALA FRANCO

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN
POR CALENTAMIENTO ÓHMICO COMO UN MÉTODO DE
DESTOXIFICACIÓN DE AFLATOXINAS EN LAS
TORTILLAS DE MAÍZ”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

URIEL DE JESUS CRUZ CALDERÓN

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

CO-DIRIGIDA POR

Dra. ANAI ZAVALA FRANCO

SINODALES

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

DIRECTORA

Dra. ANAI ZAVALA FRANCO

CODIRECTORA

Dr. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS

SINODAL

Dra. Ma. GUADALUPE FLAVIA LOARCA

PIÑA

SINODAL

Dra. ROCIO CAMPOS VEGA

SINODAL

DEDICADO

A toda mi familia, que sin ellos no hubiera podido progresar para crear esta obra.

A los miembros de mi familia que ya descansan en paz y que tenían fe en mí.
De alguna manera verán que si pude lograrlo.

A mis directoras y sinodales de tesis, que, sin todo su apoyo, esfuerzo y tiempo dedicado, esta obra no hubiera sido posible.

A todas las personas que me acompañaron en cada momento con la esperanza de ver este trabajo terminado.

A todos los que no querían verme crecer o que no quisieron formar parte de mi camino. Mi mano estará extendida por el resto de lo que me quede de vida.

A mí mismo, que sin la determinación para hacer este trabajo no hubiera podido superarme y perder el miedo de hacer una tesis.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, que puso en mi camino a las personas correctas, así como me hizo provisión los recursos e instalaciones para llevar a cabo este proyecto a través de mi carrera de Ingeniero Químico en Alimentos.

Al Laboratorio de Carbohidratos Funcionales de la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser la cuna de este proyecto de investigación. A sus instalaciones y a su personal excepcional.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional: Unidad Querétaro, por brindarme cobijo durante todo el desarrollo de esta investigación, por medio de su personal y sus instalaciones.

A la Dra. Marcela Gaytán Martínez, expreso mi enorme gratitud por haberme adoptado como su aprendiz y estudiante. Nadie creyó más en mí tanto como usted. Gracias por llevarme de la mano en este proyecto y le entrego esta obra como inmenso agradecimiento.

A la Dra. Anai Zavala Franco, le doy infinitas gracias por permitirme ser su aprendiz y estudiante externo, Nadie nunca me había hecho pensar de verdad antes de hacer algo tanto como usted. Le agradezco por guiarme durante todo este proyecto y le expreso mi gratitud con esta obra terminada.

Al Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas, agradezco enormemente por permitirme ser parte de su equipo de trabajo para formarme académica y personalmente. Le agradezco mucho por su apoyo y orientación con la finalización de esta obra.

A la Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña que, más que mi sinodal de tesis, fue mi docente durante la carrera. Le agradezco por enseñarme a valorar las cosas y a empeñarme en el trabajo de investigación. Sus enseñanzas se plasman en forma de agradecimiento en esta obra.

A la Dra. Rocio Campos Vega, por ser parte de este proyecto desde el inicio. Agradezco su participación como sinodal y como docente durante mi carrera. Gracias por motivarme a seguir con el proyecto de tesis, mismo que presento en forma de agradecimiento.

Al Dr. Ángel Ramón Flores Sosa, por darme ánimos durante el proyecto de tesis y por enseñarme a usar un colorímetro. Gracias por ser tan buen docente y maestro.

A la Dra. Ma. Estela Vázquez Barrios, por su enorme apoyo durante el tiempo de mi formación que estuvo alineado a este proyecto de tesis. Usted fue y siempre será uno de los pilares más fuertes en mi formación como ingeniero. Usted me enseñó lo que es el tener alguien en quien confiar y eso me lo llevo para siempre. No imaginé haber podido compartir tanto con usted y por ello le agradezco infinitamente. Gracias por tantas buenas experiencias y recuerdos en todas sus clases.

A mi familia, que sin ellos no hubiera podido dar muchos pasos en este proyecto. A mi madre, Sandra, por ser el pilar más fuerte en mi vida entera y a mi padre, Juan Carlos, por formarme con todo lo necesario para ser un mejor hombre. A mi hermana, Ana Belén, por creer en mí como hermano mayor a pesar de todas las caídas que he tenido en la vida. A mi abuela, Beatriz, por poner en su mente todos los ánimos y apoyo para mí y a mi abuelo, Ángel, que sin su existencia no tendría por dónde empezar a pensar. Todos los días trabajo hasta explotar para ser una mejor persona para ustedes, aunque pudiera parecer lo contrario.

A mis cuatro hermanos de investigación: Aldo, Gerson, Luis y Orlando. En parte, por ellos supe que este proyecto de tesis ya tenía mi nombre desde tiempos inmemorables. Aunque compartí más experiencias de investigación más con unos que con otros, los cuatro son excelentes compañeros y amigos. Siempre tendrán una mano extendida mientras esté vivo.

A mis últimos amigos más cercanos; Madeleine, Acevedo, Saraí, Valeria, Juan Manuel, Juan Antonio y Mauricio, tanto como quienes llegaron con ellos a formar parte de mi vida. Agradezco enormemente a la vida por su presencia en todo el tiempo de esta tesis y espero que, con el camino que llevamos, sea el inicio de muchas colaboraciones.

A todos las personas e instituciones que por algún motivo no mencioné anteriormente pero que formaron parte de estos últimos dos años de mi vida, agradezco su presencia y apoyo. Tal vez no los recuerdo actualmente, pero comparto este trabajo con ustedes.

Y, por último, a mí mismo. Te agradezco a ti, Uriel del pasado más pasado, del pasado más presente, al presente por seguir aquí y al futuro que sigo formando. Sigo cumpliendo la promesa de volver más fuerte a ese individuo que crece día a día desde hace años con el pesar de ser defectuoso. Por ti, voy a seguir adelante con esa necesidad de ayudar, motivar, proveer y acercar cada vez más ese sentido de perfección para apoyar a todos los que han puesto hasta el más mínimo grano de ayuda en la persona que soy actualmente. Toda la disciplina y determinación se ven plasmados en este trabajo que no muchos se atreven a realizar.

Gracias a todos, por todo.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 El maíz	3
2.1.1 Origen del maíz	3
2.1.2 Características fisicoquímicas del maíz	5
2.1.3 Importancia del maíz en México	11
2.1.4 Calidad del maíz para consumo humano.....	11
2.2 Las micotoxinas	12
2.2.1 Definición de las micotoxinas.....	12
2.2.2 Principales hongos productores de micotoxinas.....	13
2.2.3 Principales micotoxinas	14
2.2.3.1 Características generales.....	14
2.2.3.2 Micotoxicosis	16
2.2.3.3 Problemas sociales y de salud asociados a las micotoxinas	17
2.2.3.4 Regulación de las micotoxinas a nivel nacional y mundial.....	18
2.2.4 Las aflatoxinas	20
2.2.4.1 Hongos productores	20
2.2.4.2 Biosíntesis de aflatoxinas	22

2.2.4.3	Características generales.....	24
2.2.4.4	Aflatoxicosis	25
2.2.4.5	Regulación nacional e internacional.....	26
2.2.4.6	Control.....	28
2.2.4.6.1	Control de los hongos	28
2.2.4.6.1.1	Manejo en campo.....	29
2.2.4.6.1.2	Agentes antimicóticos	30
2.2.4.6.1.3	Ingeniería genética.....	32
2.2.4.6.2	Control de aflatoxinas	34
2.2.4.6.2.1	Métodos biológicos.....	34
2.2.4.6.2.2	Métodos físicos	35
2.2.4.6.2.3	Métodos químicos	36
2.2.4.6.2.4	Métodos combinados	37
2.3	La nixtamalización.....	37
2.3.1	La nixtamalización tradicional.....	37
2.3.2	Cambios en el grano de maíz	38
2.3.2.1	Físicos	38
2.3.2.2	Químicos	39
2.3.2.3	Valor nutritivo	40
2.3.3	Problemas de la nixtamalización	41
2.3.4	Métodos alternativos de nixtamalización	41
2.4	Calentamiento óhmico	43
2.4.1	Principios del calentamiento óhmico.....	43
2.4.2	Principales usos.....	45
2.4.3	Calentamiento óhmico para la nixtamalización.....	45
3.	HIPOTESIS.....	49

4. OBJETIVOS	49
4.1 General	49
4.2 Específicos.....	49
5. METODOLOGÍA	50
5.1 Materiales y reactivos químicos	50
5.2 Caracterización física del grano de maíz	50
5.2.1 Tamaño del grano.....	50
5.2.2 Peso hectolítrico	50
5.2.3 Determinación del índice de flotación (Dureza del grano) ...	51
5.2.3.1 Preparación de solución de sacarosa al 67%	51
5.2.3.2 Índice de flotación	51
5.2.4 Color	51
5.2.5 Textura.....	52
5.3 Caracterización fisicoquímica del grano de maíz	53
5.3.1 Humedad	53
5.3.2 pH	53
5.3.3 Composición proximal.....	53
5.3.3.1 Determinación del extracto etéreo.....	54
5.3.3.2 Determinación del contenido de proteína.....	55
5.3.3.3 Determinación del contenido de fibra cruda	55
5.4 Caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	56
5.4.1 Determinación de las propiedades eléctricas de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	56
5.5 Inoculación del grano de maíz.....	58
5.5.1 Precauciones de seguridad para el manejo de aflatoxinas..	58
5.5.2 Inoculación del maíz	58

5.6	Nixtamalización por calentamiento óhmico	59
5.7	Elaboración de tortillas	60
5.8	Cuantificación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.	60
5.9	Caracterización fisicoquímica de las tortillas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico	61
5.9.1	Humedad	61
5.9.2	pH	61
5.10	Diseño experimental y análisis estadístico	62
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
6.1	Caracterización física del grano de maíz.	64
6.1.1	Textura.....	72
6.1.2	Color	74
6.2	Caracterización fisicoquímica del grano de maíz.	80
6.3	Caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	86
6.4	Caracterización fisicoquímica de tortillas de maíz.....	97
6.5	Cuantificación de aflatoxinas en maíz nixtamalizado	101
7.	CONCLUSIONES	111
8.	BIBLIOGRAFÍA	113

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de aflatoxinas según su peligro específico.	15
2	Límites de concentración máxima permitida de aflatoxinas en alimentos en México.	28
3	Agentes antimicóticos para inhibición del desarrollo de aflatoxinas.	31
4	Diseño experimental para los tratamientos de nixtamalización con calentamiento óhmico en las diferentes variedades de maíz.	62
5	Caracterización física del grano de maíz.	65
6	Clasificación de tamaño del grano de maíz según el peso de 100 granos.	66
7	Clasificación de dureza según el peso hectolítrico.	66
8	Clasificación de dureza según el índice de flotación del grano de maíz.	69
9	Clasificación de dureza en función de la caracterización física del grano de maíz.	69
10	Parámetros de calidad de maíces utilizados en la industria de harinas nixtamalizadas.	71
11	Dureza de las partes anatómicas del grano de maíz.	72
12	Parámetros de color de los granos de maíz analizado.	76
13	Caracterización fisicoquímica del grano de maíz.	81
14	Proporción de componentes anatómicos en las variedades de maíz analizadas.	84
15	Propiedades eléctricas de las distintas variedades de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico a diferentes concentraciones de cal.	88
16	Caracterización fisicoquímica de las tortillas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	98
17	Concentración inicial de aflatoxinas en las variedades de maíz contaminado para cada nivel.	101
18	Contenido de aflatoxinas (ng/g) en tortillas de maíz nixtamalizado mediante calentamiento óhmico.	102

19	Porcentaje de degradación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado mediante calentamiento óhmico.	103
----	--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Estructura y composición química del grano de maíz.	6
2 Micrografía SEM de gránulos de almidón en el endospermo.	7
3 <i>Aspergillus flavus</i> .	21
4 <i>Aspergillus parasiticus</i> .	21
5 Biosíntesis de aflatoxinas.	23
6 Biotransformación de la AFB ₁ .	24
7 Estructura de las principales aflatoxinas.	25
8 Activación y reacción de la AFB ₁ con el ADN humano.	27
9 Diagrama de celda utilizada para cocción por calentamiento óhmico.	44
10 Puntos de punción (marcados con "X") para la prueba de dureza en distintas zonas anatómicas del grano de maíz.	52
11 Comparación de propiedades físicas: Índice de flotación – Peso hectolítrico para las distintas variedades de maíz.	70
12 Comparación de propiedades físicas: Índice de flotación – Peso de cien granos para las distintas variedades de maíz.	70
13 Espacio de color CIE L* a* b* y L* C* h°	80
14 Velocidad de calentamiento para las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	92
15 Comparación de conductividad eléctrica y velocidad de calentamiento en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	96
16 Comparación de conductividad eléctrica y resistencia en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	96
17 Comparación de conductividad eléctrica y potencia en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.	97
18 Degradación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.	109
19 Concentración de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.	109
20 Mecanismo de degradación de la AFB ₁ durante el proceso de nixtamalización.	110

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es el segundo cultivo con mayor importancia a nivel mundial y uno de los granos alimenticios conocidos más antiguos por la humanidad. El grano de maíz es esencial en la dieta de una gran densidad poblacional, especialmente en América Latina, lo cual implica que la producción de alimentos con base en este grano, debe ser inocua y segura para el correcto desarrollo de la sociedad. Existen amenazas biológicas, como los hongos y las toxinas que estos producen. Este problema ha conducido a la investigación y al desarrollo de métodos que logren eliminar estas amenazas para el ser humano. El presente trabajo de investigación evalúa la tecnología de calentamiento óhmico como un método de destoxificación de maíz durante la elaboración de productos nixtamalizados. Este método fue evaluado por medio de la nixtamalización de diversas variedades de maíz aplicando calentamiento óhmico, el cual fue probado para eliminar el contenido de aflatoxinas, provenientes de la especie fúngica *Aspergillus flavus* Link. Se utilizó un diseño factorial, considerando: condiciones de nixtamalización, concentración de cal (0.1 % y 0.3 %) y 5 variedades de maíz (Amarillo, Azul, Blanco de Celaya, Blanco de Sinaloa y Morado) contaminado con dos concentraciones iniciales de aflatoxina B₁ y B₂. Los resultados mostraron una degradación de hasta 86.29% en los tratamientos de nixtamalización con calentamiento óhmico a una corriente continua de 120 V y calor húmedo durante la elaboración final de las tortillas. La reducción de aflatoxinas en las distintas variedades de maíz se ve influenciada principalmente por sus características fisicoquímicas que determinan las propiedades eléctricas de la harina de maíz nixtamalizado para elaborar el producto final.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el maíz (*Zea mays* L.) tiene gran importancia en la dieta de la población mexicana, incluyendo los productos de nixtamalización que por sí mismos representan una parte importante en el comercio del país, a la vez que contribuyen con el desarrollo industrial de la obtención de productos a partir de granos de maíz.

El proceso de nixtamalización convencional ha perdurado por mucho tiempo en México y otros países de América Latina, aunque en la actualidad presenta demasiadas complicaciones, en términos de medio ambiente, sustentabilidad y tecnología. Este proceso, aunque conlleva a excelentes mejoras nutricionales al consumo de maíz, propicia la producción de residuos peligrosos para el medio ambiente y para el compromiso económico de la población mexicana. Además, puede requerir cantidades muy grandes de consumo de agua tras la producción de productos de nixtamalización, que a su vez puede requerir altos costes energéticos.

La problemática de la nixtamalización no yace sólo en las posibles consecuencias de la nixtamalización convencional. Otro problema surge a partir del cuidado que se le da al grano de maíz, la materia prima del proceso de nixtamalización y esta problemática son las aflatoxinas, metabolitos secundarios producidos por hongos en el grano de maíz que han representado un riesgo considerable y lo siguen siendo en gran medida para la población mexicana. El desarrollo de aflatoxinas en el grano de maíz es un fenómeno natural durante la cosecha, producción y almacenamiento del grano, aunque es controlable tomando las medidas de mitigación adecuadas.

Los problemas de la nixtamalización y de aflatoxinas, da paso a la búsqueda de una solución. Por ello, la presente investigación pretende evaluar el método de calentamiento óhmico como vía alternativa del proceso de nixtamalización convencional, así como evaluar el método de nixtamalización por calentamiento óhmico en el control o destoxificación de productos de nixtamalización, haciendo énfasis en las principales aflatoxinas que han presentado un riesgo potencial en la población mexicana a través del consumo de un alimento que cobra enorme importancia cultural y nutricional: la tortilla.

La evaluación de este método como método de eliminación de aflatoxinas por medio de la degradación de las mismas permitirá concentrar la importancia de su uso como proceso de nixtamalización para evaluar su eficiencia en cuanto a inocuidad alimentaria y economía.

2. ANTECEDENTES

2.1 El maíz

2.1.1 Origen del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie perteneciente al grupo de los cereales y granos alimenticios más antiguos conocidos por la humanidad. Pertenece a la familia de las Poáceas o Gramíneas y es la única especie que se cultiva de este género (Paliwal, 2001).

La palabra maíz, de origen caribeño, significa “lo que sustenta la vida”. Este cereal, junto con el trigo y el arroz, son cereales de alta importancia a nivel mundial, funcionando como principales suministros de elementos nutritivos que forman parte de la dieta del ser humano y de muchas especies animales. Además de ello, fungen como materia prima en la industria de la transformación, sirviendo principalmente al sector alimenticio (Paredes-López *et al.*, 2010).

El maíz destaca como una planta anual dotada de un amplio sistema radicular fibroso. Es una especie que lleva a cabo su reproducción por polinización cruzada ya que, la flor femenina (espiga) y masculina (panoja) se hallan en secciones distintas de la planta (Paredes-López *et al.*, 2010).

El maíz también puede denominarse como elote o mazorca, término que también se utiliza en Escocia e Irlanda para designar otros cereales del grupo de las gramíneas como el trigo, la avena y otros cereales cultivados (centeno), y en algunas partes de África para indicar el grano de sorgo. El maíz ha sido domesticado desde hace 8700 años en las tierras altas de México (Arendt & Zannini, 2013).

El cultivo de maíz tiene origen en América Central, principalmente en México, lugar del que se difundió hacia el norte de América en Canadá y hasta el Sur en Argentina. Las evidencias más antiguas de maíz surgieron en el valle de Tehuacán en México hace unos 7000 años. Este se presentaba como un cereal de amplia importancia en el ámbito alimentario y su difusión se realizaba por medio de la recolección de semillas para su posterior siembra en otras partes del mundo (Paredes-López *et al.*, 2010).

Aunque existe una amplia diversidad en sus formas, todos los tipos de maíz derivan de una especie denominada como teosintle, un cultivo que se considera como aquel que dio paso al origen del maíz y permitió la existencia de todas las variedades de maíz existente hoy en día debido al retrocruzamiento entre el teocintle y aquellas variedades que fueron naciendo por el cultivo de semillas a nivel mundial (Paredes-López *et al.*, 2010).

El grano de maíz representa alrededor del 15 al 56 % del total de calorías diarias en las dietas de las personas en aproximadamente 25 países en desarrollo, particularmente en África y América Latina (Paredes-López *et al.*, 2010), donde la proteína animal es escasa, costosa y, en consecuencia, no está disponible para un amplio sector de la población. La producción mundial actual es de alrededor de 844,4 millones de toneladas de grano de alrededor de 161,9 millones de hectáreas (Paredes-López *et al.*, 2010). Los EE. UU. por sí solos representan el mayor productor de maíz con 316 millones de toneladas de maíz cosechado (37 % de la producción mundial total de maíz) de alrededor de 329 millones de hectáreas.

En términos de composición química, el 72–73 % del grano entero está compuesto de almidón, del cual el 98 % está en el endospermo (Earle *et al.*, 1946) donde también se concentra la proteína (74 % de la proteína del grano). El embrión contiene 83 % de los lípidos totales del grano, 70 % del azúcar, 78 % de los minerales y 26 % de la proteína (Watson, 2003). En cuanto a las vitaminas, el maíz contiene dos vitaminas liposolubles, la A (β -caroteno) y la E, y la mayoría de las hidrosolubles excepto la vitamina B12 (Loy & Wright, 2003). El maíz se utiliza generalmente para la alimentación animal, particularmente en los EE. UU., y para la producción de botanas, harina, pan, papillas, productos al vapor, bebidas alcohólicas (cerveza) y no alcohólicas, y cereales para el desayuno. El almidón de maíz generalmente se convierte en jarabes, edulcorantes y productos industriales (bolsas biodegradables) (Rooney & Serna-Saldívar, 2003). Además, la ausencia de gliadina y la presencia de hidratos de carbono de fácil digestión han convertido al maíz en una de las harinas de cereales más adecuadas para la preparación de alimentos para individuos celíacos (Zannini *et al.*, 2012).

2.1.2 Características fisicoquímicas del maíz

El grano de maíz es el cereal más grande conocido entre los cereales de grano pequeño (hasta 10 veces más grande que el promedio) con un peso que en promedio alcanza los 300 mg. Éste puede diferir significativamente en el color que posee, mismo que puede ser desde blanco a amarillo, naranja, rojo, púrpura o marrón. Estas diferencias de color pueden deberse a la diferencia genética presente en las distintas variedades de maíz en el pericarpio, capa de aleurona, endospermo y germen (Arendt & Zannini, 2013).

Dentro de la composición química y estructural del maíz (Figura 1), la estructura externa del grano de maíz se denomina pericarpio y contribuye al color del mismo. El grosor del pericarpio depende del genotipo presente y oscila entre los 25 y 140 μm , representando de 5 – 6 % del peso seco de la semilla entera. El pericarpio está compuesto por células muertas en forma de tubos celulósicos que recubren al endospermo y al germen (Arendt & Zannini, 2013). En esta sección, se encuentra la capa de células de aleurona, misma que recubre el interior del grano (endospermo y germen) actuando como membrana semipermeable para restringir el flujo de moléculas grandes al interior del grano. La capa de células de aleurona se compone de células grandes y densas que son ricas en minerales y proteínas de buena calidad (Arendt & Zannini, 2013).

En cuanto al interior del grano, se halla principalmente el endospermo, mismo que comprende del 82 al 84 % del peso del grano entero y representa la principal fuente de almidón (de 86 a 89 % en base seca) y la mayor parte de proteína disponible (7 a 10 % en base seca). El endospermo del maíz se compone por células alargadas que se llenan de gránulos de almidón de 5 a 30 μm de diámetro encerrados en una matriz proteica. Esta última se compone por cuerpos proteicos de 2 a 3 μm que contienen en su mayoría zeína, fracción proteica que se caracteriza por ser baja en lisina (Arendt & Zannini, 2013).

El embrión del maíz, también conocido como germen, constituye la parte viva del maíz que, junto al escutelo del grano, funcionan como la parte nutritiva del mismo. Las paredes de las células del escutelo son gruesas y contienen numerosas fosas

y espacios intercelulares que facilitan el movimiento de material entre las células (Arendt & Zannini, 2013).

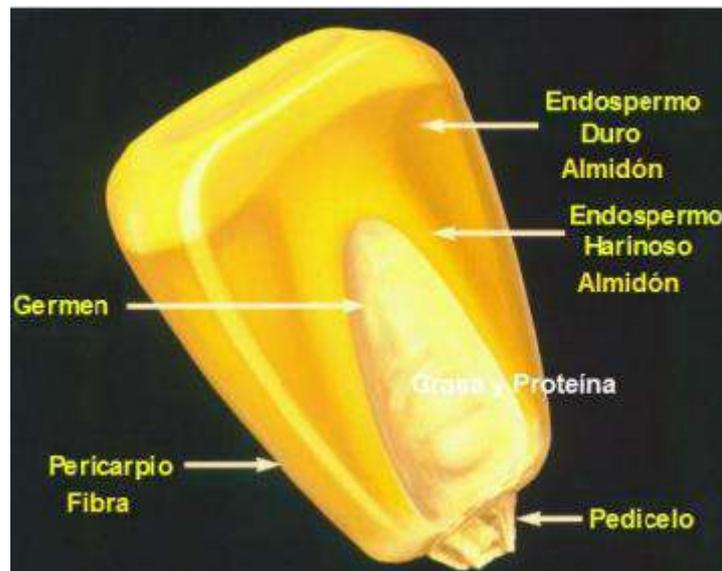


Figura 1. Estructura y composición química del grano de maíz (tomado de Gaytán-Martínez, 2011).

Dentro de la composición del maíz, los polisacáridos, las proteínas y los lípidos representan los tres componentes principales del grano de maíz. Un grano de maíz típico se compone de 70 a 75 % de almidón, 8 a 10 % de proteína, 4 a 5 % de lípidos, 1 a 3 % de azúcar y 1 a 4 % de ceniza, lo que proporciona aproximadamente 365 kcal/100 g de energía. El maíz tiene un bajo contenido de proteína, generalmente con un promedio de 8 a 10 %, y es especialmente deficiente en lisina (0,25 %) en comparación con la avena o la cebada (0,4 %) y el trigo (0,6 %). El almidón es el componente principal del grano de maíz. El embrión es particularmente rico en lípidos, minerales y azúcares. Las vitaminas generalmente se concentran en el embrión, especialmente las vitaminas liposolubles A y E. El maíz contiene una proporción de todas las vitaminas importantes con excepción de la vitamina B12 (Arendt & Zannini, 2013).

Los principales constituyentes químicos de la cariósida del maíz son los carbohidratos. Están presentes en diferentes tejidos del grano de maíz. Entre los carbohidratos presentes, el almidón es el componente mayoritario (72 % del peso

seco del grano) y se concentra principalmente en el endospermo. Por el contrario, los azúcares se concentran principalmente en el germen (Arendt & Zannini, 2013).

El almidón está compuesto por dos polímeros de glucano, la amilosa y la amilopectina, que se disponen estructuralmente en gránulos poligonales/redondos insolubles (Figura 2) y de diferentes tamaños que pueden alcanzar hasta 25 μm de diámetro. En el endospermo del maíz, los gránulos de almidón se almacenan en un orgánulo celular llamado amiloplasto, que representa aproximadamente el 87.6 % del peso seco total del endospermo. Como se observa en otros cereales, los gránulos de almidón están compuestos principalmente por una fracción ramificada, la amilopectina, y una fracción lineal, la amilosa. La amilosa, que constituye del 25 al 30 % del almidón de maíz, es esencialmente un polímero lineal de unidades de D-glucopiranosilo unidas por enlaces α -(1 \rightarrow 4) (Watson, 2003). La amilopectina, que constituye el 70 – 75 % del almidón de maíz, consta de cadenas de D-glucósido con enlaces α -(1 \rightarrow 4) y está muy ramificada a través de enlaces α -(1 \rightarrow 6). Las cadenas unitarias con enlaces α -(1 \rightarrow 4) pueden tener dos longitudes; ya sea de 12 a 20 o de 40 a 60 unidades de glucosa (Arendt & Zannini, 2013).

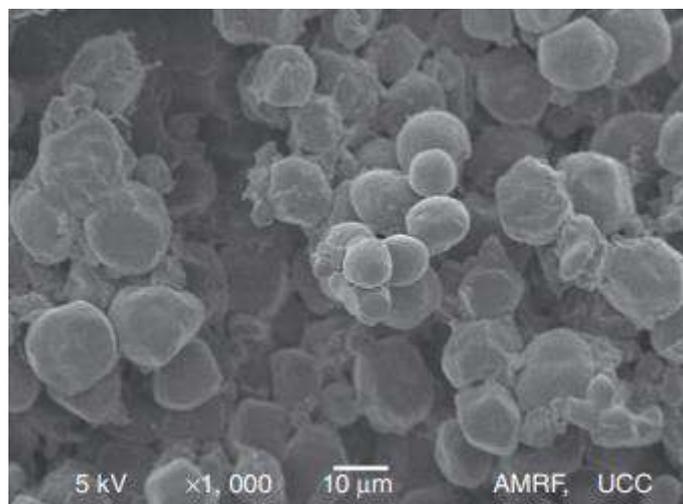


Figura 2. Micrografía SEM de gránulos de almidón en el endospermo (tomado de Arendt & Zannini, 2013).

Además de amilosa y amilopectina, los gránulos de almidón contienen pequeñas cantidades de otros componentes menores, como proteínas, lípidos y minerales (fósforo), que se encuentran en la superficie o dentro de los gránulos.

Generalmente en el maíz, los contenidos de almidón, lípidos, proteínas y minerales disminuyen en relación con el tamaño del gránulo. El contenido de lípidos varía de 0.6 a 1.1 % en peso seco en almidones de maíz no cerosos (que contienen amilosa), mientras que su contenido es insignificante en almidones de maíz cerosos. Además, los lípidos del almidón se caracterizan principalmente por ácidos grasos libres (51 % – 62 %) y bajos niveles de lisofosfolípidos (24 % – 46 %) (Arendt & Zannini, 2013).

Los gránulos de almidón también contienen proteínas en niveles que van del 0.3 al 1.0 %. Las proteínas asociadas a gránulos de almidón se definen como aquellas que son claramente diferentes de las proteínas de almacenamiento y están unidas a la superficie del gránulo o son componentes integrales dentro del gránulo de almidón. Los polipéptidos asociados a gránulos internalizados incluyen enzimas biosintéticas de almidón, tales como proteína cerosa, y enzimas ramificadoras de almidón que están intrínsecamente asociadas con la matriz de gránulos de almidón. Los polipéptidos localizados en la superficie son prácticamente todas zeínas (clase de prolamina) y constituyen aproximadamente el 50 % del total de proteínas/polipéptidos asociados a gránulos (Arendt & Zannini, 2013).

Las propiedades físicas del almidón de maíz están fuertemente influenciadas por la estructura de los polisacáridos y la distribución porcentual de amilosa y amilopectina. El almidón con alto contenido de amilosa, que se gelatiniza a temperaturas más altas, se puede usar para formar geles y películas. Por el contrario, los gránulos de almidón ceroso tienen una temperatura de gelatinización más baja y la amilasa animal los digiere más rápidamente (Arendt & Zannini, 2013).

Las temperaturas de gelatinización del almidón de maíz generalmente oscilan entre 67 y 68 °C, aunque también se han reportado valores de temperatura de gelatinización más altos (71.9 – 78.8 °C). La alta temperatura de gelatinización del almidón de maíz podría deberse a la mayor proporción de cadenas más largas en la molécula de amilopectina (Arendt & Zannini, 2013). Estas cadenas podrían formar hélices dobles largas que requerirían una temperatura más alta para disociarse completamente que la requerida para hélices dobles más cortas. Generalmente, los maíces con alta temperatura de gelatinización se utilizan en la

producción de harina de maíz con propósitos de panificación, ya que se necesita alta temperatura durante el procesamiento (Salgado-Ordosgoitia *et al.*, 2019). Por otro lado, los maíces con baja temperatura de gelatinización se pueden utilizar para la elaboración de tortillas con el proceso tradicional de nixtamalización (Dong *et al.*, 2008).

El tratamiento alcalino-térmico de la nixtamalización, gelatiniza parcialmente el almidón, resultando en una saponificación parcial de los lípidos y también en solubilizar una parte de las proteínas que rodean los gránulos de almidón (Salgado-Ordosgoitia *et al.*, 2019). El maíz también contiene una fracción de almidón que se denomina almidón resistente (AR) y se clasifica como fibra dietética porque escapa a la digestión en el intestino delgado, en maíz, el contenido de AR es de aproximadamente 2 % en base seca. El AR es fermentado por bacterias cuando llega al intestino grueso, lo que aumenta la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), incrementando el volumen y reduciendo la cantidad de materia fecal, además, reduce los niveles de glucosa en sangre y tiempos de tránsito intestinal (Olayo-Contreras *et al.*, 2022). Se ha demostrado que el almidón resistente del maíz reduce el colesterol sérico en ratas (Olayo-Contreras *et al.*, 2022). Debido a estos beneficios para la salud, se pueden preparar diferentes productos de panadería, como panes y cereales para el desayuno, utilizando AR como fuente de fibra (Arendt & Zannini, 2013).

El grano de maíz posee otros componentes como fibra dietaria, compuesta por polisacáridos no amiláceos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano, pero experimentan una fermentación total o parcial en el intestino grueso (Olayo-Contreras *et al.*, 2022). Dentro de estos se pueden hallar componentes solubles como pectinas, gomas y β -glucanos, y componentes insolubles, que incluyen celulosa, lignina y hemicelulosas (Arendt & Zannini, 2013).

La proteína es el segundo componente más abundante del maíz, después del almidón, oscilando entre 6 % y 12 % y se encuentra principalmente en las partes germinal y endoespermática del grano de maíz, pero las características de la proteína difieren significativamente en estas dos partes de almacenamiento (Arendt & Zannini, 2013). Generalmente, el germen contiene 35 % de proteína, y

es de alta calidad, mientras que el endospermo tiene solo 9 % de proteína, que es de mala calidad, principalmente por su deficiencia en los aminoácidos esenciales lisina y triptófano. Sin embargo, el 80 % del contenido total de proteína en el grano se encuentra en el endospermo, ya que representa del 80 al 85 % del peso seco total del grano, mientras que el germen constituye el peso restante (Arendt & Zannini, 2013).

Dentro de la carióspside del maíz, los lípidos se concentran casi exclusivamente en las células del escutelo del germen (76–83 %), seguido del pericarpio (1–2 %), la tapa de la punta (1 %), el almidón (1–11 %) y la capa de aleurona (13–15 %). En el germen, el aceite de maíz se dispone en gotitas microscópicas (1,31 μm de diámetro) conocidas como cuerpos oleosos (Arendt & Zannini, 2013). El germen contiene un 39-47 % de lípidos, que en su mayoría son triglicéridos, con algunos ésteres esterílicos y diglicéridos, así como pequeñas cantidades de glicolípidos y fosfolípidos (Arendt & Zannini, 2013).

Los granos de cereales son bien conocidos por ser buenas fuentes de algunas de las vitaminas del complejo B (Mendoza *et al.*, 2016). El grano de maíz contiene dos vitaminas liposolubles, vitamina A (β -caroteno) y vitamina E. Además, posee la mayoría de las vitaminas hidrosolubles como la tiamina (vitamina B1) y la piridoxina (vitamina B6), pero es deficiente en ácido ascórbico (vitamina C) y cobalamina (vitamina B12). La vitamina B3 (niacina) está presente en niveles elevados en forma unida y, a menos que se procese adecuadamente, biológicamente no está disponible para los humanos (Mendoza *et al.*, 2016).

Los contenidos minerales del maíz oscilan entre 1.0 y 1.3 %, siendo el germen el que proporciona casi el 80 % de los minerales del grano, en comparación con menos del 1 % del endospermo. El fósforo (en forma de fitato) (0,29 % en base seca), potasio (0,37 % en base seca) y magnesio (0,14 % en base seca) son los minerales más predominantes que se encuentran en el maíz y aportan casi el 85 % del contenido mineral del grano (Watson, 2003). Como ocurre con la mayoría de los cereales, el maíz es bajo en calcio (0,03 % base seca) y hierro (30 $\mu\text{g/g}$) (su biodisponibilidad también se ve retardada por el fitato concentrado en el germen de maíz), así como en oligoelementos como magnesio, cobre, selenio y yodo (Arendt & Zannini, 2013).

2.1.3 Importancia del maíz en México

El maíz es el segundo cereal que más se cultiva a nivel mundial y su importancia en México radica en el rendimiento que este cereal presenta en América Central, siendo la participación de México con una producción de hasta 20 500 toneladas por cada 1000 hectáreas sembradas por año (Rodríguez-García *et al.*, 2008)

La producción anual de maíz en México se estima en 19 millones de toneladas por año, con una importación promedio de 5 millones de toneladas para satisfacer la demanda interna. De esta cantidad, el 47 % se destina al sector pecuario, el 32 % al sector productor de almidones y 12 % al sector harinero (Preciado-Ortiz *et al.*, 2019). Del maíz utilizado en el sector harinero, la mayor parte es utilizada en la elaboración de tortillas, representando un consumo aproximado de 12 millones de toneladas de maíz al año (Rodríguez-García *et al.*, 2008)

Al ser el cereal más importante en México, es ampliamente considerado en la dieta de los mexicanos con presencia en al menos 4 000 productores, que representan aproximadamente 67.6 % del total de la superficie de cultivo en el país, lo cual representa hasta 1/3 parte del valor total de la producción agrícola en México, dando ocupación a 2.2 millones de personas y generando hasta 135 000 empleos (Preciado-Ortiz *et al.*, 2019).

2.1.4 Calidad del maíz para consumo humano

El maíz como cultivo es útil debido a su diversa funcionalidad como fuente de alimento tanto para humanos como para animales. El maíz se puede consumir sin mazorca, tostado, hervido, frito, asado, molido y fermentado para la producción de muchos alimentos tradicionales, como panes, tortillas, papillas, polenta, gachas, tortas, bocadillos, desayunos y bebidas alcohólicas. Los granos de maíz se pueden procesar para su uso como espesantes, edulcorantes, aceite de cocina y no consumibles (Arendt & Zannini, 2013).

Dado que el maíz posee una gran cantidad de aplicaciones, el producto debe estar libre de riesgos químicos y biológicos, especialmente al consumirse fresco o inmaduro hasta el consumo después de procesar. En cualquier presentación, debe mostrarse inocuo para el consumo humano y libre de todo riesgo (Arendt & Zannini, 2013).

Esta precaución se emite a nivel mundial debido a que el consumo de maíz tiene riesgos asociados debido a la contaminación por el hongo *Aspergillus* y esto se aplica tanto a los alimentos como a las bebidas. Estos hongos son las fuentes de micotoxinas que han demostrado ser toxinas mutagénicas, cancerígenas e incluso teratogénicas, siendo la más frecuente y tóxica la aflatoxina B₁ (Nguyen *et al.*, 2020). Las estrategias destinadas a reducir la exposición a las micotoxinas en la dieta de la población deben centrarse en la educación de las comunidades consumidoras de productos de maíz sobre las implicaciones para la salud y los riesgos de la ingestión de micotoxinas, así como los métodos para la eliminación de estas, que permita el consumo inocuo de cualquier producto de maíz (Arendt & Zannini, 2013).

2.2 Las micotoxinas

2.2.1 Definición de las micotoxinas

Las micotoxinas son metabolitos secundarios fúngicos que se presentan en cultivos y productos alimenticios, éstas, al entrar en contacto con el ser humano por medio de la ingestión, pueden desencadenar padecimientos indeseables como micotoxicosis (Barac, 2019).

Las micotoxinas son un grupo muy amplio y diverso de toxinas fúngicas naturales que se ven fuertemente implicadas como agentes químico-biológicos causantes de enfermedades tóxicas en seres humanos y animales (Souza *et al.*, 2017).

Las micotoxinas han representado un riesgo para la humanidad desde tiempos remotos y hoy en día existen entre 20 000 y 300 000 micotoxinas producidas por microhongos (hongos que producen micotoxinas a nivel celular) y macrohongos (hongos que pueden estar presentes en productos de charcutería y que pueden ser venenosos y mortales). Así como la diversidad de toxinas es grande, aquella que describe los mecanismos de toxicidad es de igual magnitud, siendo la vía habitual de exposición a las micotoxinas es la ingestión como contaminantes de alimentos (Souza *et al.*, 2017). Sin embargo, la vía dérmica y la inhalación también pueden ser vías importantes de exposición. Los efectos directos de las micotoxinas van desde enfermedades agudas en las que pueden existir condiciones graves de salud alterada antes de la muerte como resultado de la

exposición a la toxina, éstas condiciones son más probables después de la exposición a altos niveles de una micotoxina (Barac, 2019).

Las micotoxinas que representan el mayor riesgo potencial para la salud humana y animal se presentan en productos como alimentos y piensos para animales, los cuales contienen principalmente aflatoxinas, tricotecenos, fumonisinas, zearalenonas, ocratoxina A y alcaloides del cornezuelo de centeno (Souza *et al.*, 2017). Además de estas, existen otros tipos de micotoxinas presentes en productos básicos de consumo como son el ácido ciclopiazónico, esterigmatocistina, gliotoxina, citrinina, patulina y micotoxinas misceláneas como fusarina, ácido fusárico, ácido penicílico, ácido micofenólico, roquefortina, toxina de *Penicillium roqueforti* e isofumigaclavinas (Barac, 2019).

2.2.2 Principales hongos productores de micotoxinas

Las micotoxinas son producidas por una amplia gama de especies de hongos que no suelen mostrarse como patógenos agresivos, aunque dichos metabolitos secundarios se muestren como un factor de riesgo para otros seres vivos. Dentro del grupo de micotoxinas que se consideran importantes se encuentran aquellas que son producidas por tres géneros principales de hongos: *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* (Souza *et al.*, 2017). Aunque las micotoxinas más importantes son producidas por estos géneros existen otros géneros de hongos productores de micotoxinas como *Claviceps* y *Stachybotrys* (Barac, 2019).

Para lo que contempla al género *Aspergillus*, la principal clase de micotoxinas que producen se denominan como aflatoxinas y estas suelen afectar cultivos como maíz, algodón, cacahuate y algunos frutos secos (Duarte-Vogel & Villamil-Jiménez, 2006). Las altas temperaturas del clima suelen favorecer el crecimiento de estas especies y el desarrollo de dichos metabolitos secundarios en los cultivos ya mencionados (Barac, 2019).

Para el género *Fusarium*, existen una amplia variedad de especies productoras de micotoxinas. Los principales agentes causales son *Fusarium graminearum*, *F. verticilloides*, *F. proliferatum* y *F. subglutinans* (Souza *et al.*, 2017). La capacidad de estas especies yace en la producción de fumonisinas durante el estado patogénico de cultivos como el maíz. Esto último se ve implicado con la especie

Fusarium graminearum, patógeno presente durante el cultivo de trigo, cebada, maíz y avena (Barac, 2019).

Las especies *Penicillium* y sus posibles riesgos, suelen asociarse en mayor cantidad al almacenamiento de cultivos y la producción de micotoxinas como la ocratoxina A (OTA), misma que suele formarse durante el almacenamiento o secado de productos de cultivo como trigo o maíz (Barac, 2019).

Dentro de las especies restantes de hongos productores de micotoxinas y metabolitos secundarios de riesgo para otros seres vivos, se encuentran especies del grupo *Claviceps spp.*, *Epichloe* y *Neotyphodum*, especies capaces de producir alcaloides tóxicos y que suelen desarrollarse en especies vegetales como centeno y festuca (Barac, 2019).

De igual forma, se encuentra el género *Stachybotrys*, saprófito celulolítico que se puede encontrar en una amplia variedad de productos, y aquellos metabolitos tricotecenos que este organismo es capaz de producir, puede provocar enfermedades similares a algunas de las producidas por *Fusarium spp.* Este organismo ha estado involucrado en enfermedades humanas donde los materiales de construcción en obras públicas estuvieron contaminados con el organismo y posiblemente con sus metabolitos tóxicos (Barac, 2019).

2.2.3 Principales micotoxinas

2.2.3.1 Características generales

Las principales micotoxinas provienen de géneros de hongos como *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. Dentro de las principales micotoxinas se encuentran las aflatoxinas, mismas que son producidas por las especies del género *Aspergillus*. Las aflatoxinas de mayor relevancia son: la aflatoxina B₁ (AFB₁), B₂ (AFB₂), G₁ (AFG₁) y G₂ (AFG₂). Las aflatoxinas se consideran como hepatotóxicas, cancerígenas, inmunosupresoras y contaminantes anti nutricionales de muchos productos alimenticios. Otro metabolito hepático de relevancia para estos efectos es la aflatoxina M₁ (AFM₁), misma que puede tener efectos de hepatotoxicidad y hepatocarcinogenicidad (Barac, 2019).

La peligrosidad de las aflatoxinas suele clasificarse según el daño que puede provocar en los seres humanos y clasifica como se describe en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de aflatoxinas según su peligro específico.

Grupo	Micotoxina
1	Aflatoxina B ₁ , B ₂ , G ₁ , G ₂ .
2B	Aflatoxina M ₁ y M ₂ , ocratoxina A, esterigmatocistina.
3	Citrinina, patulina, luteosquirina.

(IARC, 2012)

Dicha clasificación se presenta según el riesgo que representa en seres humanos, siendo carcinogénicas (Grupo 1), probablemente carcinogénicas (Grupo 2A), posiblemente carcinogénicas (Grupo 2B), no clasificable por carcinogenicidad (Grupo 3) y probablemente no carcinogénicas (Grupo 4) como se indica en la clasificación de compuestos carcinógenos para el ser humano. En la actualidad no hay aflatoxinas dentro de las clasificaciones del grupo 2A y 4 (IARC, 2012).

Los tricotecenos son otro grupo de micotoxinas con casi 150 compuestos estructuralmente relacionados, producidos por diversos géneros de hongos como *Fusarium*, *Cephalosporium*, *Myrothecium*, *Stachybotrys*, *Trichoderma*, entre otros (Garzón-González *et al.*, 2021). El tricoteceno más común es el deoxinivalenol o mejor conocido como DON o vomitoxina, mismo que suele ser un contaminante en maíz y trigo, problema que se presenta en mayor proporción en Europa (Barac, 2019).

Las fumonisinas son micotoxinas producidas por la especie *Fusarium verticilloides* y se han mostrado como contaminantes en maíz en países como China y Sudáfrica, causando altas incidencias de cáncer de esófago en habitantes de dichas regiones. Esto se debe a que esta micotoxina se considera como un habitante casi universal del maíz (Barac, 2019).

Las ocratoxinas son un grupo de metabolitos estructuralmente similares que suelen ser producidos por *Aspergillus ochraceus* y *Penicillium verrucosum* (Souza *et al.*, 2017). La principal micotoxina para este grupo es la ocratoxina A (OTA), misma que se considera como un factor etiológico para padecimientos endémicos de algunas regiones como es la nefropatía de los Balcanes (Barac, 2019).

Los alcaloides de cornezuelo de centeno son producidos por especies como *Claviceps*, mismas que suelen infectar granos de cereales o productos de estos. Estas micotoxinas se ven involucradas en síndromes nerviosos o gangrenosos en seres humanos, como es el ergotismo, una de las micotoxicosis más antiguas conocidas (Barac, 2019).

Existen grupos menores de micotoxinas que tienen comportamientos en común y representan riesgos menores que los grupos anteriores de micotoxinas. Dentro de estas micotoxinas se puede encontrar el ácido ciclopiazonico, esterigmatocistina, citrinina, patulina, citreoviridina y fusaproliferina (Barac, 2019).

2.2.3.2 Micotoxicosis

La micotoxicosis es el padecimiento resultante de la exposición de un ser humano a una micotoxina y puede presentarse como aguda o crónica y las consecuencias de esta van desde posible desarrollo de cáncer, formación de tumores y en los peores casos, la muerte (Canelo & Tipian, 2018).

Cuando un ser humano padece de una micotoxicosis, se pueden presentar otras enfermedades de manera “oculta” que debiliten el sistema inmunitario más de lo que debería, volviendo a un paciente más susceptible a enfermedades infecciosas. La exposición del ser humano a las micotoxinas suele darse a través de diversas vías, como es el consumo de alimentos contaminados o provenientes de materias primas contaminadas con dichas toxinas, por contacto directo o por inhalación (Barac, 2019).

Dentro de las micotoxinas más sobresalientes en padecimientos dañinos para el ser humano se encuentran las aflatoxinas, causantes de la aflatoxicosis aguda, mismas que funcionan como cofactor potencial de otros padecimientos como el carcinoma hepático. Las ocratoxinas, especialmente la ocratoxina A, se asocian a padecimientos como la nefropatía endémica de los Balcanes (BEN), misma que provoca alta incidencia en problemas renales crónicos y tumores en sistemas de órganos excretores. Por otro lado, los tricotecenos como el DON, producidos por especies de *Fusarium*, se asocian estrechamente con enfermedades como la aleukia toxica alimentaria y nefropatía, así como aquellas micotoxinas producidas por *Stachybotrys chartarum*, que suelen ser causantes de enfermedades como la

estaquibotriotoxicosis, enfermedad causante de alteraciones en mucosas nasal y bucal, así como en el sistema digestivo en seres humanos. Por último, las fumonisinas, producidas por especies fúngicas *Fusarium*, son causantes de micotoxicosis asociadas a cáncer de esófago (Barac, 2019).

Las micotoxinas han sido de amplia relevancia en los campos de investigación en los últimos años debido a que representan un enorme riesgo para el ser humano, presentando enfermedades como las que se han descrito anteriormente con consecuencias sintomáticas hasta padecimientos agudos e incluso la muerte (Canelo & Tipian, 2018).

2.2.3.3 Problemas sociales y de salud asociados a las micotoxinas

Dentro de los síntomas asociados a las micotoxicosis más comunes se encuentran consecuencias desde padecimientos agudos, crónicos (destacando la carcinogenicidad), enfermedades gastrointestinales, mutagenicidad, síndromes alucinógenos y encefalopáticos (Liew & Sabran, 2018).

Las micotoxicosis graves involucran necrosis hemorrágica del hígado, proliferación en los conductos biliares, edemas y letargo. Estos síntomas son característicos de micotoxicosis provocada por aflatoxinas, misma que llega a provocar la muerte en niños y fuertes padecimientos en adultos. Los envenenamientos con aflatoxinas son provocados por su alta exposición durante el consumo de productos contaminados (Liew & Sabran, 2018).

Otros de los padecimientos involucrados con micotoxicosis son posibles efectos crónicos. Estos suelen aparecer por el consumo de cereales, que contienen niveles bajos de micotoxinas, generando la probabilidad de desarrollar deterioro en el crecimiento y desarrollo, disfunción inmunitaria y alteraciones en el metabolismo del ADN. Las micotoxicosis crónicas se presentan por micotoxinas producidas por hongos del género *Aspergillus* y *Fusarium* (Barac, 2019).

Las consecuencias en el deterioro del crecimiento y desarrollo suelen provocarse por aflatoxinas, esto se presenta como retraso en el crecimiento e insuficiencia ponderal. Dichas condiciones propician desnutrición significativa por la posible exposición a aflatoxinas desde el nacimiento hasta en edades avanzadas (Xu *et al.*, 2018).

Otro de los padecimientos provocados por las micotoxinas es la inmunosupresión, una consecuencia de la exposición a micotoxinas que provoca un impacto económico y de salud para el ser humano ya que, la inmunosupresión provoca el debilitamiento del sistema inmunitario y de su capacidad para combatir infecciones y otras enfermedades. Las micotoxinas que se sabe que tienen este efecto son las aflatoxinas, ciertos tricotecenos, la OTA y la gliotoxina. Estas micotoxinas pueden ser inmunotóxicas y ejercer efectos sobre las células, factores humorales y mediadores de citoquinas del sistema inmunitario y pueden causar una variedad de cambios relacionados con el sistema inmunitario, incluida la aplasia tímica y la inhibición de la fagocitosis por macrófagos, hipersensibilidad cutánea retardada, proliferación de linfocitos y migración de leucocitos (Barac, 2019).

En cuanto a factores como carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad, las micotoxinas encargadas de provocarlos pueden presentarse según el nivel de riesgo a padecer cáncer, como se mostró en el Cuadro 1. Estas micotoxinas entran en contacto con el ser humano a través de la exposición directa o mediante el consumo de algún alimento en el que se ha desarrollado un hongo productor de las mismas. Algunas micotoxinas con potencial carcinogénico, mutagénico y/o teratogénico pueden ser las aflatoxinas, fumonisinas, ocratoxinas y zearalenonas, pudiendo afectar a seres humanos de todas las edades (Xu *et al.*, 2018).

2.2.3.4 Regulación de las micotoxinas a nivel nacional y mundial

Las micotoxinas representan un riesgo frecuente y constante en la población mundial, sus efectos suelen ser peligrosos para la misma tras la ingesta accidental por alimentos contaminados con efectos a largo plazo que han preocupado a organismos internacionales por mucho tiempo (OMS, 2023).

Organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han emitido protocolos para minimizar los riesgos presentes ante las micotoxinas, teniendo en cuenta que, de cierta manera, el crecimiento de las micotoxinas no puede controlarse o es difícil de hacerlo al obtener materias primas provenientes de cultivos o alguna otra fuente contaminada. Para minimizar el riesgo que representan las micotoxinas a la salud se ha recomendado inspeccionar materias primas como cereales que presentan contaminación frecuente de aflatoxinas para

separar las porciones infectadas de aquellas que serán útiles para producir alimentos o algún otro producto de la industria de la transformación. Otras medidas para esto es evitar el daño (impacto mecánico para deterioros físicos) en las materias primas antes de procesarse, así como diversificar los productos en la dieta a nivel mundial, reduciendo la posibilidad de padecer alguna micotoxicosis o padecimiento proveniente del consumo de micotoxinas (OMS, 2023).

La OMS en colaboración con organismos como la CCA, FAO y JECFA, se encarga de evaluar riesgos presentes para el ser humano en cuanto a la contaminación de alimentos por micotoxinas, presentando medidas de protección adecuada. Esto se hace estableciendo normas que permitan regular el contenido de aflatoxinas para gestionar el riesgo representado para garantizar la confianza al consumo en cualquier producto a nivel mundial sin importar el lugar de producción.

Los comités mixtos de los organismos ya mencionados se encargan de realizar una serie de pruebas científicas exhaustivas para determinar el modo y las dosis de ingesta máxima permitida o exposición a micotoxinas. Las ingestas máximas permitidas se han establecido para las micotoxinas que han representado mayor riesgo para los seres humanos, como son las aflatoxinas, mismas que han sido limitadas a un consumo máximo de 0.5 a 1.5 ng/g presentes en frutos secos, granos y lácteos. Otro de los niveles establecidos es el de la patulina, misma a la que se le permite para consumo humano, ejemplificando el zumo de manzana en dosis de hasta 20 ng/g. Siendo así, los organismos internacionales orientan a las naciones a mantener las dosis de micotoxinas en productos alimentarios lo más bajo posible para la protección de los seres humanos en materia de la seguridad alimentaria (OMS, 2023).

En cuanto a la regulación de micotoxinas en México, se entienden riesgos mayores debido a que una gran porción de la dieta de los pobladores viene de productos elaborados con cereales como maíz, arroz y trigo, así como otras semillas como nueces y cacahuates. Estos productos pueden contaminarse tras su cosecha, almacenamiento o procesamiento, según su contenido de agua, temperatura, luz y daño mecánico (Gobierno de México, 2023).

El gobierno de México otorga recomendaciones, así como límites máximos permitidos de micotoxinas en alimentos. Se recomienda el consumo de productos frescos debidamente empaquetados o procesados bajo tratamientos favorables para la eliminación de micotoxinas. En cuanto al control del contenido de micotoxinas, se recomienda hacerlo en cereales, materias primas alimenticias, productos de origen vegetal, lácteos y semillas oleaginosas. Alimentos destinados al consumo infantil y dietético deben tener ausencia total de micotoxinas (Gobierno de México, 2023).

Para las diversas micotoxinas existentes se permiten dosis desde la ausencia total hasta un contenido máximo de 20 ng/g de aflatoxinas en alimentos disponibles para la población. Esto, en función de los grupos de productos alimenticios ya mencionados (Gobierno de México, 2023).

2.2.4 Las aflatoxinas

2.2.4.1 Hongos productores

Los hongos productores de aflatoxinas, pertenecientes al género *Aspergillus*, se encuentran diversificados a nivel mundial y suelen ser resistentes a diversos climas y ambientes sin presentar complicaciones. Estos hongos suelen ser endémicos de algunas regiones y se comportan como parte de la microbiota convencional del aire y suelo (Carranza-Mesén *et al.*, 2022).

La producción de aflatoxinas suele darse antes de que una materia prima se coseche o después de ello, siendo los productos objetivo algunos cereales como maíz, arroz, trigo y algunas semillas oleaginosas como cacahuate y nuez. Esto representa un riesgo considerable ya que, las aflatoxinas tienen como principal consecuencia la acción cancerígena sobre el huésped que atacan (Barac, 2019).

Las aflatoxinas son micotoxinas producidas por cepas toxigénicas de los hongos *Aspergillus flavus* (Figura 3) y *Aspergillus parasiticus* (Figura 4). Estas sustancias son altamente cancerígenas, producen toxicidad y cáncer de hígado. Se han detectado en diferentes cultivos en el campo, cosecha, transporte y almacenamiento en el hogar. Las aflatoxinas suelen designarse con letras, que se refieren a una característica física o de otro tipo del compuesto, por ejemplo, las B₁ y B₂ presentan fluorescencia azul y las G₁ y G₂, fluorescencia verde cuando

se exponen a radiación ultravioleta de onda larga. Las cepas toxigénicas de *Aspergillus flavus* generalmente producen solo aflatoxina B₁ y B₂, mientras que las cepas toxigénicas de *Aspergillus parasiticus*, producen aflatoxinas B₁, B₂, G₁ y G₂ (Bogantes-Ledesma *et al.*, 2004).



Figura 3. *Aspergillus flavus* (tomado de CDC, 2023).



Figura 4. *Aspergillus parasiticus* (tomado de USDA, 2023).

2.2.4.2 Biosíntesis de aflatoxinas

La biosíntesis de aflatoxinas a partir de *Aspergillus flavus* es un proceso complejo que implica la producción de estas micotoxinas por parte de este hongo. La producción de aflatoxinas por *Aspergillus flavus* está influenciada por factores como la disponibilidad de nutrientes, la presencia de elementos traza y las condiciones ambientales (Kostić *et al.*, 2019).

Inicialmente, el crecimiento del hongo y el metabolismo primario forman poca o ninguna aflatoxina. Con el tiempo, el fosfato, el nitrógeno y algunos elementos traza son limitados y el crecimiento primario se reduce (Kostić *et al.*, 2019). Se acumulan varios metabolitos primarios, entre ellos, piruvato, malato, acetato y aminoácidos que provocan el desarrollo y estimulan e inducen la actividad de las enzimas del metabolismo secundario, por la ruta de la biosíntesis de los policétidos, que a su vez provoca la biosíntesis de las aflatoxinas sobre la biosíntesis de los ácidos grasos en las cepas toxigénicas de *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus* (Kostić *et al.*, 2019).

La producción de aflatoxinas por *Aspergillus flavus* es un proceso complejo que implica la activación de diferentes vías metabólicas y la expresión de enzimas específicas, como la histona acetiltransferasa (AflGcnE), que influye en la morfogénesis y la biosíntesis de aflatoxinas en el hongo (Lan *et al.*, 2016).

Varios estudios han determinado que las aflatoxinas se sintetizan en dos etapas a partir del malonil-CoA, primero con la formación de hexanoil-CoA, seguida de la formación de una antraquinona decacéetida. Una serie de reacciones de oxidación-reducción altamente organizadas permite la formación de aflatoxinas. El esquema actualmente aceptado para la biosíntesis de aflatoxinas es: precursor de hexanoil CoA → ácido norsolorínico, NOR → averantina, AVN → hidroxiaverantina, HAVN → averufina, AVF → hidroxiversicolorona, HVN → acetato de hemiacetal versiconal, VHA → versiconal, VAL → versicolorina B, VERB → versicolorina A, VERA → demetil-esterigmatocistina, DMST → esterigmatocistina, ST → Ometilesterigmatocistina, OMST → aflatoxina B₁ (AFB₁) y aflatoxina G₁ (AFG₁) (Figura 5) (Yu *et al.*, 2004).

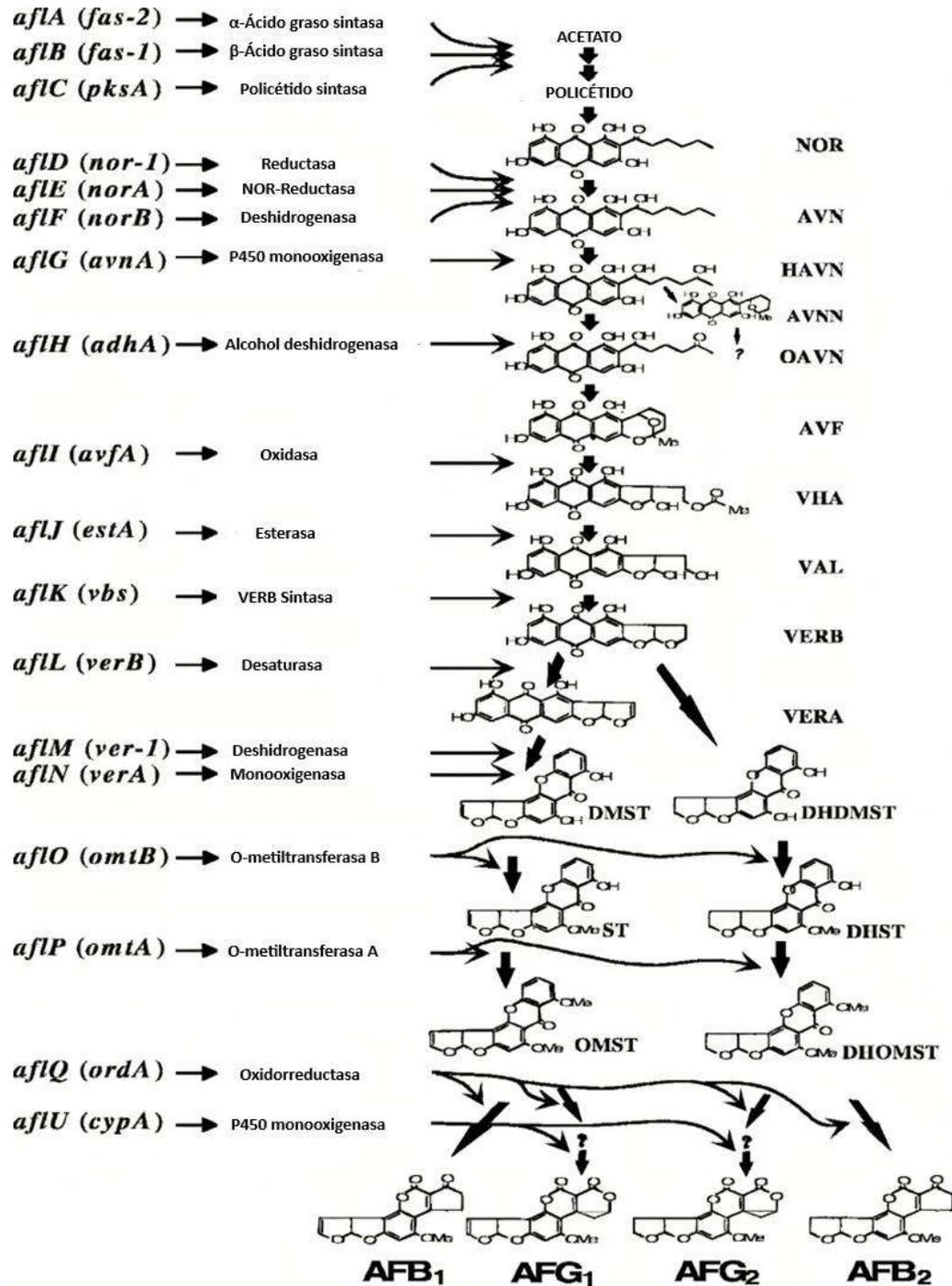


Figura 5. Biosíntesis de aflatoxinas (tomado de Yu *et al.*, 2004).

Se ha establecido un punto de ramificación en la vía, después de la producción de VHA, que conduce a diferentes formas estructurales de aflatoxinas B₂ y G₂ (AFB₂ y AFG₂ respectivamente). Varias redes metabólicas pueden proporcionar vías alternativas a las aflatoxinas, así como existen actividades enzimáticas específicas asociadas con conversiones de precursores en la ruta de las

aflatoxinas, principalmente por parte de metiltransferasas, reductasas, ciclasas y desaturasas, que participan principalmente en la conversión de versicolorinas en extractos fúngicos libres de células durante la producción de aflatoxinas (Yu *et al.*, 2004).

2.2.4.3 Características generales

Las aflatoxinas son micotoxinas de especial estudio desde su descubrimiento. Toxicológicamente se consideran toxinas potentes, relacionadas con la génesis del cáncer, mutaciones puntuales y múltiples alteraciones en el desarrollo fetal. Experimentos realizados en animales han demostrado que las aflatoxinas pueden producir toxicidad aguda y crónica. Los efectos agudos incluyen necrosis hepática, nefritis, y congestión pulmonar. Los efectos crónicos incluyen daño celular, carcinogenicidad, teratogenicidad y mutagenicidad en modelos animales (Bogantes-Ledesma *et al.*, 2004).

Estas toxinas tienen estructuras moleculares muy similares y forman un grupo único de compuestos heterocíclicos y altamente oxigenados de origen natural. Se producen cuatro AF principales: aflatoxina B₁ (AFB₁), aflatoxina B₂ (AFB₂), aflatoxina G₁ (AFG₁) y aflatoxina G₂ (AFG₂), tal como se pueden observar en la figura 6 (Bogantes-Ledesma *et al.*, 2004).

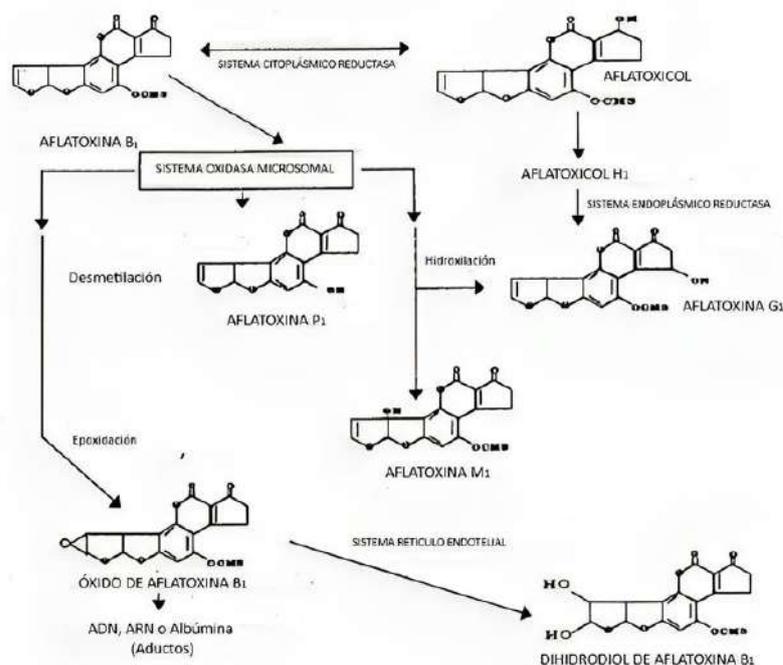


Figura 6. Biotransformación de la AFB₁ (tomado de Villar *et al.*, 2014).

2.2.4.4 Aflatoxicosis

La enfermedad provocada por el consumo de sustancias o alimentos contaminados con aflatoxinas se denomina aflatoxicosis. Se han identificado dos vías de exposición dietética; por medio Ingestión directa de aflatoxinas (principalmente AFB₁) en alimentos contaminados de origen vegetal como nueces de maíz y sus productos y por medio de ingesta de aflatoxinas transferidas del alimento a la leche y los productos lácteos, incluidos el queso y la leche en polvo, donde aparecen principalmente como aflatoxina M₁ (Figura 7) (Dhanasekaran *et al.*, 2011).

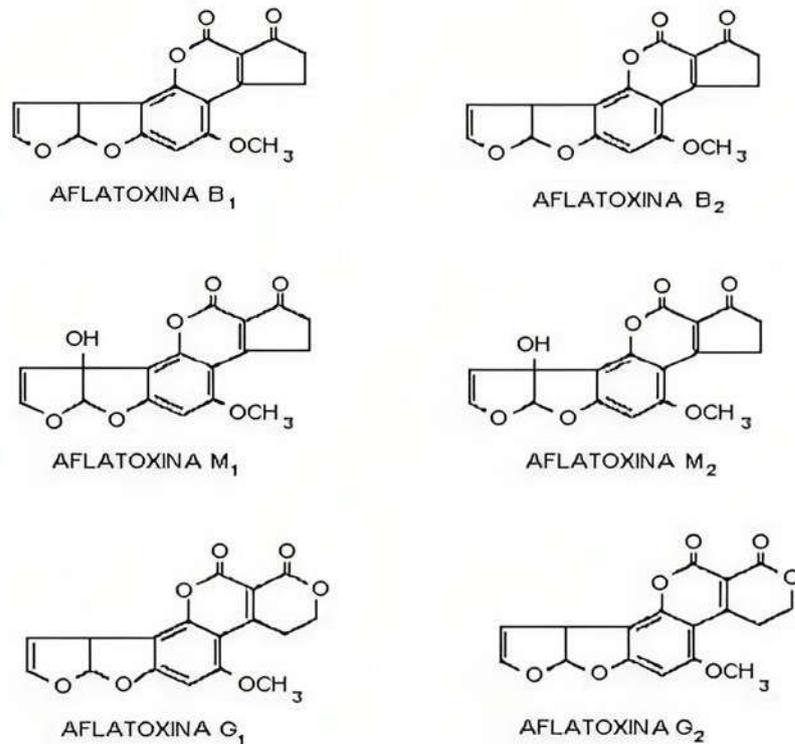


Figura 7. Estructura de las principales aflatoxinas (tomado de Dhanasekaran *et al.*, 2011).

La expresión de enfermedades relacionadas con las aflatoxinas en los seres humanos puede verse influida por factores como la edad, el sexo, el estado nutricional y la exposición simultánea a otros agentes causantes, como la hepatitis viral (VHB) o la infestación por parásitos (Dhanasekaran *et al.*, 2011).

La aflatoxicosis involucra efectos sobre la salud humana como toxicidad aguda y crónica. Los efectos dentro de la toxicidad aguda involucran fiebre alta, orina de

color intenso, vómitos y edema de los pies, ictericia, ascitis de rápido desarrollo, hipertensión portal y una alta tasa de mortalidad (Dhanasekaran *et al.*, 2011).

En cuanto a los efectos por toxicidad crónica involucra el desarrollo de carcinomas de células hepáticas, mutaciones genómicas y cirrosis infantil (Dhanasekaran *et al.*, 2011).

La patogenia involucrada en la exposición a aflatoxinas suele iniciar con la absorción de las mismas por el tracto gastrointestinal, son metabólicamente activadas o detoxificadas en las células de la mucosa intestinal y en el hígado, donde sufren una biotransformación por medio de procesos de epoxidación, hidroxilación, o desmetilación, conjugación y procesos espontáneos. Ejemplificando la aflatoxina AFB₁ (Figura 8), esta se metaboliza a través del citocromo p450 hepático mediante los complejos enzimáticos microsomales 3A3, 1A2, 3A7 y extrahepáticos 3A4. Según Dhanasekaran *et al.* (2011) a uno de los productos más relevantes en la reacción, el AFB₁ 8-9 epóxido, tiene algunos efectos biológicos en los seres vivos:

- Se liga al ADN, interfiriendo con la capacidad de la ADN-polimerasa, hecho que favorece la aparición de mutaciones por replicación incompleta.
- Interfiere con la actividad de la ARN polimerasa dependiente del ADN (por su gran capacidad de ligarse al ADN), produciendo como consecuencia, la disminución en el ARN mensajero y la síntesis proteica.
- Tiene la capacidad de ligarse a proteínas estructurales y funcionales, alterando su estabilidad. Este efecto es, en gran parte, el responsable de la toxicidad aguda.
- Es metabolizado por la glutatión-5-transferasa, que inactiva el compuesto.

2.2.4.5 Regulación nacional e internacional

La regulación del contenido de aflatoxinas a nivel nacional e internacional es un control estricto que involucra una serie de recomendaciones y establecimiento de dosis máximas permitidas para garantizar la seguridad alimentaria en la población.

Según la OMS, en conjunto con organismos internacionales como la CCA (Comisión del Codex Alimentarius), FAO (Organización de las Naciones Unidas

para la Agricultura y la Alimentación) y JECFA (Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios), consideran una concentración máxima de aflatoxinas en alimentos como cereales, semillas, sus derivados y procesados, de 0.5 hasta 25 ng/g de alimento (OMS, 2023).

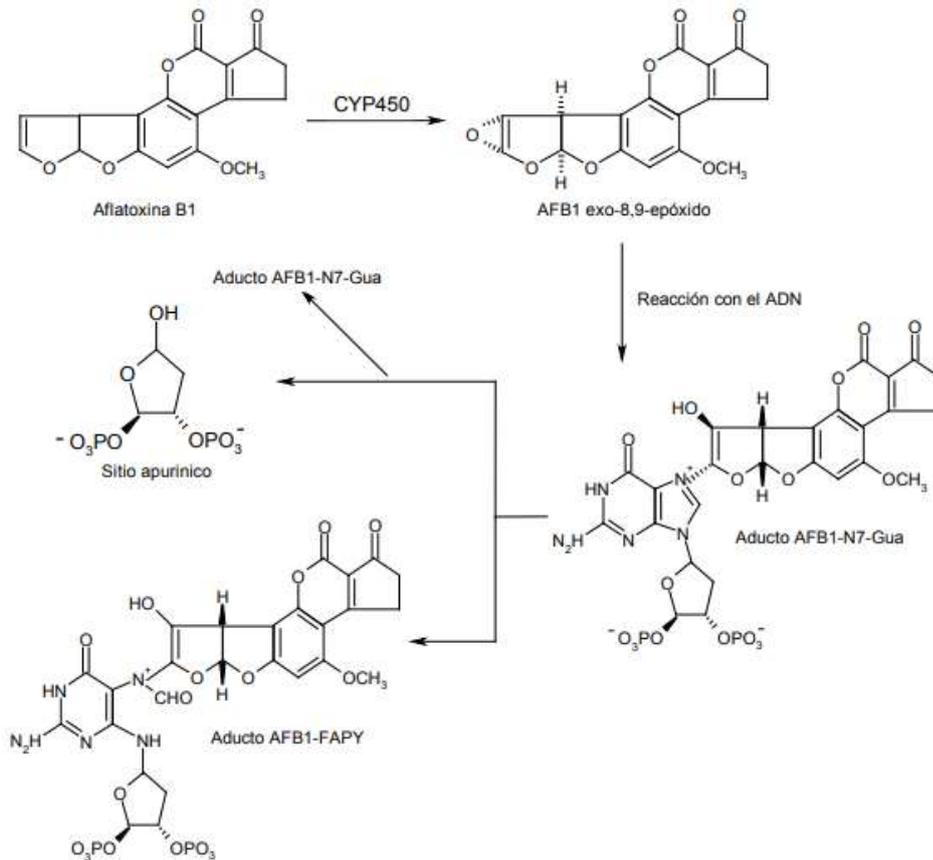


Figura 8. Activación y reacción de la AFB1 con el ADN humano (tomado de Uribe-Yunda & Navas, 2011).

Por otro lado, la regulación en México para los límites de concentración máxima permitida de aflatoxinas en alimentos, se describen en el Cuadro 2.

Para la presente investigación, tratándose de maíz y subproductos del mismo, la NOM-187-SSA1-2002 indica que los límites máximos permitidos son de hasta 20 ng/g de aflatoxinas totales en alimentos provenientes de maíz destinados para el consumo humano. A su vez, indica un límite máximo de hasta 12 ng/g en masa, tortillas, harinas y tostadas elaboradas con maíz nixtamalizado.

Cuadro 2. Límites de concentración máxima permitida de aflatoxinas en alimentos en México.

Tipo de Alimento	Concentración Máxima Aceptable de Aflatoxinas (ng/g)
Lácteos	1 (AFM ₁)
Granos y cereales	20
Harinas de cereales	5
Pastas y sémolas	20
Panadería	20
Productos de cacao	5
Conservas (legumbres y frutas)	50
Mermeladas y jaleas	50
Espicias en polvo	50
Café (en grano o molido)	5
Bebidas de frutas	5
Aceites vegetales	5
Productos para bebé y dietéticos	No admisible
Productos listos para consumir	No admisible
Pastas y sémolas	20
Panadería	20
Confitería	20

(Gobierno de México, 2023)

2.2.4.6 Control

2.2.4.6.1 Control de los hongos

El control de las micotoxinas tras su producción por los principales hongos reconocidos debe ser estricto. Esto se logra principalmente por el control de factores que afecten la formación de dichos metabolitos.

Por lo tanto, si los factores como el contenido de humedad se pueden reducir y mantener en niveles suficientemente bajos, no se producirá el crecimiento de moho ni la producción de micotoxinas. De igual manera, el control de la temperatura de almacenamiento también puede ser un medio para prevenir la

producción de ciertas micotoxinas. No es probable que las aflatoxinas y otras toxinas producidas por el género *Aspergillus* se produzcan a temperaturas por debajo de 5 °C a 8 °C (Motbaynor *et al.*, 2021).

La mayoría de los alimentos son sustratos adecuados para la producción de micotoxinas, aunque algunos, como el queso, las carnes curadas y la soja, pueden ser menos favorables para la producción de micotoxinas. En sí mismo, el sustrato no ofrece un medio para controlar adecuadamente las micotoxinas; sin embargo, si se usa en combinación con humedad y temperatura, se puede lograr el control (Bullerman *et al.*, 1984).

Además de manipular las condiciones ambientales para controlar la formación de micotoxinas, se pueden aplicar otros medios para prevenir el crecimiento de moho y la formación de micotoxinas. Algunos de estos métodos incluyen la competencia microbiana, las atmósferas controladas y el uso de agentes antimicóticos (Motbaynor *et al.*, 2021).

2.2.4.6.1.1 Manejo en campo

En las cadenas de producción involucradas en la avicultura, se han propuesto estrategias para contrarrestar los efectos de las micotoxinas. Dentro de estas estrategias en campo, se propone el uso de inhibidores de hongos, incremento en niveles proteicos, uso de vitaminas y selección genética, así como uso de tratamientos físicos, químicos y biológicos en las materias primas (Requena *et al.*, 2005).

El control de aflatoxinas en campo ha tomado fuerza en los últimos años con el uso de sustancias descontaminantes naturales o sintéticas que han sido denominadas como secuestrantes. Estos son capaces de inhibir metabolitos como las aflatoxinas, contrarrestando la toxicidad de los mismos. Entre ellos suelen ser utilizadas algunas arcillas, bentonitas, carbón activado y zeolitas (Requena *et al.*, 2005).

Además de ello, se requiere la creación y uso de programas integrados que favorezcan la prevención y el control de aflatoxinas en materias primas y futuros productos procesados. Estos programas consisten en el refuerzo de medidas apropiadas de manejo y seguridad durante el cultivo de alimentos, así como el

uso de agentes secuestrantes y otros métodos de control de aflatoxinas que favorezcan la seguridad junto con buenas prácticas de cosecha, almacenamiento y procesamiento (Requena *et al.*, 2005).

Existen programas integrados como los sistemas de análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC), mismos que identifican, evalúan y controlan los peligros que favorezcan la seguridad alimentaria. Estos sistemas involucran medidas durante todo el proceso de cultivo de cereales, leguminosas, vegetales, etc, desde ambientes pre cosecha; donde se recomienda el uso de variedades resistentes a cultivo, refuerzo de control de plagas y buenas prácticas de labranza; ambientes de cosecha, donde se recomienda el monitoreo de tiempos adecuados de cosecha, control de temperatura y remoción de materiales extraños. De igual manera se incluyen los ambientes pos-cosecha, en los que se recomienda la protección de los productos mediante un eficiente almacenamiento así como monitoreo de procesamiento y buenas prácticas de manufactura y por último los ambientes de procesamiento, mismos en los que se obtienen los productos finales y para garantizar su seguridad, se recomienda la evaluación de formulaciones, monitoreo de operaciones y evaluaciones finales de posibles riesgos en productos finales (Hedman *et al.*, 2020).

2.2.4.6.1.2 Agentes antimicóticos

Los agentes antimicóticos son sustancias químicas que interfieren o previenen el crecimiento de moho, estos químicos pueden existir naturalmente en ciertos alimentos, como algunos ácidos orgánicos y aceites esenciales, o pueden agregarse a los alimentos durante el procesamiento (Motbaynor *et al.*, 2021). Varios productos químicos que tienen propiedades antimicóticas están aprobados para su uso en alimentos. Varias de estas sustancias son ácidos orgánicos o sus sales, e incluyen: ácido sórbico y sorbato; ácido propiónico y propionato; ácido benzoico, benzoatos y parabenos; y ácido acético y sus derivados (Motbaynor *et al.*, 2021).

Además, los antioxidantes fenólicos, particularmente BHA (butilhidroxianisol), tienen propiedades antimicóticas. Ciertas hierbas y especias contienen sustancias antifúngicas naturales que pueden ejercer un efecto conservante en ciertos casos (Bullerman *et al.*, 1984). Según Bullerman *et al.*, (1984), algunos

agentes antimicóticos para evitar el desarrollo de aflatoxinas se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Agentes antimicóticos para inhibición del desarrollo de aflatoxinas.

Antimicótico	Descripción	Mecanismo de acción
Ácido Sórbico	<p>El ácido sórbico es un ácido monocarboxílico insaturado de seis carbonos (ácido-2,4-hexadienoico).</p> <p>El compuesto se encuentra naturalmente en las bayas de la ceniza de montaña y se puede sintetizar químicamente. Posee una baja solubilidad en agua y es efectivo en rangos de pH 5 a 6.</p>	<p>El grado de inhibición presentado depende de la concentración en la que se use este componente. Se ha demostrado que inhibe el crecimiento de <i>A. flavus</i> en un 2 % y la formación de aflatoxinas entre un 6 y 10 % cuando se mantiene en concentraciones de 50-100 ppm a pH 5.</p>
Ácido benzoico	<p>El ácido benzoico es útil a niveles de pH ácidos (que no rebasen pH 5) y están permitidos en alimentos en concentraciones de hasta 0.1 % del volumen de la formulación total.</p>	<p>El grado de inhibición para este agente antimicótico es de hasta 23.6 % de inhibición de desarrollo de aflatoxinas (especialmente AFB₁, AFB₂, AFG₁ y AFB₂) en concentraciones de 0.2 % a 0.8 % mientras el medio en el que se aplique tenga un pH no mayor a 5.</p>

Cuadro 3. Continuación.

Antimicótico	Descripción	Mecanismo de acción
Ácido acético	El ácido acético es efectivo contra mohos, El efecto inhibitorio del ácido acético sobre los microorganismos es dependiente del pH. El ácido no disociado puede penetrar en las células de microorganismos y ejercer un efecto tóxico	El ácido acético es un antimicótico eficiente a pH 5. Este ácido y sus derivados logran un efecto inhibitorio de hasta 40 % a pH 4.7. El poder inhibitorio en especies como <i>A. flavus</i> es de ausencia total en concentraciones de hasta 0.05 %.
Antioxidantes fenólicos	Se ha demostrado que los antioxidantes fenólicos poseen actividad antimicrobiana y, en particular, antifúngica.	Los antioxidantes fenólicos han demostrado grados de inhibición de ausencia total en especies como <i>A. parasiticus</i> en concentraciones de 250-1000 ppm.

(Bullerman *et al.*, 1984)

2.2.4.6.1.3 Ingeniería genética

La relevancia de las aflatoxinas como un riesgo potencial para el ser humano ha conducido a la búsqueda de estrategias para contrarrestar dichos efectos. Aunque hay métodos de manejo en campo y programas eficientes consistentes del control estricto de condiciones para materias primas en peligro, existen métodos dentro del campo de la ingeniería genética y biología molecular que permiten la no

producción o absorción de aflatoxinas por medio de mecanismos moleculares y bioquímicos.

La biosíntesis de aflatoxinas no siempre ocurre durante el crecimiento fúngico y la infección de las materias primas, que usualmente son cereales o semillas. Incluso algunas cepas no aflatoxigénicas de *Aspergillus flavus*, así como las cepas aflatoxigénicas de la misma especie bajo ciertas condiciones ambientales y dependiendo del sustrato, pueden infectar y colonizar los cultivos sin llegar a producir la micotoxina (Kostić *et al.*, 2019). El hecho de que cepas altamente aflatoxigénicas presenten una importante disminución de su capacidad productora de la toxina a causa de la presencia de algunos metabolitos de plantas, indica que la maquinaria biosintética de la aflatoxina es sensible a factores genéticos, bioquímicos y/o ambientales (Kostić *et al.*, 2019).

Todo esto sugiere el empleo de diferentes estrategias para interrumpir o alterar el proceso biosintético de la aflatoxina. En ello, surge la necesidad de una adecuada comprensión de las bases moleculares de la biosíntesis de la aflatoxina, con los compuestos intermedios, enzimas y genes que gobiernan este proceso complejo. Muchos de los factores bioquímicos que controlan la formación de aflatoxina por el hongo *A. parasiticus* han sido determinados, identificándose muchos de los intermediarios químicos en la ruta biosintética de la toxina (Sanchis, 1993).

Por lo tanto, estos compuestos pueden ser utilizados como sustratos para conocer las enzimas críticas como una metiltransferasa, una reductasa, una esterasa y una oxidoreductasa que catalizan pasos claves en la ruta biosintética, habiéndose identificado, purificado y caracterizado. De igual manera, es posible la utilización de enzimas para desarrollar sondas que identifiquen genes responsables de la biosíntesis de las aflatoxinas para inhibir la producción de las mismas (Sanchis, 1993).

Otro método dentro de este campo son los agentes biocompetitivos, esto consiste en la utilización de microorganismos para la degradación de las micotoxinas en los alimentos (Zavala-Franco, 2015). Normalmente esta técnica es, en la mayoría de los casos, muy poco viable desde el punto de vista económico, dado que la acción microbiana va asociada a una pérdida de la calidad organoléptica del

alimento a causa de la aparición de colores, olores, limos y degradación de sus compuestos. Sin embargo, su empleo como medida preventiva de la infección y/o contaminación se muestra viable a futuro (Sanchis, 1993).

Ejemplificando el uso de cepas de *A. flavus* no productoras de aflatoxinas, estas pueden facilitar la exclusión de las cepas aflatoxigénicas del medio ambiente. Existen en la naturaleza cepas no productoras de esta toxina, y con una gran capacidad de invadir los tejidos de las plantas, por lo que esta capacidad no está relacionada con la productora de la toxina. Así estas cepas pueden competir con las aflatoxigénicas bajo las mismas condiciones agronómicas y ecológicas (Sanchis, 1993).

El uso de cepas no aflatoxigénicas de esta especie como agentes biocompetitivos ha sido propuesto como medida de control de la aflatoxina en materias primas como semillas y cereales, para lo cual se destaca la capacidad de producir pectinasas (Zavala-Franco, 2015). Una vez conocidas esta y otras propiedades, y los genes que están asociados a éstas, es posible manipular el genoma fúngico y aumentar la agresividad de los hongos y producir agentes biocompetitivos superiores. Esto favorece completamente el desarrollo de cepas no aflatoxigénicas de *A. flavus* que puedan ser usadas como agentes biocompetitivos. El clonado de genes de la ruta biosintética se muestra como una técnica viable para la eliminación precisa y estable de pasos en la producción de aflatoxinas con el fin de producir cepas fúngicas para su uso en aplicaciones de biocontrol (Sanchis, 1993).

2.2.4.6.2 Control de aflatoxinas

2.2.4.6.2.1 Métodos biológicos

Los métodos de control biológicos para el crecimiento de especies productoras de aflatoxinas pueden llevarse a cabo por medio del uso de otros organismos capaces de provocar cambios significativos en el desarrollo de micotoxinas o en su defecto, algún medio o sustancia que modifique las condiciones del entorno para evitar el desarrollo (Zavala-Franco, 2015).

Entre los métodos biológicos de control de aflatoxinas, se encuentra el uso de algunas especies como inhibidores de desarrollo de micotoxinas; como pueden

ser bacterias, levaduras, hongos y algas que tienen la capacidad de degradar aflatoxinas, lo cual depende de la especificidad que se presente ante estas y la eficiencia presentada (Zavala-Franco, 2015).

Entre los microorganismos que pueden cumplir dicha función se encuentran bacterias como *Rhodococcus erythropolis*, misma que puede presentar el mecanismo de degradación en la AFB₁ por medio de actividad enzimática extracelular. Otra bacteria con este propósito es *Myxococcus fulvus*, misma que puede transformar la AFB₁ en una especie derivada de menor toxicidad (Zavala-Franco, 2015).

Algunas otras especies como las levaduras, en donde destaca la *Saccharomyces cerevisiae*, que inmovilizadas son capaces de aislar aflatoxinas hasta en un 90 %. Bacterias probióticas como *Lactobacillus reuteri* y *Bifidobacterium bifidum* son capaces de evitar la absorción de la AFB₁ en el tracto gastrointestinal del ser humano (Zavala-Franco, 2015).

Otro método biológico existente es la competitividad microbiana, misma que, a diferencia de la degradación y consiste en someter al medio contaminado o con riesgo a ser contaminado, junto con otros microorganismos para restringir el crecimiento de hongos y desarrollo de micotoxinas. Un ejemplo de esto es cuando se produce un cultivo mixto de hongos, como puede ser *Aspergillus niger* en conjunto con un hongo productor de metabolitos secundarios peligrosos como es *Aspergillus flavus* (Zavala-Franco, 2015). Tras un cruce de cultivos como este, se ha demostrado que la producción de aflatoxinas por *Aspergillus flavus* llega a ser muy baja o en ocasiones nula (Bullerman *et al.*, 1984).

2.2.4.6.2.2 Métodos físicos

Dentro de los métodos físicos de control de aflatoxinas se pueden encontrar inicialmente métodos como aquellos que involucran el fenómeno de transferencia de calor, como la conducción, citada de Hwang & Lee (2006), quienes consiguieron reducir el contenido de aflatoxinas hasta en un 82 %, en arroz cocido y un 97 % en trigo cocido a 200 °C por 30 minutos. Esto, a pesar de la alta estabilidad de las aflatoxinas ante altas temperaturas (150 °C – 200 °C), lo cual

pudo presentarse como un problema para el producto tras la eliminación total de aflatoxinas (Zavala-Franco, 2015).

Algunos otros métodos involucran el uso de otros procedimientos de transferencia de calor como es la radiación, misma que logra provocar la degradación de aflatoxinas en diferentes cereales. De igual manera, se pueden utilizar agentes absorbentes como son las arcillas (como la bentonita) y algunos solventes que favorecen la absorción de aflatoxinas sin dañar la estructura y órganos del producto contaminado (Zavala-Franco, 2015).

El control de atmosferas es un método físico que involucra la respiración de las especies fúngicas, que, al requerir oxígeno para su desarrollo, esto puede ser un factor cambiante para inhibir el desarrollo de aflatoxinas por medio de la disminución de concentración de oxígeno y aumento de la concentración de otros gases como dióxido de carbono. Se han hecho estudios que involucran estos dos gases, como aquel propuesto por Sanders *et al.* (1968) en el que se descubrió que, a temperatura constante, altos niveles de dióxido de carbono (20 a 40 %) y humedad relativa de hasta 86 %, se previene la producción de aflatoxinas en cacahuates. Por otro lado, Landers *et al.* (1967) descubrieron que el dióxido de carbono al 20 % en una atmosfera controlada, inhibe la formación de aflatoxinas en cacahuates hasta en un 80 %. Ambos estudios remarcan la importancia de mantener el oxígeno a una concentración no mayor al 1 % y la posibilidad de llevar la concentración de dióxido de carbono hasta en un 90 % para inhibir la producción de metabolitos secundarios de riesgo (Bullerman *et al.*, 1984).

2.2.4.6.2.3 Métodos químicos

Los métodos químicos de control de aflatoxinas involucran la adición de sustancias y agentes inhibidores de producción de aflatoxinas. Entre estos métodos se consideran la adición de antimicóticos como pueden ser ácidos, bases, oxidantes o gases que favorezcan la degradación o inhiban por completo el desarrollo de aflatoxinas.

Algunos antimicóticos mencionados anteriormente (Cuadro 3) contempla el ácido sórbico, que puede inhibir completamente el desarrollo de aflatoxinas, aplicándose en concentraciones de 50 a 3000 ppm (Bullerman *et al.*, 1984). De

igual manera, el ácido propiónico puede ser utilizado para inhibir la producción de aflatoxinas en especies comunes productoras como es *Aspergillus flavus*. Este ácido puede ser utilizado para descontaminar alimentos con la aplicación directa en concentraciones desde 1000 hasta 8000 ppm. Un antimicótico más es el ácido acético, mismo que a pesar de no ser el mejor, suele mostrarse más eficiente y menos invasivo con el medio en que se aplica. Puede inhibir completamente la producción de aflatoxinas en concentraciones de hasta 500 ppm (Bullerman *et al.*, 1984).

2.2.4.6.2.4 Métodos combinados

La combinación de métodos involucra la necesidad primaria de degradar la estructura de las aflatoxinas presentes en cualquier alimento. Para ello, se requiere de una combinación de métodos que tiene por objetivo lograr resultados más eficientes que aquellos obtenidos de manera unitaria con los métodos ya descritos.

Un ejemplo de ello es una combinación de un método químico y un método físico, esto, con un modelo de extrusión con adición de hidróxido de calcio (0.5 % del peso total) y tratamiento térmico para eliminar aflatoxinas. Elias-Orozco *et al.* (2002), reportaron la eliminación aflatoxinas hasta en un 67 % en harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Otro ejemplo dentro de los métodos combinados es la nixtamalización, método que combina temperatura y pH (condiciones físicas y químicas) para la eliminación de aflatoxinas. El contenido de las mismas puede ser reducido hasta en un 96 %, específicamente de AFB1 en masa proveniente de harina de maíz, destinada a la producción de tortillas; como se reporta por Anguiano-Ruvalcaba *et al.* (2005).

2.3 La nixtamalización

2.3.1 La nixtamalización tradicional

El proceso de nixtamalización consiste en la cocción alcalina de granos de maíz para la obtención de productos alimenticios relacionados a base de maíz como las tortillas. Para este procedimiento, los granos de maíz se cuecen en medio alcalino (con la adición de cal) y se sumergen en agua para su cocción. Posterior

a ello, debe llevarse a cabo un lavado en al menos 2 ocasiones, asegurando la eliminación de componentes orgánicos restantes no favorables y cualquier exceso de cal (Salinas-Moreno *et al.*, 2017).

De este proceso se obtiene un producto denominado como nixtamal, mismo que debe pasar por un proceso de molienda para producir una masa blanda que será precursora de cualquier producto a elaborar, como las tortillas (Salinas-Moreno *et al.*, 2017).

Durante la nixtamalización se producen cambios fisicoquímicos notables en el maíz utilizado, esto, como resultado del tratamiento térmico, adición de cal y la maceración-molienda involucrada, mismos que mejoran notablemente la calidad nutricional del maíz. En particular, la gelatinización parcial del almidón, la saponificación parcial de lípidos, la solubilización de algunas proteínas que rodean los gránulos de almidón y la conversión de los componentes de hemicelulosa de la pared celular en gomas solubles influyen fuertemente en las propiedades reológicas y texturales de los productos finales, dando las mejoras necesarias tras el proceso de nixtamalización (Arendt & Zannini, 2013).

2.3.2 Cambios en el grano de maíz

2.3.2.1 Físicos

Durante el proceso de nixtamalización, el grano de maíz sufre el ablandamiento de la cáscara, haciéndola de fácil remoción por medio de simples lavados con agua. Esto se debe a que la cáscara o pericarpio del grano está compuesto en su mayoría por hemicelulosas que contienen pequeñas fracciones de lignina, polímero fenólico que se oxida fácilmente en medio básico (González *et al.*, 2004).

Según Arámbula-Villa *et al.* (2001), se perciben cambios en la textura y forma desde la creación de la masa para la fabricación de productos como las tortillas, hecho que depende ampliamente del tiempo de reposo que reciba la masa, lo cual determinará la funcionalidad de esta masa ya que, una masa con baja adhesividad no proporcionará estabilidad o consistencia a un producto final (tortillas).

En cuanto a otras propiedades como la viscosidad máxima del producto de la nixtamalización, esta suele disminuir o no presentar ningún cambio debido a que,

los gránulos de almidón en el maíz presentan el fenómeno de gelatinización, lo cual complica el desarrollo de viscosidad tras rehidratarse durante la nixtamalización. Esto indica que la capacidad para desarrollar viscosidad será siempre menor en una masa que en el grano de maíz (Arámbula-Villa *et al.*, 2001).

2.3.2.2 Químicos

Dentro de los cambios que provoca la nixtamalización, los cambios químicos se presentan en mayor cantidad y relevancia.

Durante la ruptura de la cáscara o pericarpio del grano de maíz, la difusión de agua caliente al grano permite a su vez la difusión de iones Ca^{2+} que son transferidos por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esto permite la formación de una estructura más rígida de los gránulos de almidón gelatinizado presentes, debido a la interacción entre los iones Ca^{2+} y aquellos iones OH^- libres (Zavala-Franco, 2015).

En cuanto las características fisicoquímicas, el grano presenta aumentos de humedad tras el proceso de nixtamalización, modificando a su vez propiedades como textura, elasticidad y fuerza de corte tras convertirse en una masa, producto de la nixtamalización. En el producto final, la humedad puede presentarse de hasta un máximo de 40 g/100 g de tortilla, cuando el grano de manera convencional posee hasta 15 g/100 g de grano de maíz. Dichos aumentos de humedad permiten obtener productos de calidad ya que, de tener bajos contenidos de humedad, se obtendrían productos quebradizos y con texturas indeseables (Arámbula-Villa *et al.*, 2001).

Otro de los cambios físicos relevantes es el contenido de almidón dañado en el producto final, lo cual indica el índice de degradación que presenta el almidón durante el cocimiento y reposo del grano de maíz. Los granos de maíz pueden presentar una relación de almidón dañado de 14 g/100 g de almidón, lo cual indica el posible desarrollo de viscosidad (se comporta de manera inversa). El daño presentado en el almidón se debe al fenómeno de gelatinización tras la cocción y reposo del grano (Salinas-Moreno *et al.*, 2017).

El almidón presente en los granos de maíz tiende a perder cristalinidad tras convertirse en un producto de nixtamalización, disminuyendo de manera gradual conforme se va ejecutando el proceso. El almidón en granos de maíz que han

sido sometidos a nixtamalización, ha presentado picos de difracción característicos tras someterse a rayos X, obteniéndose en las regiones planares correspondientes en 3,8; 4,4; 5,1 y 5,8 Å. Las medidas anteriores indican las posibles regiones cristalinas en los gránulos de almidón en el producto final, dando como resultado la evolución de almidón tipo A (en el grano de maíz) a una estructura denominada como A+V, presente tras la nixtamalización. Esto se debe a que la nixtamalización es un proceso húmedo y se facilita dicho cambio de estructura, disminuyendo la cristalinidad y asociando este hecho a la posible disminución de la viscosidad máxima alcanzada, esto debido al fenómeno de gelatinización presentado durante la nixtamalización (Arámbula-Villa *et al.*, 2001).

2.3.2.3 Valor nutritivo

El valor nutritivo se ve afectado principalmente por los cambios químicos presentados ya que, tras el proceso de nixtamalización, se pierden nutrientes en el grano como la fibra. Aunque suceda esto, los cambios químicos también propician aportes al aumento en el valor nutricional de cualquier producto final tras este proceso (Contreras-Jiménez, 2009).

Durante el proceso, se llevan a cabo algunos cambios como la modificación de la disponibilidad de proteínas en el maíz, tal es el caso de las zeínas, proteínas de bajo valor nutricional en el maíz que reducen su solubilidad durante el proceso de nixtamalización. En cuanto al caso contrario, las glutelinas incrementan su solubilidad, lo cual incrementa la disponibilidad de aminoácidos esenciales presentes en el producto final (Contreras-Jiménez, 2009).

La disponibilidad de aminoácidos suele verse afectada al aumentar los aminoácidos esenciales específicos con incrementos de hasta 2.8 veces para lisina, triptófano y aumento de la relación de isoleucina a leucina. Además, se han reportado incrementos en niacina, disminución de presencia de metabolitos secundarios indeseables tras el desarrollo de microorganismos en materias primas, como son las aflatoxinas y posibles aumentos en el contenido de calcio, reportándose hasta un aumento del 400 % del contenido original (Contreras-Jiménez, 2009).

2.3.3 Problemas de la nixtamalización

La nixtamalización tradicional presenta una gran variedad de dificultades tras la obtención de un producto final, siendo el principal problema el residuo líquido que se genera después de la nixtamalización, mejor conocido como nejayote. Este residuo se obtiene tras el lavado de la masa nixtamalizada que se obtiene. El nejayote suele tener un pH alcalino alto y puede provocar la formación de posibles incrustaciones en tuberías de drenaje público tras ser desechado. Este residuo puede poseer en su composición hasta 6 % de sólidos disueltos y suspendidos conformados principalmente por tejido de pericarpio rico en fibra, proteínas y lípidos, por lo que es necesario implementar un proceso de remediación para su correcto desecho (Campechano-Carrera *et al.*, 2012).

Aunado a ello, el consumo de agua durante la nixtamalización puede considerarse enorme tras una revisión del rendimiento con el consumo de productos de nixtamalización como son las tortillas en México. El agua utilizada durante la nixtamalización representa hasta 3 veces el rendimiento de producto terminado (3:1) lo cual exige un consumo excesivo de agua y un problema económico tras la obtención del nejayote y su necesidad de ser tratado (Contreras-Jiménez, 2009).

Siendo el consumo energético, de agua y obtención de residuos complicados de tratar, se buscan alternativas que faciliten o eliminen dichas problemáticas como posibles cambios en las concentraciones de cal utilizadas en la nixtamalización (Contreras-Jiménez, 2009), cocción a presión (Bressani *et al.*, 1962), cocción por vapor (Mendoza, 1975), producción de harinas instantáneas para tortillas (Molina *et al.*, 1977).

2.3.4 Métodos alternativos de nixtamalización

Tras las complicaciones que presenta el proceso de nixtamalización tradicional, se han buscado alternativas más eficientes en cuestión de consumo de agua, disminución de residuos y de consumo energético.

Los estudios para resolver esta problemática yacen en la reformulación de los componentes utilizados durante el proceso de nixtamalización, medio de cocción y método de calentamiento.

Algunas alternativas surgen de la sustitución de hidróxido de calcio (cal) para la cocción alcalina por algunos otros componentes que conforman las sales de calcio como el cloruro de calcio (CaCl_2), sulfato de calcio (CaSO_4) y carbonato de calcio (CaCO_3), sales que logran producir menos residuos contaminantes que la nixtamalización tradicional (Ramírez *et al.*, 2018).

Otra alternativa dentro de este campo es utilizar algunos ácidos como sustituto al hidróxido de calcio en la nixtamalización tradicional, llevando a cabo la cocción con agua y aquel compuesto sustituto como pueden ser ácidos débiles como ácido acético o propiónico a temperaturas entre 80 y 90 °C por 30-40 minutos. Este método ha demostrado la posible obtención de harina integral del maíz y residuos libres de sólidos del pericarpio, que son la principal problemática en la nixtamalización tradicional (Ramírez *et al.*, 2018).

Existen alternativas tecnológicas a la nixtamalización tradicional, denominando el uso de tecnologías emergentes para eficientar dicho proceso. Una de estas alternativas, como lo describe Ramírez-Araujo *et al.* (2019), es la extrusión. Este proceso de inducción utiliza energía térmica y mecánica con el uso de altas presiones y temperaturas para comprimir la materia prima utilizada para formar una masa semisólida que adquiere una forma definida por medio del paso a través de una salida con la forma deseada. La extrusión favorece enormemente la nixtamalización ya que, no produce nejayote, no presenta pérdidas nutricionales y da la posibilidad a la obtención de alimentos integrales (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

Otras opciones dentro de este campo es el ultrasonido y microondas. El ultrasonido consiste en el uso de ondas de baja frecuencia y alta potencia (hasta 20 kHz). Este método puede combinarse con otras tecnologías como calefacción eléctrica y nixtamalización tradicional. El ultrasonido puede funcionar como tecnología de asistencia a los métodos ya descritos, lo cual puede provocar mejoras en el contenido de humedad, textura, color y disminución de residuos altos en sólidos (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

En cuanto al calentamiento con microondas, este proceso requiere energía electromagnética que oscila entre 915 y 2450 MHz, lo cual logra un calentamiento

no uniforme en la matriz alimentaria expuesta de manera volumétrica y rápida. El proceso de nixtamalización puede ser asistido por esta tecnología, dando ventajas como reducción en los tiempos de cocción, ahorro de energía, altos perfiles nutricionales, bajo coste de operación y disminución de residuos altos en sólidos (nejayote) (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

Una de las tecnologías de mayor interés ha sido el calentamiento óhmico. La nixtamalización asistida con este método de calentamiento involucra una aplicación de una corriente eléctrica, misma que un alimento es capaz de resistir para inducir un medio de calentamiento por medio de la circulación de una corriente eléctrica en el mismo. Esta tecnología se ha mostrado eficiente en la nixtamalización, a modo que mejora las propiedades de textura, rendimiento en producción, disminución en obtención de residuos y facilidad para procesar el grano entero (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

2.4 Calentamiento óhmico

2.4.1 Principios del calentamiento óhmico

El calentamiento óhmico se considera un método o tecnología emergente y no destructiva que se basa en la aplicación de una corriente eléctrica a un alimento, que normalmente es capaz de resistir el flujo de energía de una corriente eléctrica. Esto se denomina como efecto Joule y permite que por el alimento circule dicha corriente eléctrica para generar calor interno en la matriz del alimento, gracias a la resistencia existente cuando circula dicha corriente (Ramírez-Araujo *et al.*, 2019).

A diferencia de otros medios de calentamiento, esta tecnología involucra la conductividad eléctrica como parámetro de control en el calentamiento del producto (Morales-Sánchez, 2008).

El calentamiento óhmico en alimentos suele basarse en una tasa de generación de calor interno que, como ya se mencionó, se rige por la conductividad eléctrica del alimento, describiendo este comportamiento en la siguiente ecuación:

$$Q = kE^2$$

Donde:

Q = Tasa de generación interna de energía (C)

E = Fuerza de campo eléctrico (N/C)

k = Constante de proporcionalidad ($9 \times 10^9 N/C^2$)

El uso de esta tecnología en alimentos suele comportarse como un calentamiento uniforme, hecho que provoca que un producto no sufra efectos de gradiente de temperaturas o cambios drásticos en su interior debidos a este fenómeno. La intensidad del calentamiento es gobernada por la uniformidad de la conductividad eléctrica del alimento a lo largo de toda su masa y el tiempo durante el cual se somete el alimento a dicho calentamiento (Oblitas-Cruz, 2017).

El calentamiento óhmico, por ende, es producido por el efecto Joule y se requiere de una celda de calentamiento dotada de dos electrodos que permitan al alimento funcionar como una resistencia tras el flujo de energía eléctrica (Figura 9) (Contreras-Jiménez, 2009).

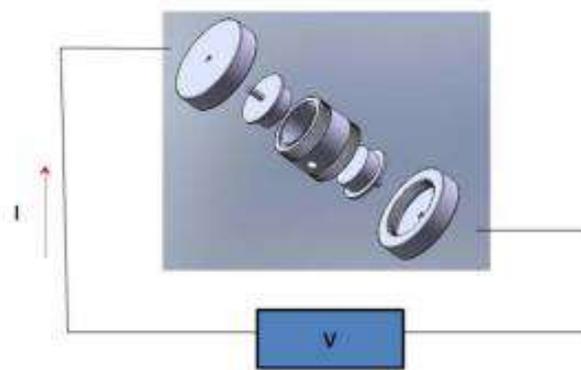


Figura 9. Diagrama de celda utilizada para cocción por calentamiento óhmico (tomado de Contreras-Jiménez, 2009).

Siendo así, este proceso depende de la temperatura, tiempo y algunas variables adicionales como puede ser la conductividad eléctrica y fases del alimento, así como el diseño del dispositivo de calentamiento y fuerza de campo eléctrico (Contreras-Jiménez, 2009).

2.4.2 Principales usos

La utilización de este método de calentamiento alternativo en la industria de alimentos ha sido destacada en procesos de pasteurización, escaldado, deshidratación y fermentación, principalmente cuando involucran el procesado de alimentos que contienen altos contenidos de agua como de iones presentes en el mismo, lo cual facilita su procesado por medio de este calentamiento (Morales-Sánchez, 2008).

El uso más destacado, según lo recopilado por Oblitas-Cruz (2017), se presenta en alimentos que constan de dos fases como algunos purés con pedazos de fruta. A su vez, el calentamiento óhmico ha sido relevante en operaciones que involucran el cocimiento de papas y otros vegetales con el fin de blanquear y preparar alimentos listos para servir ya que, se ha demostrado que este proceso es capaz de mejorar las propiedades organolépticas de frutas y vegetales tanto como sus propiedades fisicoquímicas como son viscosidad y gelatinización de almidón presente en los mismos.

Actualmente existe una gran diversidad de plantas a nivel mundial que utilizan el calentamiento óhmico para procesar alimentos como método de conservación (escaldado) y tratamiento de cárnicos y embutidos por su calentamiento uniforme y eficiencia sobre otros métodos de calentamiento. Esto permite la disminución de posibles pérdidas nutricionales y menores formaciones de depósitos y residuos. (Contreras-Jiménez, 2009).

De igual manera ha sido utilizado en otros métodos de conservación como es el deshidratado de frutos, que, comparado con la deshidratación osmótica, ha presentado mejoras en el perfil nutricional y organoléptico de productos como frambuesas (Contreras-Jiménez, 2009).

2.4.3 Calentamiento óhmico para la nixtamalización

El calentamiento óhmico ha sido utilizado en diversas ocasiones para erradicar las grandes problemáticas de la nixtamalización tradicional como la producción de residuos, el alto consumo de agua y los elevados gastos energéticos que se presentan.

Esta situación se resuelve de manera eficiente en el estudio realizado por Gaytán-Martínez *et al.* (2011) quienes utilizaron un cocedor óhmico por lotes para la generación de productos de nixtamalización, evaluando el efecto del tamaño de partícula, humedad y temperatura sobre las propiedades de masa y tortillas. Esto resultó en condiciones óptimas de funcionamiento a una velocidad de calentamiento (HR) de 53 %, temperatura de operación de 90 °C y tamaño de partícula de 0.8 mm. Esto permite contemplar el calentamiento óhmico como vía de asistencia para la mejora en la nixtamalización tradicional, disminuyendo la producción de residuos, aumentando la retención de agua y mejorando las cualidades nutricionales y texturales del producto, además de mostrarse como un método respetuoso con el medio ambiente (Gaytán-Martínez *et al.*, 2011)

En otro estudio realizado por Gaytán-Martínez (2011) durante la evaluación del efecto del calentamiento óhmico para obtener masa y harinas de maíz nixtamalizado por medio de la molienda convencional de granos de maíz, para su posterior cocción como mezcla de maíz-cal-agua en un cocedor óhmico hasta alcanzar temperaturas de 70, 80 y 90 °C. Las condiciones de operación se determinaron como ideales a tamaños de partícula de 270 y 390 µm con humedad de procesamiento entre 52.5 y 60 % a una temperatura de 80 °C. Esto presenta mejoras en el rendimiento, textura, perfil nutricional y características fisicoquímicas en los productos finales de nixtamalización (Gaytán-Martínez, 2011).

El calentamiento óhmico puede ser utilizado para la nixtamalización de maíz de manera eficiente, disminuyendo la cantidad de residuos generados, tiempo de ejecución y consumo energético. A su vez, el calentamiento húmedo generado por la nixtamalización con calentamiento óhmico, se muestra como una alternativa viable para la degradación de aflatoxinas presentes en el maíz, mismas que suelen ser un problema de salud pública por su alta toxicidad. Esto, comparado con la nixtamalización convencional, logra incorporar un método de nixtamalización – destoxificación en variedades de maíz que suelen ser utilizadas para la elaboración de productos de nixtamalización, como lo son las tortillas. El uso de calentamiento óhmico para este fin, permite aumentar la calidad y eficiencia del proceso de nixtamalización, así como disminuir el riesgo de

intoxicación por aflatoxinas tras el consumo de productos de maíz, mismos que representan una parte importante en la dieta en México.

3. HIPÓTESIS

El desarrollo de un método de destoxificación de aflatoxinas en productos de nixtamalización por calentamiento óhmico, se muestra como una alternativa para aumentar la eficiencia del proceso de nixtamalización convencional, disminuyendo el tiempo de cocción, cantidad de residuos y contenido de aflatoxinas en distintas variedades de maíz contaminado.

4. OBJETIVOS

4.1 General

- Evaluar del proceso de nixtamalización asistido por calentamiento óhmico como un proceso de degradación de distintos niveles de aflatoxinas provenientes de la inoculación in vitro del hongo *Aspergillus flavus* en el grano de maíz, evaluando diferentes concentraciones iniciales de dichos metabolitos y de hidróxido de calcio durante el proceso de nixtamalización.

4.2 Específicos

- Obtener productos de nixtamalización (tortillas) por medio de cocción con calentamiento óhmico a partir de materia prima (granos de maíz de distintas variedades) expuesta a infección fúngica.
- Cuantificar el contenido de aflatoxinas en el producto terminado para demostrar la eficiencia del proceso, mediante el uso de anticuerpos monoclonales específicos.
- Comparar los resultados obtenidos de los porcentajes de degradación de aflatoxinas entre distintas variedades de maíz contaminadas tras el proceso de nixtamalización.

5. METODOLOGÍA

5.1 Materiales y reactivos químicos

Se utilizaron metanol grado HPLC (Sigma Aldrich, CAS: 67-56-1), etanol (Sigma Aldrich, CAS: 64-17-5), medio de cultivo MSA (Sigma Aldrich – 63567), solución reveladora de bromo 0.002% (VICAM, G5002) y columnas de anticuerpos monoclonales (VICAM, Aflatest) para la determinación de aflatoxinas en las tortillas de maíz.

Se utilizaron 5 variedades de maíz (*Zea mays L.*) para nixtamalización (amarillo, azul, blanco Celaya, blanco Sinaloa y morado), adquiridos en el mercado local de Querétaro, mismos que se almacenaron a 4 °C previo a su análisis o utilización para evitar la formación de plagas o enfermedades.

5.2 Caracterización física del grano de maíz

5.2.1 Tamaño del grano

Peso de 100 granos

Se seleccionaron 100 granos sanos de cada muestra y se registró su peso por triplicado. Se pesaron los 100 granos en una balanza analítica OHAUS Adventurer® (Palacios-Rojas, 2018).

Peso de 1000 granos

El peso de 1000 granos se extrapola a partir del valor de peso de 100 granos multiplicando el mismo por 10 (Palacios-Rojas, 2018).

5.2.2 Peso hectolítrico

Se limpió el maíz de impurezas, tamizándolo con ayuda de tamices de malla 60, 80 y 100. Se llenó un recipiente de volumen (1 L) y peso conocidos con granos de maíz. El llenado se llevó a cabo dejándolos caer a una distancia de 20 cm por encima del recipiente. Posteriormente, se retiró el exceso de grano del recipiente con una espátula, rasando en zigzag. El recipiente se pesó en balanza analítica y el resultado se multiplicó por 10 para expresar el resultado en kg/hL (Palacios-Rojas, 2018).

5.2.3 Determinación del índice de flotación (Dureza del grano)

5.2.3.1 Preparación de solución de sacarosa al 67%

Se agregó un litro de agua purificada en una botella vacía de 1.5 L para medir el volumen ocupado por 1 L. Se creó un aforo, marcando con plumón indeleble el nivel al que llegaba dicho volumen. Se pesaron 670 g de azúcar refinada y se depositaron en la botella previamente marcada para aforar hasta la marca con agua purificada y agitar vigorosamente hasta disolver el azúcar. El volumen del líquido disminuyó debido a la incorporación del azúcar en el agua, por lo que se agregó agua nuevamente hasta la marca y se agitó nuevamente para homogenizar la solución. Una vez disuelta el azúcar, se obtuvo un volumen total de la solución de exactamente 1 L (Palacios-Rojas, 2018).

5.2.3.2 Índice de flotación

Se seleccionaron 100 granos (sanos y completos) de cada muestra y se registró su peso (peso de cien granos). Se adicionaron 500 mL de la solución de azúcar en un vaso de precipitados de 1 L y se vaciaron los 100 granos a la solución con agitación (3 veces a la derecha y 3 veces a la izquierda) con ayuda de una cuchara o varilla de vidrio. Se dejó reposar la solución por 1 minuto y se determinó la dureza del grano por medio de la cantidad de granos que lograron flotar o sumergirse (Palacios-Rojas, 2018).

5.2.4 Color

La medición de color se realizó con el método triestímulo CIE Lab (CIE, 1976), basado en la determinación por reflexión de la luz de tres parámetros: L^* (luminosidad), a^* (coordenada de cromaticidad: $+a$ = rojo, $-a$ = verde) y b^* (coordenada de cromaticidad: $+b$ = amarillo, $-b$ = azul). Se utilizó un colorímetro Konika Minolta modelo CR-410, el cual se calibró con una placa blanca proporcionada por el fabricante ($L=87.2$; $a=0.3157$ y $b=0.3232$). Se colocó una muestra de 20 g de cada maíz en una celda para colorímetro y se posicionó la misma en el lente del instrumento para la medición. Los datos se registraron como parámetros L^* , a^* y b^* para la determinación de la saturación o C^* (Croma) y el tono o ángulo (Hue) utilizando las siguientes formulas:

$$C^* = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$Hue = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

5.2.5 Textura

El análisis o perfil de textura, se llevó a cabo en los granos de maíz, sometiendo los mismos a un analizador de textura TA.XT. Plus – Texture Analyser[®], con una celda de carga de 30 kg y una sonda de punción de 4 mm de acero inoxidable (modelo P/2N). Los granos fueron sometidos a análisis de penetración en 3 secciones del grano: endospermo, germen y pericarpio. La sonda se configuró a una altura de 2 mm y distancia de penetración de hasta 2 mm por dentro del grano. Los granos fueron sometidos uno a uno para cada variedad y zona a analizar. Se registró la fuerza de penetración en cada medición en kgf y en Newton (N) en tres secciones del grano de maíz: endospermo, germen y pericarpio (Palacios-Rojas, 2018).

La prueba de dureza con texturómetro se llevó a cabo situando las diferentes zonas anatómicas del grano por debajo de la sonda de punción como se muestra en la figura 10, aunque se excluyó el pedicelo.

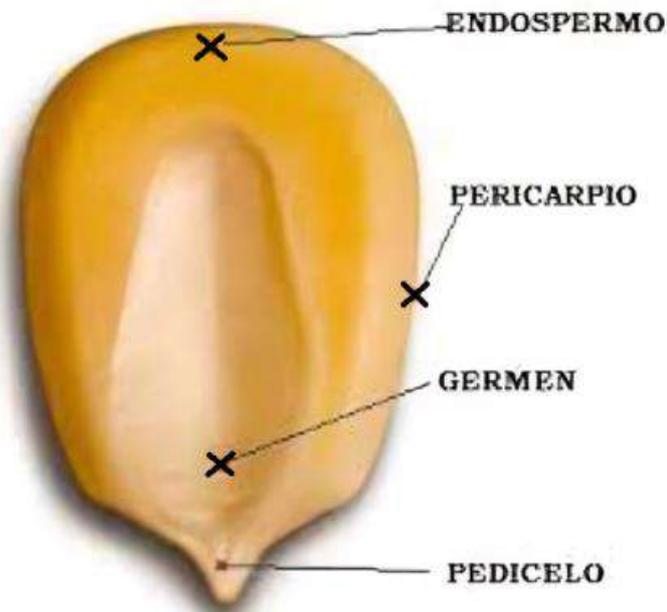


Figura 10. Puntos de punción (marcados con “X”) para la prueba de dureza en distintas zonas anatómicas del grano de maíz (tomado de Gaytán-Martínez, 2011).

5.3 Caracterización fisicoquímica del grano de maíz

5.3.1 Humedad

La humedad se determinó por medio del método AOAC 925.10 (2000). Se molió y pesó una muestra de aproximadamente 2 g y se colocó en charolas de aluminio a peso constante, para llevarse a una estufa de secado Heratherm® (ThermoScientific) de convección natural. El secado se llevó a cabo por 24 h a 105 °C.

El contenido de humedad se expresó en porcentaje y se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$\% H = \frac{PM_1 - PM_S}{PM_1} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde

% H = Porcentaje de humedad.

PM₁ = Peso de la muestra húmeda.

PM_S = Peso de la muestra seca.

5.3.2 pH

La determinación de pH de los granos de maíz se llevó a cabo por medio del método 981.12 de la AOAC (2000). Se prepararon 100 mL de suspensión con 10 g de harina de cada variedad de maíz en 90 mL de agua destilada. La suspensión se reposó por 20 minutos con agitación por 15 s cada 5 minutos. El pH fue medido con un potenciómetro HANNA HI 2210 previamente calibrado con soluciones amortiguadores de pH o “buffers” a pH 4, 7 y 10. La medición se llevó a cabo con la inmersión del electrodo en la solución, sin mantener contacto con las paredes o el sedimento de la suspensión.

5.3.3 Composición proximal

Se utilizaron métodos de la AOAC (AOAC, 2000) para determinar el contenido de lípidos (método 920.39), cenizas (método 942.05), proteína (método 920.15), fibra dietética (método 991.43) y carbohidratos por diferencia.

5.3.3.1 Determinación del extracto etéreo

El extracto etéreo se determinó por medio del método de extracción Soxhlet. Con ayuda de un molino comercial, se molieron 10 g de cada maíz para ejecutar el análisis por triplicado (AOAC, 2000).

Se utilizaron 15 matraces bola a peso constante (110 °C/4 h) junto con 15 cartuchos de celulosa a peso constante (45 °C/5 h) para adaptarse a 15 sistemas de extracción, provistos de condensador, sifón y plancha de calentamiento en cada uno de ellos.

Se pesaron 3 g de maíz molido en un cartucho de celulosa, por triplicado para cada variedad de maíz. Posteriormente, se colocó algodón en los cartuchos para sellarlos completamente y se almacenaron en desecador hasta su uso.

Se montaron los equipos de extracción Soxhlet y se conectaron a un baño recirculador, provisto de hielo, para la condensación de solvente. Se colocaron 80 mL de éter etílico en los matraces de cada sistema de extracción y se conectaron al sistema por medio del cuello esmerilado. Los cartuchos de celulosa fueron colocados dentro de los sifones del sistema para la extracción.

Se encendieron las planchas de calentamiento y se monitoreó la extracción hasta cumplir 12 reflujos de solvente en el sifón del sistema. Al terminar, se desmontaron los equipos de extracción y los cartuchos de celulosa fueron trasladados a una estufa de calentamiento a 80 °C por 1 h, para determinar el extracto etéreo por diferencia de peso.

A su vez, los matraces esmerilados se colocaron en estufa de calentamiento a 110 °C por 20 minutos para evaporar el solvente restante y determinar el extracto etéreo por diferencia de peso (AOAC, 2000).

El contenido de grasa cruda se determinó por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ grasa cruda} = \frac{\text{Peso del matraz con grasa} - \text{Peso del matraz vacío}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

(Ec. 4)

% grasa cruda

$$= \frac{\text{Peso del cartucho de celulosa} - \text{Peso del cartucho de celulosa vacío}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

(Ec. 5)

5.3.3.2 Determinación del contenido de proteína

El contenido de proteína en el grano de maíz se determinó por medio del método Kjeldahl de digestión – destilación – titulación para la determinación de contenido de nitrógeno total (AOAC, 2000).

Los granos de maíz de cada variedad se sometieron a molienda, en un peso de 50 g, con un molino comercial para café. Se pesaron muestras de 0.5 g por duplicado de cada variedad de maíz para iniciar con el proceso de digestión. Cada muestra se colocó en un tubo de digestión perteneciente al aparato digestor (BUCHI SpeedDigester K-436) junto con una tableta catalizadora Kjeldahl BUCHI (1.5 g K₂SO₄ + 0.045 g CuSO₄ + 0.045 g TiO₂) para cada muestra y su duplicado.

El proceso de determinación se asistió a su vez con un destilador (BUCHI Scrubber K-415) y un sistema de titulación automático (BUCHI KjellLine).

El contenido de nitrógeno total se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Moles de HCl } 0.1 \text{ N} \equiv \text{Moles de NH}_3 \equiv \text{Moles de N en la muestra analizada}$$

(Ec. 6)

$$\% N = \text{Normalidad del HCl (N)} * \frac{\text{Volumen de HCl gastado (mL)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * \frac{14 \text{ g de Nitrogeno}}{1 \text{ mol}} * 100$$

(Ec. 7)

$$\% \text{ Proteína} = \% N * 6.25$$

(Ec. 8)

5.3.3.3 Determinación del contenido de fibra cruda

El contenido de fibra cruda en las muestras fue determinado por medio del método de hidrólisis ácida y alcalina (AOAC, 2000).

Los granos de maíz de cada variedad se sometieron a molienda, en un peso de 50 g, con un molino comercial para café. Se pesaron muestras de 0.5 g por duplicado de cada variedad de maíz para iniciar con el proceso de digestión.

Se utilizó un equipo para determinación de fibra cruda (Novatech FC-6) provisto de 6 vasos Berzelius de 600 mL. Las muestras se colocaron en el equipo junto con 20 mL de H₂SO₄ 0.25 N para la hidrólisis ácida y 30 minutos después, 50 mL de NaOH 0.81 N para la hidrólisis alcalina. La muestra se filtró al vacío (con papel filtro Whatman 1) y a posterior lavado con agua caliente para desecarse en estufa de convección natural (ThermoScientific) a 110 °C por 3 h y posterior calcinación a 550 °C por 2 h en un horno de mufla (ThermoScientific – FB1315M) con la muestra contenida en crisol de porcelana.

El contenido de fibra en las muestras se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{(PPM-PPF)-(PCC-PCV)}{PM} * 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

PPM: Peso de papel filtro + Muestra filtrada (g)

PPF: Peso del papel filtro (g)

PCC: Peso de crisol con cenizas (g)

PCV: Peso de crisol vacío a peso constante (g)

PM: Peso de la muestra (g)

5.4 Caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

5.4.1 Determinación de las propiedades eléctricas de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

La velocidad de calentamiento (HR o “heating rate”) se calculó como el diferencial de temperatura (ΔT) dividido por el tiempo transcurrido durante el calentamiento óhmico (Δt).

$$HR = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde HR o velocidad de calentamiento es medida en °C/min; ΔT o diferencial de temperatura es medido en °C y Δt o diferencial de tiempo es medido en min.

La resistencia eléctrica (R), se calcula por medio de la ley de Ohm como cociente del voltaje aplicado (V) sobre la intensidad de corriente (I).

$$R = V/I \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde la resistencia eléctrica o R es medida en ohmios; el voltaje aplicado o V, es medido en V (volts) y la intensidad de corriente o I, es medida en A (amperes).

La intensidad de campo eléctrico (EFS) se calcula por medio del cociente del voltaje aplicado (V) sobre la distancia entre los electrodos (d).

$$EFS = V/d \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde la intensidad de campo eléctrico o EFS se mide en V/cm (volts/centímetro); el voltaje aplicado se mide en V (volts) y la distancia entre electrodos o d, se mide en cm (centímetros).

El potencial eléctrico o calor generado (P) se calculó por medio de la ley de Joule, como el producto del voltaje aplicado (V) y la intensidad de corriente (I) o como el cociente del cuadrado del voltaje (V^2) por la resistencia eléctrica (R) medida en ohmios.

$$P = \frac{V^2}{R} = (V)(I) \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde el potencial eléctrico o P, es medido en W (watts); el voltaje aplicado o V es medido en V (volts) y la intensidad de corriente o I es medida en A (amperes).

La conductividad eléctrica (σ), se calculó por medio del cociente del producto entre intensidad de corriente (I) por la longitud entre los electrodos (L) entre el producto del voltaje aplicado (V) por el área de los electrodos (A).

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde σ es la conductividad eléctrica medida en mS/m; I es la intensidad de corriente eléctrica aplicada, medida en A (amperes); V es el voltaje eléctrico aplicado medido en V (volts); R es la resistencia eléctrica medida en ohmios (calculada como V/I); L es la distancia entre electrodos (m) y A es el área de los electrodos (m^2). Durante el calentamiento óhmico, los valores de voltaje, corriente y temperatura se registraron en intervalos de cada 1 s.

5.5 Inoculación del grano de maíz

5.5.1 Precauciones de seguridad para el manejo de aflatoxinas

Los procedimientos utilizados para manipular materiales contaminados con aflatoxinas se adoptaron de las recomendaciones publicadas por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2012).

Las recomendaciones generales sobre cómo manejar estos materiales de forma segura se basan además en las regulaciones de salud y seguridad ocupacional y se dictan como se describe a continuación:

- Equipo de protección personal (EPP): Utilizar guantes, gafas de protección y mascarillas para evitar la exposición directa a las aflatoxinas.
- Manipulación en áreas bien ventiladas: Trabajar en áreas con buena ventilación para reducir la inhalación de aflatoxinas.
- Evitar la exposición cutánea: Cubrir la piel expuesta para evitar el contacto directo con las aflatoxinas.
- Evitar la ingestión accidental: No comer, beber o fumar en áreas donde se manipulan materiales contaminados con aflatoxinas.
- Limpieza y descontaminación: Limpiar regularmente las superficies de trabajo y equipos con detergentes y desinfectantes adecuados para reducir la contaminación.

5.5.2 Inoculación del maíz

Para la inoculación del hongo en el grano de maíz, se utilizó el método descrito por Zavala-Franco (2015). El hongo *Aspergillus flavus* Link se incubó por 7 días a 25°C en cajas de Petri con medio de cultivo MSA (2 % extracto de malta, 6 % cloruro de sodio y 2 % de agar) para inducir la esporulación, esperando la

producción de AFB₁ y AFB₂ (89:11) (Zavala-Franco, 2020). Las esporas producidas se removieron con una espátula y se utilizaron para preparar 400 mL de una suspensión con agua estéril, buscando una concentración de esporas de aproximadamente 100,000 esporas/mL. La suspensión se utilizó para llevar el contenido de humedad del grano de maíz hasta un 18 %. La cantidad de inóculo utilizado fue de aproximadamente 10,000 esporas/ g de maíz en frascos de vidrio estériles. El maíz se homogeneizó por agitación manual por 20 minutos. El grano de maíz fue inoculado por 7 y 14 días para producir dos diferentes concentraciones de aflatoxinas a 25 °C y con una humedad relativa del 75 %. Al término de la incubación, el grano de maíz se sometió a una atmósfera de gas de óxido de etileno a una concentración de 1000 mg/L durante 5 h, para detener el desarrollo del hongo y evitar que las esporas viables se dispersaran. Finalmente, el grano se secó hasta una humedad del 11 % y se transfirió a bolsas de plástico para ser almacenado a 4°C.

5.6 Nixtamalización por calentamiento óhmico

Para este paso, se siguió la metodología propuesta por Morales Sánchez, Figueroa-Cárdenas, & Gaytán-Martínez (2010). Se obtuvieron harinas instantáneas para la elaboración de productos de nixtamalización (tortillas) por medio de un cocedor óhmico continuo. Para la obtención de harinas instantáneas de maíz por proceso de calentamiento óhmico, se molieron 100 g de granos de maíz contaminado con aflatoxinas en dos niveles (Nivel 1 – Concentración más baja en ng/g y Nivel 2 – Concentración más alta en ng/g) en un molino de martillos Pulvex equipado con malla de 3 mm. La molienda obtenida de cada variedad de maíz, se mezcló con hidróxido de calcio (Nixtocal) al 0.1 % y 0.3 % (% p/p) y suficiente agua para alcanzar el 50 % de humedad para ambos contenidos de aflatoxinas en el maíz (Nivel 1 – Concentración más baja en ng/g y Nivel 2 – Concentración más alta en ng/g).

La mezcla se sometió a calentamiento a través de un cocedor óhmico provisto con celda cilíndrica de Nylamid. La mezcla (harina de maíz cruda con agua y cal) se introdujo en la celda hasta el tope de ambos electrodos laterales para facilitar el cierre. La celda se aseguró en los electrodos con ambas tapas de Nylamid

laterales y se conectó al sistema de calentamiento óhmico por medio de cables caimán a los electrodos de la celda con la muestra ya contenida dentro. El sistema se configuró para calentar hasta a 85 °C, aplicando un voltaje de 120 V. La masa cocida húmeda obtenida a la salida de la celda del cocedor óhmico se deshidrató utilizando un deshidratador comercial a 55 °C por 18 h.

5.7 Elaboración de tortillas

Se elaboraron tortillas con las harinas obtenidas del cocedor óhmico. Se utilizaron 100 g de harina nixtamalizada, sometida a proceso de molienda en una licuadora comercial (Oster BLSTBPST013). El peso de harina se adecuó para elaborar una masa en proporción 4:1 de harina y agua, dando forma a pequeñas esferas de aproximadamente 5 cm de diámetro para que, por medio de una prensa, se les diera la forma final de tortilla.

Las tortillas se sometieron a proceso de cocción en una parrilla eléctrica con comal de hierro (placa metálica de 2 mm de espesor) a una temperatura de 280 °C. Se colocaron a contacto directo con el comal, con tiempos de calentamiento de 15 s para la formación de una capa delgada en la tortilla, 45 s para la formación de una capa gruesa en la tortilla y 15 s para permitir el inflado.

5.8 Cuantificación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.

El contenido de aflatoxinas se determinó de acuerdo con el método 991.31 de la AOAC (AOAC 2000) utilizando columnas de anticuerpos monoclonales para aflatoxinas totales (B1, B2, G1 y G2) (VICAM, Milford, MA). Las muestras (100 g) se extrajeron mezclándolas con 100 mL de metanol y agua (80:20, v/v) y cloruro de sodio (10% p/p) utilizando una licuadora comercial (Oster BLSTBPST013). La mezcla se filtró a través de un papel filtro Whatman No. 1 en volumen de 5 mL diluido con 20 mL de agua destilada. La preparación diluida se filtró con papel Whatman No. 5 y se aplicaron 10 mL a una columna de inmunoafinidad (Afla B; VICAM Science Technology, Watertown, MA, EE. UU.).

Posteriormente, la columna se lavó dos veces con 10 mL de agua destilada. Las toxinas se eluyeron con 1 mL de metanol (grado HPLC) y se cuantificaron en un fluorómetro VICAM Series-4 (VICAM Source Scientific, Irvine, CA, EE. UU.) después de la reacción con 1 mL de bromo acuoso al 0.002 %. El límite de detección de aflatoxinas a través de la medición de fluorescencia es aproximadamente 0.5 ng/g. De haber obtenido un contenido total de aflatoxinas superior a 300 ng/g, se realizaron diluciones de los extractos antes de pasarlos por las columnas de inmunoafinidad.

5.9 Caracterización fisicoquímica de las tortillas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico

5.9.1 Humedad

La humedad se determinó por medio del método AOAC 925.10 (2000). Se molió y pesó una muestra de aproximadamente 2 g y se colocó en charolas de aluminio a peso constante, para llevarse a una estufa de secado Heratherm® (ThermoScientific) de convección natural. El secado se llevó a cabo por 24 h a 105 °C.

El contenido de humedad se expresó en porcentaje y se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$\% H = \frac{PM_1 - PM_S}{PM_1} \times 100 \text{ (Ec. 15)}$$

Donde

% H = Porcentaje de humedad.

PM₁ = Peso de la muestra húmeda.

PM_S = Peso de la muestra seca.

5.9.2 pH

La determinación de pH de las tortillas de maíz se llevó a cabo por medio del método 981.12 de la AOAC (2000). Se prepararon 100 mL de suspensión con 10 g de harina de tortillas de cada variedad de maíz en 90 mL de agua destilada. La suspensión se reposó por 20 minutos con agitación por 15 s cada 5 minutos. El pH fue medido con un potenciómetro HANNA HI 2210 previamente calibrado con buffers a pH 4, 7 y 10. La medición se llevó a cabo con la inmersión del electrodo

en la solución, sin mantener contacto con las paredes o el sedimento de la suspensión.

5.10 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental se planteó a partir de los tratamientos de nixtamalización, contaminación inicial de aflatoxinas y variedades de maíz, tomando en cuenta dos niveles en cada factor; contaminación inicial de aflatoxinas (Nivel 1 y 2) y concentración de cal utilizada (0.1 % y 0.3 %) para la asignación de tratamientos en cada variedad de maíz utilizada. El diseño final se presenta como sigue en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Diseño experimental para los tratamientos de nixtamalización con calentamiento óhmico en las diferentes variedades de maíz.

Tratamiento experimental	Contenido de cal (% p/p)	Contenido de aflatoxinas (ng/g)	Variedad de maíz
1	0.1	Nivel 1	Blanco Celaya
2	0.1	Nivel 1	Blanco Sinaloa
3	0.1	Nivel 1	Amarillo
4	0.1	Nivel 1	Azul
5	0.1	Nivel 1	Morado
6	0.1	Nivel 2	Blanco Celaya
7	0.1	Nivel 2	Blanco Sinaloa
8	0.1	Nivel 2	Amarillo
9	0.1	Nivel 2	Azul
10	0.1	Nivel 2	Morado
11	0.3	Nivel 1	Blanco Celaya
12	0.3	Nivel 1	Blanco Sinaloa
13	0.3	Nivel 1	Amarillo

Cuadro 4. Continuación.

Tratamiento experimental	Contenido de cal (% p/p)	Contenido de aflatoxinas (ng/g)	Variedad de maíz
14	0.3	Nivel 1	Azul
15	0.3	Nivel 1	Morado
16	0.3	Nivel 2	Blanco Celaya
17	0.3	Nivel 2	Blanco Sinaloa
18	0.3	Nivel 2	Amarillo
19	0.3	Nivel 2	Azul
20	0.3	Nivel 2	Morado

El análisis estadístico de los resultados de la caracterización física y fisicoquímica del maíz, así como la caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas, se llevó a cabo por medio de análisis de varianza (ANOVA) de un factor y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey con un valor $p=0.05$. El análisis estadístico de los resultados de degradación de aflatoxinas y el contenido final de aflatoxinas después del tratamiento de nixtamalización con calentamiento óhmico, se llevó a cabo por medio de análisis de varianza (ANOVA) de un factor y se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de medias ($p=0.05$).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización física del grano de maíz.

En el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física de los maíces.

Como reporta Palacios-Rojas (2018), una medida rápida y sencilla para estimar el tamaño del grano, es el peso de 100 granos. Este método es el más utilizado y bien reconocido dentro del ámbito de calidad industrial de cereales, especialmente para productores de harina.

El peso de 100 granos permite conocer el tamaño del grano como se describe en el Cuadro 6.

Las variedades de maíz presentaron diferencias estadísticas en el peso de 100 y 1000 granos. Los maíces azul y morado no presentan diferencias significativas entre ellas, en tanto que los maíces blancos y amarillo presentan diferencias estadísticas de los maíces de color (azul y morado), pero no entre ellas. Esto se debe a que los maíces azul y morado son considerados maíces de grano grande (peso mayor a 38 g para 100 granos). Por otro lado, los maíces blancos y amarillo, se consideran como maíces de grano mediano (peso de 100 granos en el rango de 33 – 38 g).

El endospermo es la parte anatómica del grano en la cual se almacena principalmente el almidón. Un mayor peso de mil granos es indicativo de granos de mayor tamaño con mayor cantidad de almidón y por lo tanto mayor rendimiento durante la molienda húmeda. Aragón *et al.* (2012), reportaron que la industria molinera prefiere granos con alto porcentaje de endospermo vítreo lo cual se relaciona con un peso de mil granos mayor.

El peso hectolítrico, (también conocido como masa hectolítrica, gravedad específica, peso específico o densidad aparente), es un parámetro de calidad que se relaciona directamente con la dureza del grano, posible susceptibilidad a ruptura, rendimientos de molienda, velocidad de secado y condiciones generales del grano. Un grano de mayor densidad, será menos susceptible al ataque de insectos, plagas o microorganismos. Esto permite soportar de mejor manera cualquier condición que requiera el uso del grano a nivel industrial, como su almacenamiento, comercialización y transporte (NMX-FF-034/1-SCFI-2020).

Cuadro 5. Caracterización física del grano de maíz

Variedad de maíz	Peso de 100 granos (g)	Peso de 1000 granos (g)	Peso hectolítrico (kg/hL)	Índice de flotación (%)	Dureza*
Blanco Celaya	34.80±0.07 ^b	348.03±0.65 ^b	80.49±0.28 ^a	7.67±0.58 ^d	Muy duro
Blanco Sinaloa	35.46±0.86 ^b	354.64±8.63 ^b	76.74±0.36 ^b	16.33±0.58 ^c	Duro
Amarillo	34.15±0.12 ^b	341.51±1.23 ^b	81.97±1.36 ^a	4.00±0.00 ^e	Muy duro
Azul	40.32±1.25 ^a	403.24±12.46 ^a	71.71±0.18 ^c	60.00±0.00 ^b	Intermedia
Morado	38.70±1.06 ^a	386.96±10.55 ^a	65.01±0.11 ^d	98.00±1.00 ^a	Suave

Valor promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio, con la misma letra en la misma columna, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$). *Con base en la NMX-FF-034/1-SCFI-2020.

Se ha reportado que, para valores de peso hectolítrico por debajo de 73.3 kg/hL, el grano de maíz se considera como suave, mientras que, mayor o igual a 78.2 kg/hL se considera duro, y maíz de dureza intermedia presenta un valor de alrededor de 75 kg/hL (Salinas-Moreno & Aguilar-Modesto, 2020).

Cuadro 6. Clasificación de tamaño del grano de maíz según el peso de 100 granos.

Peso de 100 granos (g)	Tamaño
> 38	Grande
33 – 38	Mediano
< 33	Pequeño

(Palacios-Rojas, 2018)

De igual manera, Palacios-Rojas (2018) describe la clasificación utilizada industrialmente, de dureza del grano según el peso hectolítrico (Cuadro 7).

Cuadro 7. Clasificación de dureza según el peso hectolítrico.

Peso hectolítrico (kg/hL)	Dureza
> 75	Duro
74 – 75	Intermedio
< 74	Suave

(Palacios-Rojas, 2018)

Las variedades de maíz presentaron diferencias estadísticas en cuanto al peso hectolítrico. Entre variedades amarillo y blanco Celaya no presentan diferencias significativas entre ellas, aunque si lo hacen frente a las otras variedades. En cuanto a las variedades restantes, que son la variedad azul, blanco Sinaloa y morado, presentan diferencias estadísticas entre ellas. Estas diferencias se presentan debido a que, los maíces de variedad amarillo y blancos, se consideran maíces de grano duro (Cuadro 7). Esto se debe a que su peso hectolítrico es de 81.97 kg/hL para la variedad de maíz amarillo y 80.49 kg/hL y 76.74 kg/hL para las variedades de maíz blanco Celaya y Sinaloa, respectivamente. El peso

hectolítrico de estas variedades supera los 75 kg/hL, que es el peso mínimo para considerarse como maíz de grano duro (Palacios-Rojas, 2018).

A diferencia de lo anterior, los maíces de variedad azul y morado se consideran maíces de grano suave. Esto se debe a que su peso hectolítrico es de 71.71 kg/hL para la variedad de maíz azul y 65.01 kg/hL para la variedad de maíz morado. El peso hectolítrico de estas variedades es menor a los 74 kg/hL, peso por debajo de lo que una variedad de maíz puede considerarse de grano suave (Palacios-Rojas, 2018).

A pesar de que entre las variedades de maíz amarillo y maíces blancos se presenta una diferencia estadística, estos se encuentran en la misma clasificación de dureza, en función del peso hectolítrico. De igual manera sucede con las variedades de maíz azul y morado que, a pesar de presentarse como estadísticamente diferentes, pertenecen a la misma clasificación de dureza en función de su peso hectolítrico (Palacios-Rojas, 2018).

El Cuadro 5 muestra los resultados de índice de flotación y dureza con base en la clasificación marcada en la norma mexicana NMX-FF-034/2-SCFI-2020. El índice de flotación consiste en el número de granos flotantes en una solución de densidad específica, que para el caso presente es de 1.25 g/mL. Esto permite a los granos suaves un mayor índice de flotación, debido a que poseen mayor cantidad de aire en el endospermo. Esto indica que el índice de flotación es inversamente proporcional a la dureza del grano (menor índice de flotación indica mayor dureza y viceversa) (Palacios-Rojas, 2018).

La dureza del grano de maíz puede determinarse, de igual manera, por medio del índice de flotación. Este parámetro está más relacionado con la capacidad del grano para absorber y retener agua durante las diferentes etapas de cualquier proceso de cocción. Un maíz suave será capaz de hidratarse mejor que un grano duro debido a que los gránulos de almidón en su composición, son más accesibles para el líquido (Palacios-Rojas, 2018).

Dentro de la industria de cereales, las características de estos, difieren en función del producto manufacturado. Ejemplificando el caso de la molienda seca se requieren maíces de grano duro o muy duro para utilizarse de manera adecuada

y obtener rendimientos de harina adecuados. Por otro lado, en la elaboración de tortillas, se buscan granos de maíz de dureza intermedia a alta, debido a que se deben establecer condiciones óptimas de cocción al momento de nixtamalizar (Palacios-Rojas, 2018).

Para el caso del índice de flotación, todas las variedades de maíz presentaron diferencias estadísticas entre sí. El maíz blanco Celaya y amarillo se consideran granos muy duros, el maíz blanco Sinaloa como duro, en tanto que el maíz azul tiene una dureza intermedia y el finalmente el maíz morado es considerado como suave. Esto se debe a la variación entre porcentaje de granos flotantes para cada variedad. Iniciando con la variedad de maíz morado presenta un 98% de granos flotantes, lo cual lo clasifica como un maíz de grano muy suave. La variedad de maíz azul presenta un 60 % de granos flotantes, lo cual lo clasifica como un maíz de grano de dureza intermedia. Por otro lado, la variedad de maíz blanco Sinaloa presenta un 16.33 % de granos flotantes, lo cual lo clasifica como un maíz de grano duro. Las variedades de maíz blanco Celaya y amarillo presentan un 7.67 % y 4 %, respectivamente, de granos flotantes. Esto clasifica a ambas variedades en la escala de maíces de grano muy duro, a pesar de que presentaron diferencias estadísticas entre sí. De igual manera, esto permite explicar más a detalle la diferencia estadística obtenida en la dureza del peso hectolítrico ya que, algunas variedades de maíz con diferencias estadísticas significativas, se encontraban en la misma clasificación de dureza dada por esta determinación. Para ello, en el Cuadro 9, se comparan ambas determinaciones de dureza.

En la Figura 12 se puede apreciar la relación entre el peso de cien granos y el índice de flotación de las variedades de maíz analizadas. Se observa que, a mayor tamaño del grano de maíz analizado, mayor será su índice de flotación. Esto puede atribuirse a que, las variedades de tamaño mediano, suelen ser variedades de alta dureza y menor índice de flotación. En cambio, las variedades de maíz azul y morado, son variedades de tamaño de grano grande y alto índice de flotación; es decir, granos suaves, debido a que el endospermo harinoso posee mayor cantidad de aire y, por ende, tamaños de grano más grande con menor densidad (Palacios-Rojas, 2018).

Esto último está asociado a la comparación de índice de flotación con peso hectolítrico (Figura 11), misma que se muestra como una relación inversamente proporcional. A mayor número de granos flotantes, menor densidad tendrá el grano y, por ende, menor dureza. (Palacios-Rojas, 2018).

Con estos resultados, se puede inferir que la clasificación de dureza se muestra más acertada en términos del índice de flotación, misma que describe a detalle la dureza del grano. Esto, complementándose desde un inicio con la descripción aproximada que otorga el peso hectolítrico en conjunto con el peso de cien y mil granos.

Cuadro 8. Clasificación de dureza según el índice de flotación del grano de maíz.

Granos flotantes (%)	Dureza
0 – 12	Muy duro
13 – 37	Duro
38 – 62	Intermedio
63 – 87	Suave
88 – 100	Muy suave

(NMX-FF-034/2-SCFI-2020)

Cuadro 9. Clasificación de dureza en función de la caracterización física del grano de maíz.

Variedad de maíz	Peso hectolítrico (kg/hL)*	Índice de flotación (%)**
Blanco Celaya	Duro	Muy duro
Blanco Sinaloa	Duro	Duro
Amarillo	Duro	Muy duro
Azul	Suave	Intermedio
Morado	Suave	Muy suave

*Con base a los valores reportados por Palacios-Rojas, 2018.

**Con base en la NMX-FF-034/1-SCFI-2020.

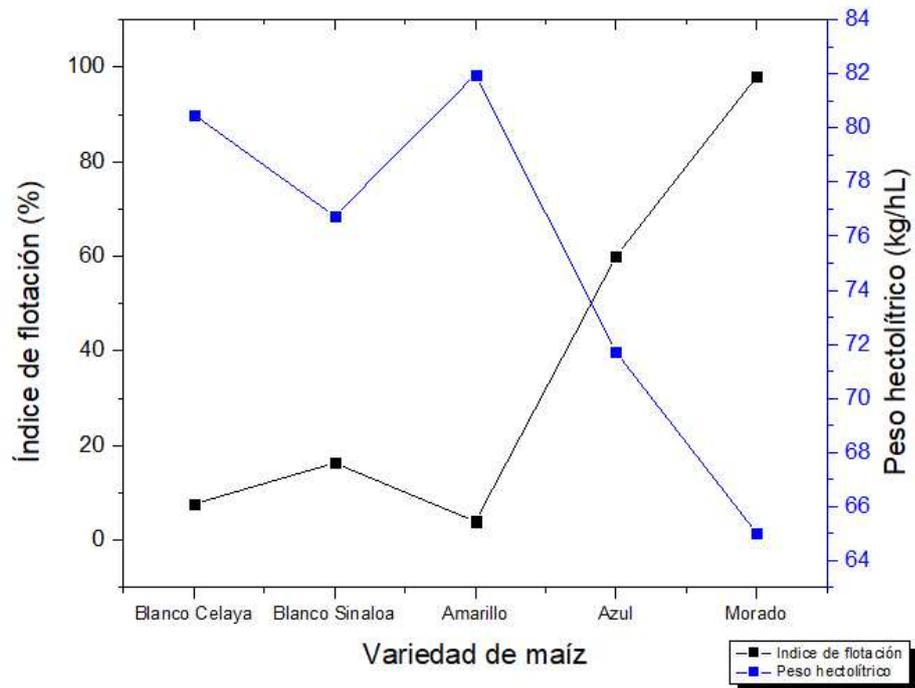


Figura 11. Comparación de propiedades físicas: Índice de flotación – Peso hectolítrico para las distintas variedades de maíz.

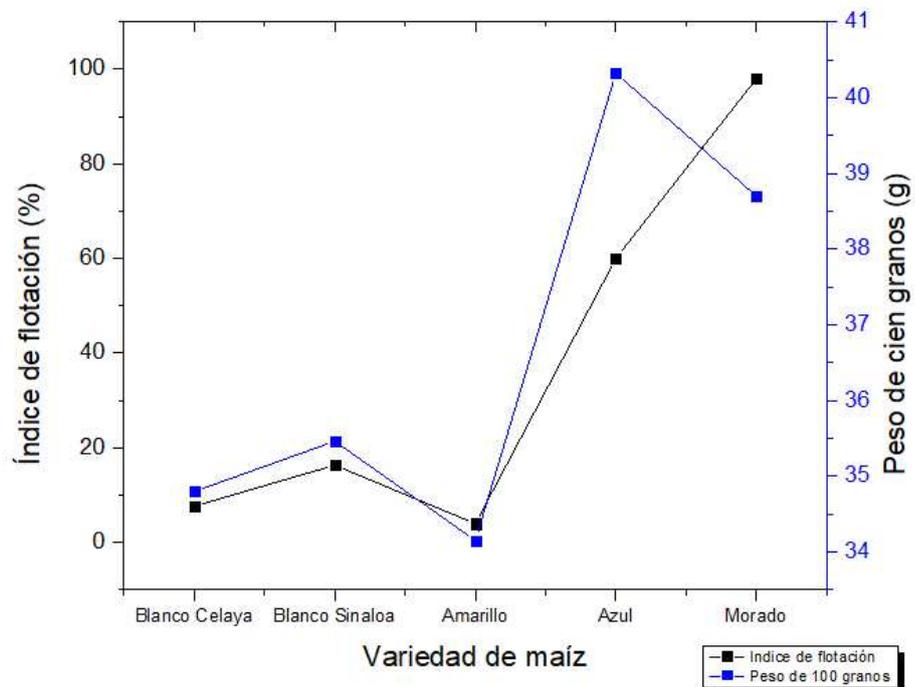


Figura 12. Comparación de propiedades físicas: Índice de flotación – Peso de cien granos para las distintas variedades de maíz.

Los valores reportados por otros grupos de investigación como Sánchez *et al.* (2004) y Vázquez-Carrillo *et al.* (2003), son semejantes a los obtenidos en este trabajo. Vázquez-Carrillo *et al.* (2003) reportan para la variedad de maíz amarillo, un peso de mil granos de 310.0 g, índice de flotación de 69.7 % y peso hectolítrico de 72.5 kg/hL; para la variedad de maíz blanco Celaya reportan un peso de mil granos de 342.5 g, índice de flotación de 44.7 % y peso hectolítrico de 72.9 kg/hL y para la variedad de maíz blanco Sinaloa reportan un peso de mil granos de 386.5 g, un índice de flotación de 57.5 % y un peso hectolítrico de 75.4 kg/hL.

Por otro lado, Sánchez *et al.* (2004) reportan para la variedad de maíz azul un peso de mil granos de 444.1 g, índice de flotación de 59.7 % y peso hectolítrico de 72.2 kg/hL y para variedad de maíz morado un peso de mil granos de 418.5 g, índice de flotación de 88.5 % y peso hectolítrico de 72.1 kg/hL. Esta variación puede deberse a la desviación que posee dicha medición en función de la variedad analizada y la dureza que presentan con los demás parámetros analizados.

Gaytán-Martínez *et al.* (2013) describen los parámetros de calidad necesarios en el grano de maíz utilizado industrialmente para la elaboración de harinas nixtamalizadas (Cuadro 10).

Cuadro 10. Parámetros de calidad de maíces utilizados en la industria de harinas nixtamalizadas.

Parámetro	Valor
Peso de cien granos	≤ 20
Índice de flotación	≥ 20 %
Dureza	> 12 kgf o > 118 N
Endospermo	≤ 78 %
Pericarpio	> 5 %
Germen	> 10 %
Viscosidad relativa	≤ 220 URV
Pérdida de peso en tortillas	> 16 %

(Gaytán-Martínez *et al.*, 2013)

Por lo tanto, los maíces analizados cumplen con el estándar de calidad industrial para harinas nixtamalizadas. Las variaciones durante la selección de un maíz para este fin, puede recaer en la variedad utilizada, su ciclo de cosecha e incluso la región en la cual ha sido cosechado (Gaytán-Martínez *et al.*, 2013).

6.1.1 Textura

En el Cuadro 11 se reportan los valores obtenidos de resistencia a la fuerza de penetración (N) medida en tres componentes anatómicos del grano de las diversas variedades de maíz analizadas.

Cuadro 11. Dureza de las partes anatómicas del grano de maíz.

Variedad de maíz	Fuerza de penetración para cada componente anatómico del grano de maíz		
	Germen (N)	Pericarpio (N)	Endospermo (N)
Blanco Celaya	79.86 ± 2.53 ^d	13.96 ± 1.30 ^d	75.83 ± 2.73 ^b
Blanco Sinaloa	106.31 ± 3.54 ^d	13.59 ± 1.25 ^d	44.11 ± 2.42 ^e
Amarillo	45.92 ± 2.45 ^c	18.01 ± 1.35 ^c	78.66 ± 0.68 ^a
Azul	42.68 ± 1.62 ^a	22.82 ± 1.78 ^a	63.92 ± 2.70 ^c
Morado	39.14 ± 1.20 ^b	20.60 ± 0.84 ^b	48.54 ± 1.09 ^d

Valor promedio de 10 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio, con la misma letra en la misma columna del componente anatómico evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

La dureza determinada por texturómetro permite conocer la fuerza de penetración que se requiere en las 3 zonas anatómicas predominantes del maíz; endospermo, pericarpio y germen. Esto ayuda a confirmar la dureza en función de los resultados obtenidos en índice de flotación y peso hectolítrico.

Las variedades de maíz presentan diferencias estadísticas en la fuerza de penetración en la zona del germen, exceptuando las variedades de maíz blanco (Celaya y Sinaloa) que no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las demás variedades al tener la mayor resistencia a la penetración en dicha zona anatómica. Sin considerar las variedades de maíz blanco, la variedad de maíz amarillo presenta la dureza más alta de las variedades restantes, seguido por la variedad de maíz azul y morado respectivamente.

En términos del pericarpio, las variedades de maíz presentan la misma variación que en la fuerza de penetración en la zona del germen. Las variedades de maíz blanco no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las demás variedades de maíz, seguidas por una mayor resistencia a la penetración en la variedad de maíz azul, morado y amarillo respectivamente.

Por último, para la resistencia a la penetración en la zona del endospermo, todas las variedades presentan diferencias estadísticas entre sí. Para este caso, la variedad de maíz amarillo posee la mayor resistencia a la penetración, seguida por la variedad de maíz blanco Celaya, azul, morado y blanco Sinaloa, respectivamente.

La medición de la fuerza necesaria para la penetración del grano puede estimar la dureza del mismo con relación a los parámetros obtenidos en la caracterización física. La dureza del grano de maíz es determinante en la susceptibilidad para el ataque de microorganismos, insectos y plagas. Los maíces de mayor dureza y densidad son menos propensos al ataque de dichos agentes de deterioro (Palacios-Rojas, 2018).

La fuerza necesaria para la penetración del grano de maíz de variedad blanco Sinaloa destaca por ser la mayor en la parte del germen. Por otro lado, la variedad de maíz azul posee una mayor dureza en la parte del pericarpio. A su vez, la variedad de maíz amarillo, posee una mayor dureza en la parte del endospermo. Relacionando esto con la magnitud de dureza determinada por el índice de flotación, los granos mencionados se catalogan como muy duro, intermedio y duro, respectivamente (NMX-FF-034/1-SCFI-2020). Las variedades de maíz blanco Celaya y morado poseen una dureza considerable en el germen y

endospermo. Estos últimos se clasifican como maíces duro y suave, respectivamente. Esto puede asociarse a su grado de dureza en función de propiedades como peso hectolítrico, índice de flotación y peso de cien granos. Ambos maíces blancos se clasifican como maíces duros, tanto en caracterización física como en la fuerza necesaria de penetración, independientemente del componente anatómico evaluado. Bajo estos términos, le sigue el maíz amarillo (duro), azul (intermedio) y morado (suave), hecho que determina la susceptibilidad de ataque de agentes de deterioro de manera inversamente proporcional: a mayor dureza del grano, menor susceptibilidad de ataque o deterioro por factores externos (Palacios-Rojas, 2018).

Esto puede compararse con la investigación de Sánchez *et al.* (2004), en la que evaluaron la dureza por el mismo método y se obtuvieron fuerzas de penetración en la zona predominante del endospermo de 48.05 N para variedad de maíz morado; 70.61 N para variedad de maíz azul; 77.47 N para variedad de maíz amarillo; 95.12 N para variedad de maíz blanco Celaya y 97.08 N para variedad de maíz blanco Sinaloa. Estos resultados no difieren de las fuerzas obtenidas en la dureza del grano con penetración en el sector anatómico del endospermo, catalogando de igual manera a las variedades de maíz como sigue: amarillo – muy duro, blanco Celaya – muy duro, blanco Sinaloa – duro, azul – dureza intermedia y morado – suave. Además de ello, esta clasificación es similar a la que se encontró en la caracterización física del grano.

6.1.2 Color

En el Cuadro 12 se reportan los parámetros obtenidos de la determinación de color en las distintas variedades de maíz analizadas.

El color es un fenómeno de percepción humana de la luz reflejada en un objeto. Este fenómeno consiste en la apreciación que depende de cómo los ojos humanos detectan la luz reflejada en un objeto y como es que el cerebro la procesa. Este fenómeno se ve afectado por el mismo objeto, el área, fondo, superficie, luminosidad y temperatura del entorno en el que una medición de color se lleva a cabo.

En las variedades vegetales, incluyendo a los cereales, el color se percibe principalmente por los pigmentos que contienen, como pueden ser clorofilas, carotenoides y antocianinas, mismos que son responsables de la coloración verde, amarilla-roja y azul-violeta respectivamente. De esta manera, el color del grano de maíz es resultante del conjunto de las características físicas y los compuestos pigmentantes en el mismo.

Los parámetros de color permiten diferenciar entre las diferentes variedades de maíz (Cuadro 12). En términos de luminosidad, los maíces presentaron diferencias estadísticas, los maíces blancos (variedad Celaya y Sinaloa) junto con la variedad de maíz amarillo, no presentan diferencias estadísticas entre sí. A su vez, los maíces de variedad blanco Celaya, amarillo y morado no presentaron diferencias entre sí, aunque si las presentan frente a los otros maíces. A diferencia de ello, el maíz azul presenta diferencias estadísticas frente a todas las variedades de maíz.

La intensidad lumínica de un color o su grado de claridad se denomina luminosidad o valor L en el sistema CIELab. Este parámetro permite relacionar si un color posee más claridad u oscuridad cuando se lleva a cabo su análisis. Si un color tiende a aumentar en su valor de luminosidad, tiende más al color blanco y si, por lo contrario, su valor de luminosidad disminuye, tiende más hacia el color negro. El rango de valores de este parámetro es de 0 a 100 o 0 a 1 (Wrolstad & Smith, 2017).

Por ello, las diferencias en los maíces podrían deberse a que, aunque los maíces de variedades amarillo, blanco y morado presentan diferencias estadísticas, todos ellos tienden más a una tonalidad más brillante o con mayor luminosidad. En cambio, el maíz azul posee un valor de luminosidad mucho menor, que tiende hacia el color negro en la escala y se orienta más a una tonalidad oscura y con menor luminosidad.

En términos de los valores obtenidos de a^* (tonalidad rojiza) los maíces presentaron diferencias estadísticas. Los maíces de variedad amarillo y morado no presentan diferencias estadísticas entre sí. A su vez, los maíces de variedad blanco Celaya, blanco Sinaloa y azul, no presentaron diferencias entre sí, aunque

Cuadro 12. Parámetros de color de los granos de maíz analizado.

Variedad de maíz	L*	a*	b*	C*	Hue (°)
Blanco Celaya	64.65 ± 4.77 ^{a,b}	1.81 ± 1.00 ^b	18.84 ± 1.95 ^b	18.94 ± 2.02 ^b	84.69 ± 2.60 ^b
Blanco Sinaloa	69.87 ± 2.58 ^a	1.56 ± 0.77 ^b	18.91 ± 1.69 ^b	18.98 ± 1.75 ^b	85.39 ± 1.85 ^b
Amarillo	62.29 ± 1.96 ^{a,b}	12.80 ± 3.27 ^a	27.25 ± 4.21 ^a	30.34 ± 2.80 ^a	64.48 ± 8.81 ^b
Azul	36.27 ± 1.73 ^c	1.03 ± 0.96 ^b	1.35 ± 1.19 ^d	1.91 ± 1.09 ^c	311.80 ± 29.40 ^a
Morado	60.52 ± 2.38 ^b	13.28 ± 2.96 ^a	9.03 ± 0.22 ^c	16.12 ± 2.37 ^b	325.18 ± 6.15 ^a

Valor promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio, con la misma letra en la misma columna del mismo parámetro evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

si las presentan frente a los otros maíces. Las variedades de maíz amarillo y morado poseen valores más altos de a^* , comparados con las demás variedades de maíz que, siendo las variedades de maíz azul y maíces blancos, poseen valores de a^* mucho menores.

El parámetro a^* sitúa a las variedades de maíz amarillo y morado en mayor proporción hacia el eje del color rojo (siendo que poseen un valor de a^* positivo). De igual manera ocurre con las variedades de maíz restantes que, a pesar de tener diferencia estadística con los anteriores, recaen en el mismo eje positivo. Esto último es indicativo de que en el color que poseen, no predominan las tonalidades dentro del rango de verde/rojo.

Por otro lado, los valores obtenidos del parámetro b^* (tonalidad amarilla) en las variedades de maíz, presentan diferencias estadísticas. Los maíces de variedad blanco Celaya y blanco Sinaloa, no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a otras variedades de maíz. De igual manera, entre las variedades de maíz restantes (amarillo, azul y morado) se presentan diferencias estadísticas.

El parámetro b^* permite diferenciar la orientación del color de las variedades en función de la escala que va del azul (valores de b^* negativos) al amarillo (valores de b^* positivos). Ambas variedades de maíz blanco (Celaya y Sinaloa) poseen valores similares de este parámetro (18.84 y 18.91 respectivamente), lo cual los orienta hacia el color amarillo en mayor proporción ya que, el valor de a^* que poseen, no los orienta hacia el verde o el rojo, debido a su tonalidad de “blanco cremoso” como se menciona en la NMX-FF-034/1-SCFI-2020. Por otro lado, la variedad de maíz amarillo posee el valor más alto de b^* (27.25) comparado con las otras variedades. Esto se debe a que el color que posee, hace que se oriente hacia valores de b^* , aunque también hay contribución del parámetro a^* . pues llega a ser un “amarillo rojizo”.

En cuanto a las demás variedades que poseen valores más bajos de b^* , la variedad de maíz morado posee un valor de 9.03 y la variedad de maíz azul un valor de 1.35 para este parámetro. Para el maíz morado se puede inferir que, tras hallarse más orientado hacia el rojo en su valor de a^* , el valor de b^* termina de

complementar que su color recae en la zona morado-violeta, misma que predomina en su superficie. En cambio, para el maíz azul, se orienta en menor proporción hacia el amarillo tanto como lo hace hacia el rojo. Esto indica que pudiera encontrarse entre la región del violeta – azul, sin tener una saturación tan grande, debido a que el color en su superficie suele ser opaco y se encuentra en la región ya mencionada.

El parámetro C^* o saturación, describe la intensidad u opacidad de un color, indicando la cantidad de este en una superficie determinada. Este valor presenta una escala del 0 al 100 (o 0 a 1) en la cual, el valor mínimo representa una nula cantidad de color (por hallarse en el gris) y el valor máximo representa la mayor cantidad de color o el color más puro, según hayan indicado sus parámetros a^* y b^* (Wrolstad & Smith, 2017).

En el parámetro C^* (Croma), los maíces presentan diferencias estadísticas entre sí. Las variedades de maíz blanco Celaya, blanco Sinaloa y morado, no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las demás variedades.

Las diferencias de este parámetro entre las variedades de maíz pueden describirse como sigue: el maíz amarillo posee el valor más alto de C (30.34), mismo que indica que, a pesar de no tener una saturación demasiado fuerte, su color posee una intensidad mayor a la de las demás variedades. Siguiendo con el maíz blanco Celaya y el blanco Sinaloa, poseen valores de saturación de 18.94 y 18.98 respectivamente. Esto indica que el color “blanco cremoso” que se les atribuye, otorga un color opaco y de baja intensidad que predomina en ambos maíces, a pesar de ser de regiones distintas. En cuanto al maíz morado y azul, su valor de C^* es menor a las demás variedades (16.12 y 1.91 respectivamente). Esto se debe a la opacidad que predomina en la tonalidad de su superficie. Como ya se lograba inferir con los valores de los parámetros a^* y b^* , el maíz de variedad azul posee un grado bajo de saturación. Para la variedad de maíz morado, su saturación es baja y podría considerarse como opaco.

Por último, las variedades de maíz presentan diferencias estadísticas en términos del parámetro Hue.

El tono, tonalidad, matiz o parámetro conocido como Hue, representa los colores primarios (rojo, verde, azul) con todo aquel matiz intermedio que se pudiera percibir cuando el color obtenido se sitúa en el círculo de la escala cromática. Este parámetro permite describir la percepción de un objeto.

Los valores de tonalidad, refieren la posición en dicha escala, considerando valores en función de la ubicación en grados de (0 ° a 360 °) dentro del círculo cromático. Así, el color rojo primario está situado en 0 °, el color verde primario en 120 °, el color azul primario en 240 ° y al volver a 360 ° la escala se hallaría en el color rojo primario de nueva cuenta (Wrolstad & Smith, 2017).

Siendo así, las variedades de maíz amarillo, blanco Celaya y blanco Sinaloa no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque de igual manera las variedades de maíz azul y morado no presentan diferencias estadísticas entre sí. Esto delimita claramente las diferencias del parámetro Hue entre las variedades de maíz.

Los valores más bajos se encontraron en la variedad de maíz amarillo y en ambas variedades de maíz blanco, lo cual indica que el tono de estas variedades, poseen una tonalidad hacia el color amarillo, situándose a 84.69 ° y 85.39 ° en el círculo cromático (Figura 13).

En cambio, el maíz amarillo presentó una tonalidad entre amarillo y ligeramente rojo, como ya se observaba mediante los parámetros a^* y b^* , situándose a 64.48 ° en el círculo cromático. Para la variedad de maíz azul y morado, se obtienen valores más altos del ángulo Hue, mismos que sitúan sus tonalidades por encima de la tonalidad del azul primario.

El valor obtenido por la variedad de maíz azul se encontró en la región azul – violeta, a 311.80 ° en el círculo cromático. Por último, para la variedad de maíz morado, su tonalidad se situó a 325.18 °, dando una tonalidad entre morado y magenta.

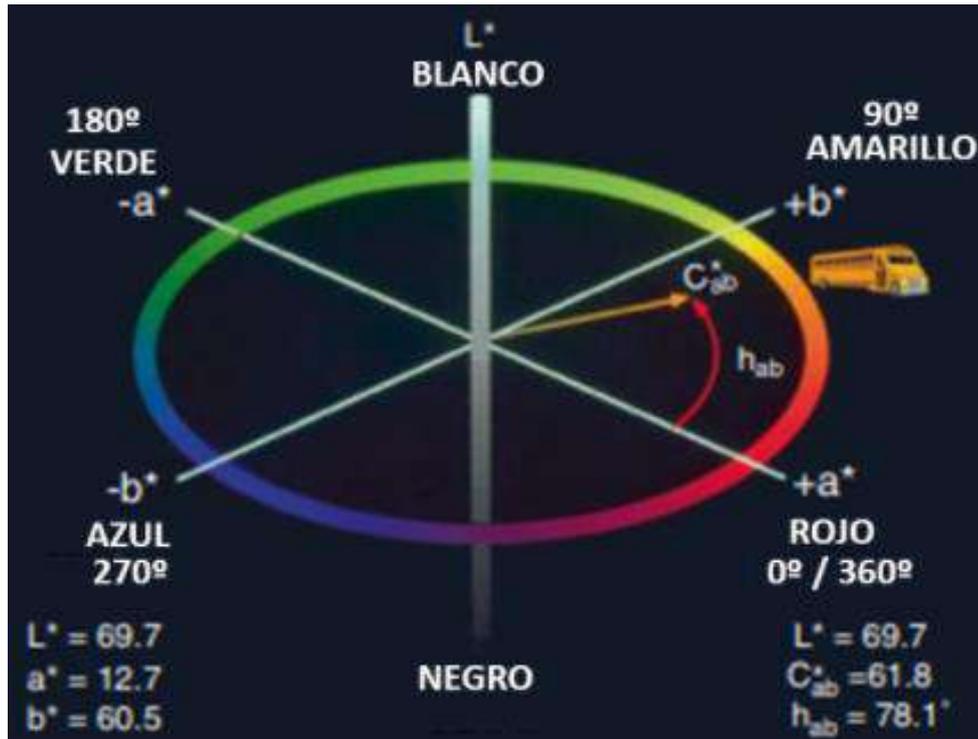


Figura 13. Espacio de color CIE $L^* a^* b^*$ y $L^* C^* h^\circ$ (tomado de Wrolstad & Smith, 2017).

6.2 Caracterización fisicoquímica del grano de maíz.

En el Cuadro 13, se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de las variedades de maíz analizadas.

El pH en el grano de maíz, es una escala de medición que refiere al nivel de acidez o alcalinidad del mismo. En el caso de los maíces utilizados para la producción de tortillas, el pH puede variar en función de su composición química, contenido de humedad y la variedad de maíz como tal. Por lo general, el pH de los maíces utilizados en la elaboración de tortillas se encuentra en un rango de 5.5 a 7.5 (Brooker, 2015). Todos los maíces utilizados en esta investigación se encuentran dentro de este rango.

Cuadro 13. Caracterización fisicoquímica del grano de maíz.

Variedad de maíz	pH	Humedad (%)	Proteína (%)	Extracto etéreo (%)	Cenizas (%)	Fibra cruda (%)	Carbohidratos (%)
Blanco Celaya	6.48±0.04 ^b	11.91±0.16 ^{a,b}	8.04±0.09 ^b	5.03±0.07 ^a	1.14±0.14 ^b	1.62±0.05 ^{b,c}	72.15±0.11 ^c
Blanco Sinaloa	6.64±0.01 ^a	12.50±0.09 ^a	7.04±0.06 ^d	4.26±0.20 ^b	1.04±0.05 ^b	1.50±0.10 ^c	73.66±0.03 ^b
Amarillo	6.25±0.00 ^d	11.28±0.16 ^b	6.98±0.04 ^d	3.00±0.06 ^c	1.25±0.03 ^b	1.43±0.06 ^c	76.07±0.22 ^a
Azul	6.50±0.01 ^b	11.36±0.44 ^b	7.72±0.04 ^c	4.72±0.03 ^a	1.88±0.10 ^a	1.89±0.10 ^a	72.17±0.37 ^c
Morado	6.36±0.03 ^c	11.44±0.58 ^b	9.08±0.04 ^a	4.80±0.00 ^a	1.23±0.12 ^b	1.76±0.00 ^{a,b}	71.32±0.02 ^d

Valor promedio de 3 repeticiones \pm desviación estándar. Valores promedio, con la misma letra en la misma columna de la propiedad fisicoquímica evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$). El porcentaje de carbohidratos se determinó por diferencia matemática al restar los demás componentes al 100 %.

En cuanto a los valores de pH obtenidos, las variedades de maíz presentan algunas diferencias estadísticas entre sí. Las variedades de maíz azul y blanco Celaya no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las demás variedades de maíz (amarillo, blanco Sinaloa y Morado) mismas que no presentan similitud estadística entre sí.

Para la humedad, las variedades de maíz blanco Celaya y Sinaloa, no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque el maíz blanco Celaya es similar a todas las demás variedades que no presentan diferencia estadística significativa.

El contenido de humedad en el grano es importante debido a que, de este depende la vida útil del grano y su utilización en procesos de nixtamalización. Según Györi (2017), la humedad en el grano representa el contenido de agua libre disponible para procesos vitales (germinación) y cualidades higroscópicas del grano, como es la absorción de agua. Estos fenómenos dan paso a posibles reacciones de deterioro, principalmente por el desarrollo de microorganismos que pueden dañar la integridad del grano de maíz. Por ello, la humedad del grano debe hallarse por debajo del nivel crítico para este cereal, que es de 14 % - 15 %. De igual forma, la NOM-247-SSA1-2008, establece un límite máximo de humedad de 15%, mismo que, de ser superado, podría conducir a fenómenos de deterioro con gran facilidad en el grano de maíz.

A pesar de las diferencias estadísticas entre variedades de maíz analizadas, los valores de humedad son óptimos para la utilización de los mismos en productos de nixtamalización.

La relación de humedad con las propiedades físicas del grano, específicamente la dureza, es tal que la dureza del grano es proporcional al contenido de humedad. Aunque entre variedades de maíz pudieran aparentar similitud estadística en cuanto al contenido de humedad, los granos de mayor dureza tienden a tener contenidos de humedad más altos y a su vez, poseen la capacidad de absorber humedad con mayor facilidad. Esto se debe a que los granos son más compactos y con menor contenido de aire en el endospermo, cualidad que permite a los granos más suaves, adquirir humedad de manera más rápida, pero en menor proporción. El contenido de humedad en maíces utilizados para la elaboración de

harinas instantáneas guarda relación con su dureza y a su vez, con las proporciones de sus componentes anatómicos, en las que predomina el contenido de endospermo vítreo. Esto, a modo que mayores contenidos de humedad y maíces con menor proporción de pericarpio suelen presentar durezas un tanto menores (Gyóri, 2017).

El contenido de proteína en cereales como el maíz, difiere por la proporción de endospermo que posee el grano, en el cual predomina el contenido de prolaminas, específicamente la zeína. A su vez, el contenido de proteína se ve afectado por la presencia de otros grupos proteicos como albúminas y globulinas, aunque en menor proporción. Esto conlleva a un porcentaje de proteína de entre 7 % y 10% en peso seco para cualquier grano de maíz, tomando en cuenta que el endospermo posee entre 69 % y 78.9 % del contenido de proteína total, alojando el remanente en el germen (hasta 26 %) y pericarpio (hasta 2.5 %) (Gyóri, 2017).

En cuanto al contenido de proteína, los maíces presentan diferencias estadísticas en las variedades azul, blanco Celaya y morado. Las variedades de maíz amarillo y blanco Sinaloa no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las demás variedades.

El porcentaje de proteína en las variedades de maíz analizadas difiere en las proporciones de los principales componentes anatómicos (endospermo, germen y pericarpio), como se menciona en el Cuadro 14.

Las variedades de maíz blanco Celaya y morado, poseen un contenido de proteínas mayor que las demás variedades (Cuadro 13) y a su vez, poseen las proporciones más altas de endospermo.

En cuanto al extracto etéreo, se presentan diferencias estadísticas entre las variedades blanco Sinaloa y amarillo. Las variedades de maíz azul, blanco Celaya y morado no presentan diferencias estadísticas, aunque si lo hacen frente a las demás variedades.

Cuadro 14. Proporción de componentes anatómicos en las variedades de maíz analizadas.

Variedad de maíz	Componente anatómico			Referencia
	Germen (%)	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	
Blanco Celaya	8.19	6.21	85.60	Martínez-Reyna, 2023.
Blanco Sinaloa	8.58	4.46	82.03	Jiménez-Nevárez <i>et al.</i> , 2018.
Amarillo	10.19	5.77	84.04	Martínez-Reyna, 2023.
Azul	12.40	5.33	82.27	Salinas-Moreno <i>et al.</i> , 2013.
Morado	12.31	4.64	83.05	Salinas-Moreno <i>et al.</i> , 2013.

El contenido de lípidos en el grano de maíz, se encuentra principalmente en el germen, con menores proporciones en el endospermo y el pericarpio. Como se describió anteriormente, las proporciones de cada componente anatómico en el maíz, pudieran dar paso a posibles variaciones en el contenido de grasa entre las variedades de maíz analizadas (Győri, 2017).

La fracción lipídica en el maíz, es rica en ácidos grasos insaturados como ácido linoleico (C18:2), ácido oleico (C18:1) y ácido esteárico (C18:0), mismos que representan aproximadamente un 20 % - 22 % del total de grasa cruda en el maíz, que a su vez representa de 20 % a 25 % del peso seco total (Győri, 2017).

El contenido de lípidos también es importante debido a que la variedad fúngica estudiada (*Aspergillus flavus*) suele proliferar eficientemente en sustratos altos en carbohidratos y lípidos, como lo es el maíz (Sandoval-Flores, 2016).

Para el contenido de cenizas, el maíz azul y morado no presentan diferencias estadísticas entre sí, aunque si lo hacen frente a las otras variedades de maíz que son amarillo, blanco Celaya y Sinaloa.

Los granos de maíz suelen contener entre 1.5 % y 3 % de cenizas en peso seco. La cantidad de cenizas, al igual que otros componentes, depende de las condiciones en las que el maíz ha sido cultivado (Sandoval-Flores, 2016). Para el caso del maíz, contiene componentes de ceniza esenciales para el desarrollo de este, como son fósforo, potasio, silicio, sodio, calcio, magnesio y azufre. Estos componentes se encuentran en el pericarpio y el germen. De igual manera, el contenido de cenizas puede variar entre maíces, debido a la proporción de componentes anatómicos que posea. Esto es relevante debido a que el hongo (*Aspergillus flavus*), crece favorablemente en sustratos ricos en fósforo y potasio. Estos minerales son esenciales para el desarrollo del hongo, debido a que el fosforo es necesario para la síntesis de ácidos nucleicos y otros componentes celulares, tanto como el potasio es esencial para regular el equilibrio osmótico y mantener la integridad celular (Győri, 2017).

Para el caso del contenido de fibra cruda, el maíz azul y morado presentan contenidos de fibra cruda que son estadísticamente similares, tanto como las variedades blanco Celaya y morado y a su vez las variedades amarillo, blanco Celaya y Sinaloa.

En cereales como el maíz, el contenido de fibra oscila entre 1 % y 3 % e involucra la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que brindan protección y actúan como componentes de reserva mientras el grano aún se encuentra en germinación (Győri, 2017). El contenido de fibra es importante para la industria de la nixtamalización, debido a que estos componentes se mantienen especialmente en el pericarpio del maíz. La dureza del maíz también puede expresarse en función del contenido de fibra y la proporción de pericarpio en el grano ya que, es necesario retirar el pericarpio y aprovechar el peso seco restante para la nixtamalización (Győri, 2017).

En cuanto al contenido de carbohidratos, las variedades azul y blanco Celaya no presentan diferencias estadísticas, aunque sí lo hacen frente a las demás variedades que al mismo tiempo no presentan similitud estadística.

En los cereales, el contenido de carbohidratos es relevante debido a que estos, se encuentran principalmente en forma de almidón y azúcares. Los azúcares

libres suelen encontrarse en una proporción aproximada de 1 % a 3 %, especialmente en el endospermo del grano, así como la proporción de polisacáridos no celulósicos como es el almidón, en aproximadamente un 70 % - 75 %. Esto, constituye el porcentaje total en peso seco de carbohidratos no celulósicos (apartados de la fibra cruda) en el grano, en una proporción de 70 % hasta 80 % del peso seco total del grano (Győri, 2017).

Generalmente, el contenido de carbohidratos es importante en términos de fibra cruda, como ya se mencionó anteriormente y a su vez, en el contenido de azúcares y almidón ya que, tanto como puede aprovecharse la proporción de almidón durante la nixtamalización. Esto, a pesar de que no se encuentren completamente disponibles por la solubilidad que presentan en el medio durante la nixtamalización (Sandoval-Flores, 2016).

6.3 Caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

La eficiencia del calentamiento óhmico durante el proceso de nixtamalización se evalúa por medio de las propiedades eléctricas del producto procesado. La caracterización eléctrica de una harina instantánea nixtamalizada con calentamiento óhmico, permite comprender y evaluar el comportamiento y los cambios que ocurren dentro del tratamiento (Ruíz-Gutiérrez *et al.*, 2011).

De igual manera, dicha caracterización permite evaluar la eficiencia del calentamiento óhmico que se ve influenciada principalmente por las concentraciones de cal utilizadas en los tratamientos aplicados. El proceso de nixtamalización para la producción de tortillas de maíz induce cambios fisicoquímicos tales como cambios en la textura, en el comportamiento térmico y en la composición química (Ruíz-Gutiérrez *et al.*, 2011).

La caracterización eléctrica está dada por la determinación de las propiedades eléctricas como fue intensidad de campo eléctrico (EFS), tasa o velocidad de calentamiento (HR), potencia, resistencia y conductividad eléctrica (Cuadro 15).

La intensidad de campo eléctrico (EFS), se refiere a la fuerza experimentada por unidad de carga positiva colocada en un campo eléctrico. Es una medida de la intensidad del campo eléctrico en un punto específico y normalmente se cuantifica

en volts por metro (V/m) o volts por centímetro (V/cm) (Suo *et al.*, 2021). En materia de productos alimentarios, EFS determina la intensidad de campo eléctrico dentro del material que se procesa, lo cual afecta algunos factores como distribución de temperatura, eficiencia de transferencia de calor y eficiencia en la conservación por inactivación de ciertos microorganismos (Suo *et al.*, 2021). El valor de la intensidad del campo eléctrico (EFS por sus siglas en inglés: "Electric Field Strength") afecta significativamente la calidad de las tortillas y la eficiencia del calentamiento óhmico al influir en la uniformidad del calentamiento y los resultados generales del procesamiento. Según Gaytán-Martínez (2011), el voltaje aplicado a un tratamiento de calentamiento óhmico medido en 120 V, permite la correcta obtención de una harina instantánea nixtamalizada con calentamiento óhmico, hecho que permite un calentamiento uniforme y transferencia de calor favorable durante el proceso.

Como se puede observar en el Cuadro 15, las harinas obtenidas de todas las variedades de maíz poseen la misma intensidad de campo eléctrico (40 V/cm) debido a que todos los tratamientos se llevaron a cabo en la misma celda de calentamiento óhmico a un mismo voltaje aplicado (120 V).

Con ello, se puede inferir que el valor de EFS en los procesos de nixtamalización con calentamiento óhmico es un parámetro crítico que influye directamente en la calidad de la tortilla al afectar la uniformidad del calentamiento, las características texturales y la eficiencia general del procesamiento mientras se aplique un voltaje específico.

Para la velocidad de calentamiento, las distintas variedades de maíz presentan diferencias significativas. Las variedades de maíz blanco Sinaloa y morado presentan velocidades de calentamiento más altas en ambos tratamientos con concentraciones diferentes de cal (0.1 % y 0.3 %). A su vez, las variedades de maíz amarillo, azul y blanco Celaya, presentan velocidades de calentamiento estadísticamente similares al ser más bajas que las variedades anteriormente descritas.

Cuadro 15. Propiedades eléctricas de las distintas variedades de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico a diferentes concentraciones de cal.

Concentración de cal (%)	Variedad de maíz	Propiedad eléctrica				
		EFS (V/cm)	HR (°C/min)	Potencia (W)	Resistencia (Ohm)	Conductividad eléctrica (mS/m)
0.1	Blanco Celaya	40.00±0.00 ^a	59.30±5.56 ^c	49.14±1.44 ^c	293.04±8.59 ^a	270.00±10.00 ^c
0.1	Blanco Sinaloa	40.00±0.00 ^a	91.50±2.19 ^{b,c}	54.74±0.17 ^{a,b,c}	263.09±0.79 ^{a, b, c}	300.00±10.00 ^{a,b,c}
0.1	Amarillo	40.00±0.00 ^a	54.50±2.33 ^c	39.96±4.64 ^{a,b,c}	360.40±32.09 ^{a,b,c}	220.00±20.00 ^{a,b,c}
0.1	Azul	40.00±0.00 ^a	74.50±5.09 ^{a,b,c}	49.89±2.75 ^{a,b}	288.66±15.96 ^c	270.00±10.00 ^{a,b}
0.1	Morado	40.00±0.00 ^a	116.80±19.70 ^a	55.09±8.03 ^a	261.40±24.51 ^c	300.00±40.00 ^a

Valor promedio de 2 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio con la misma letra en la misma columna de la propiedad evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

EFS: Intensidad de campo eléctrico. HR: Velocidad de calentamiento.

Cuadro 15. Continuación

Concentración de cal (%)	Variedad de maíz	Propiedad eléctrica				
		EFS (V/cm)	HR (°C/min)	Potencia (W)	Resistencia (Ohm)	Conductividad eléctrica (mS/m)
0.3	Blanco Celaya	40.00±0.00 ^a	70.50±3.26 ^{a,b}	45.33±0.67 ^{b,c}	317.66±4.71 ^{a,b}	250.00±10.00 ^{b,c}
0.3	Blanco Sinaloa	40.00±0.00 ^a	80.00±5.88 ^{a,b,c}	52.91±0.56 ^{a,b,c}	272.17±2.89 ^{a,b,c}	290.00±10.00 ^{a,b,c}
0.3	Amarillo	40.00±0.00 ^a	68.80±6.39 ^{b,c}	40.76±3.27 ^{a,b,c}	353.31±28.45 ^{a,b,c}	220.00±10.00 ^{a,b,c}
0.3	Azul	40.00±0.00 ^a	84.40±7.48 ^{a,b,c}	49.02±1.49 ^{a,b,c}	293.78±8.96 ^{b,c}	270.00±10.00 ^{a,b,c}
0.3	Morado	40.00±0.00 ^a	104.80±4.32 ^{a,b}	52.89±4.28 ^{a,b,c}	272.26±22.12 ^{b,c}	290.00±20.00 ^{a,b,c}

Valor promedio de 2 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio con la misma letra en la misma columna de la propiedad evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

EFS: Intensidad de campo eléctrico. HR: Velocidad de calentamiento.

A pesar de ello, la variedad de maíz azul y blanco Celaya en ambos tratamientos con distinta concentración de cal, muestran similitud con las variedades de maíz que presentan velocidades de calentamiento más altas ya que, aunque sus velocidades de calentamiento no se muestren tan alta como las ya descritas, logran rebasar aquellas presentes en la variedad de maíz amarillo en ambos tratamientos. Esto se puede apreciar en la Figura 14, donde la velocidad de calentamiento está completamente determinada por el tiempo que tarda la cocción de las harinas hasta alcanzar la temperatura máxima de cocción (90 °C) a un voltaje constante (120 V).

La tasa o velocidad de calentamiento (HR por sus siglas en inglés: "Heating rate") se refiere a la velocidad a la que la temperatura de un material aumenta con el tiempo durante un proceso de calentamiento (Choi *et al.*, 2010). Flores-García *et al.* (2024), caracterizaron un almidón de maíz nativo con un contenido de 27 % de amilosa, sometido a calentamiento óhmico, obteniendo como propiedades eléctricas: intensidad de campo eléctrico (EFS), velocidad de calentamiento (HR), intensidad de corriente, potencia y conductividad eléctrica. Al aplicar una intensidad de campo eléctrico de 50 V/cm se obtuvieron como parámetros eléctricos; velocidad de calentamiento de 42.20 °C/min; intensidad de corriente de 0.65 A; potencia de 65.20 W y conductividad eléctrica de 1.5 S/m.

En la presente investigación se obtuvieron propiedades eléctricas similares a aquellas obtenidas por Flores-García *et al.*, (2024). Dicha similitud se aprecia mayormente en términos de potencia y velocidad de calentamiento, aunque no se presenta del todo en la conductividad eléctrica y velocidad de calentamiento, siendo estas propiedades mucho menores. Esto se debe a que, aunque de igual manera se utiliza maíz, el almidón por si solo es buen conductor de electricidad, pero la harina de maíz presenta mejores propiedades de conductividad, especialmente en presencia de altas concentraciones de cal. El almidón posee una mayor concentración de grupos carbonilo y carboxilo, lo cual le atribuye una buena conductividad eléctrica. La harina de maíz, al ser un producto más integral, conserva componentes como proteínas, lípidos y fibras que le atribuyen mejor conductividad (Pellegrini & Agostoni, 2015). La presencia de complejos amilosa-calcio y amilosa-lípido que se forman durante la nixtamalización, favorecen las

propiedades eléctricas, otorgando una mayor conductividad eléctrica y velocidad de calentamiento (Rojas-Molina *et al.*, 2020). Siendo así, la eficiencia del calentamiento óhmico aumenta respecto a la presencia de cal durante la nixtamalización con calentamiento óhmico, utilizando harinas de distintas variedades de maíz.

En el campo del calentamiento óhmico y productos alimentarios, la velocidad de calentamiento es un parámetro crítico que influye directamente en la eficiencia del proceso de calentamiento y la calidad del producto obtenido en función de los requerimientos iniciales, que en este caso es la destoxificación del maíz. La velocidad de calentamiento durante el calentamiento óhmico depende de factores como la conductividad eléctrica del material, el gradiente de voltaje aplicado y el tiempo de calentamiento (Choi *et al.*, 2010). Siendo así, la variación en la velocidad de calentamiento de cada variedad de maíz, se ve influenciada por la conductividad eléctrica del mismo, lo cual se define por el contenido de cal de cada tratamiento y posibles influencias del contenido de humedad inicial del grano de maíz. Este parámetro fisicoquímico permite una mayor conductividad eléctrica (Choi *et al.*, 2010) por lo que, todos los tratamientos se llevaron a cabo con el mismo contenido de agua. La tasa de calentamiento (HR) impacta directamente en la velocidad y eficiencia de la generación de calor, lo que a su vez influye en la calidad y características del producto final.

La velocidad de calentamiento durante el calentamiento óhmico está influenciada por la conductividad eléctrica del material que se calienta. Esto se debe a que, una mayor conductividad eléctrica puede conducir a una velocidad de calentamiento más rápida, ya que el material ofrece menos resistencia al flujo de corriente eléctrica, lo que resulta en una mayor generación de calor (Varghese *et al.*, 2012). Además, el gradiente de voltaje aplicado durante el calentamiento óhmico juega un papel importante en la determinación de la velocidad de calentamiento, y los gradientes de voltaje más altos generalmente conducen a velocidades de calentamiento más rápidas y, por ende, a tratamientos más eficientes en términos de tiempo de tratamiento (Choi *et al.*, 2010).

De acuerdo con la velocidad de calentamiento obtenida, las variedades de maíz presentan diferencias significativas en la conductividad eléctrica. Las variedades

de maíz azul, blanco Sinaloa y morado tratadas con ambas concentraciones de cal, no presentan diferencias estadísticas considerables, aunque si lo hacen frente a las variedades amarillo y blanco Celaya, mismas que poseen los valores de conductividad eléctrica más bajos en los tratamientos con ambas concentraciones de cal.

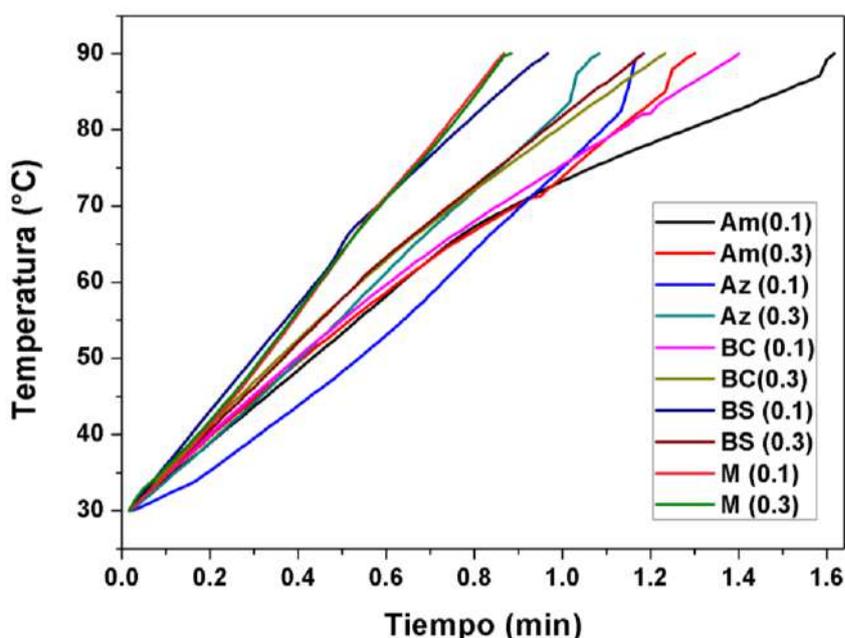


Figura 14. Velocidad de calentamiento para las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica. Normalmente se expresa en Siemens por metro (S/m) o miliSiemens por metro (mS/m) e indica qué tan bien un puede conducir la electricidad un material específico; valores más altos corresponden a una mejor conductividad (Varghese *et al.*, 2012). El valor de la conductividad eléctrica impacta significativamente la calidad de las tortillas y la eficiencia del calentamiento óhmico, lo cual es importante para optimizar el proceso de calentamiento. Los valores de conductividad eléctrica más altos generalmente dan como resultado un calentamiento más rápido y uniforme, lo que en última instancia afecta la calidad y las características del producto final (Varghese *et al.*, 2012). Los valores de conductividad eléctrica más altos en la harina de maíz nixtamalizado conducen a una mayor generación de calor y velocidades de

calentamiento más rápidas durante el calentamiento óhmico (Moraveji *et al.*, 2010). Ya se mencionaba que el calentamiento logra ser uniforme gracias al voltaje aplicado, aunque la velocidad de calentamiento garantiza este calentamiento uniforme de manera proporcional en función del tiempo y, por otro lado, la conductividad eléctrica garantiza este calentamiento uniforme de manera proporcional en función de las propiedades de la variedad de maíz utilizado, contenido de humedad y concentración de cal en el tratamiento. Esto quiere decir que, ante valores más altos de velocidad de calentamiento, menor será el tiempo del mismo y valores más altos de conductividad eléctrica, debido a la presencia de cal en el tratamiento y al contenido de humedad tanto en el maíz como en el cocimiento, por ello, cualquier aumento en alguna de las variables, aumenta aquella que depende de la misma y viceversa. Ambos parámetros afectan la velocidad de calentamiento, la distribución del calor y el rendimiento general del proceso de calentamiento óhmico.

Por lo tanto, una mayor conductividad eléctrica en la harina de maíz nixtamalizada resultaría en una velocidad de calentamiento más rápida durante el calentamiento óhmico, lo que conduciría a una distribución del calor más rápida y uniforme dentro del material. Esta relación es seguida por las variedades de maíz presentes ya que, como se observa en el Cuadro 15, las variedades de maíz con mayores velocidades de calentamiento presentan una conductividad más alta mientras con la concentración más alta de cal. La concentración de cal contribuye en gran medida a la conductividad junto con los demás factores mencionados debido a que cualquier aumento en la concentración de cal aumenta la conductividad eléctrica del producto, lo que resultaría en una tasa de calentamiento más rápida durante el proceso de calentamiento óhmico.

A esto se deben las variaciones en la velocidad de calentamiento en la Figura 14. Según Moraveji *et al.* (2010) una mayor velocidad de calentamiento puede contribuir a mejorar la eficiencia del procesamiento y reducir los tiempos de procesamiento, lo que en última instancia afecta la calidad y las características de las tortillas producidas. Además, los componentes nutricionales y estructurales del maíz, como el contenido de almidón, la composición proteica y los niveles de humedad, pueden influir en la conductividad eléctrica de la harina de maíz

nixtamalizada. Las variaciones en estos componentes pueden alterar las propiedades eléctricas del material, afectando su conductividad y, en consecuencia, la velocidad de calentamiento durante el calentamiento óhmico.

Por último, dentro de las propiedades de potencia y resistencia, las variedades de maíz presentan diferencias estadísticamente significativas. En términos de la potencia, las variedades de maíz presentan mayores valores en los tratamientos con concentración de cal al 0.3 %.

Las variedades de maíz no comparten similitud del todo, solo entre tratamientos se puede inferir que aquellas con mayor potencia pertenecen a los tratamientos de mayor concentración de cal y viceversa. Las variedades de maíz que presentan similitud son las de mayores valores de potencia, mismas que son la variedad de maíz blanco Sinaloa y morado en ambos tratamientos. Las variedades restantes comparten similitud por tener valores de potencia más bajos.

Las variedades de maíz presentan diferencias estadísticas menores en términos de resistencia. La variedad de maíz amarillo, en los tratamientos de 0.1 % y 0.3 % de cal, posee el valor de resistencia más alto, hecho que le hace presentar diferencias de todas las variedades y similitud con algunas variedades de maíz que poseen valores más bajos de resistencia. Dentro de este último grupo destacan la variedad de maíz azul y blanco Celaya, seguidos por las variedades de maíz blanco Sinaloa y morado.

La potencia, medida en vatios (W), es una magnitud que indica la cantidad de energía que se transfiere o se consume por unidad de tiempo, representando la cantidad de energía eléctrica que se consume o se produce en un circuito eléctrico. En cambio, la resistencia eléctrica se mide en ohmios (Ω) y representa la oposición que un material ofrece al paso de la corriente eléctrica (Varghese *et al.*, 2012).

Dentro del campo del calentamiento óhmico y productos alimentarios, el valor de resistencia en ohmios (Ω) y la potencia en vatios (W) son dos parámetros críticos que afectan directamente la calidad de las tortillas y la eficiencia del calentamiento óhmico. La resistencia eléctrica juega un papel fundamental en la generación de calor y la distribución uniforme de la energía eléctrica a través del material,

garantizando una transferencia eficiente de energía, lo que influye en la calidad y consistencia del calentamiento de la harina de maíz y, por ende, en la calidad de las tortillas producidas (Moraveji *et al.*, 2010).

Por otro lado, la potencia eléctrica es un indicador directo de la cantidad de energía eléctrica consumida durante el proceso de calentamiento óhmico. Por ello, valores más altos de potencia y menores valores de resistencia en las variedades de maíz analizadas, son indicador de procesos más eficientes (Moraveji *et al.*, 2010).

Si para el caso presente, cualquier variedad de maíz presentara una mayor resistencia, significaría una menor conductividad, menor potencia y velocidad de calentamiento (Figura 15, 16 y 17), lo cual, a pesar de obtener la harina nixtamalizada, no lo haría de la misma manera que aquellas variedades que poseen la relación inversa de dichas propiedades. Esto, tomando en cuenta la concentración de cal en los tratamientos ya que, a mayores concentraciones de cal, el proceso se ve mayormente favorecido.

Por lo tanto, dentro de la caracterización eléctrica de las harinas nixtamalizadas, a medida que aumenta la conductividad eléctrica; influenciada por factores fisicoquímicos de la variedad de maíz utilizada, concentración de cal y contenido de humedad; aumenta la velocidad de calentamiento y junto con ella, la potencia, símbolo de que la resistencia otorgada por la harina es menor. Esto, permite eficientar el proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico en gran medida, como pudo apreciarse para las variedades de maíz azul, blanco Sinaloa y morado, especialmente en tratamientos con la concentración más alta de cal (0.3 %). Cualquier relación de dichas propiedades a manera inversa, no entorpece el proceso de nixtamalización, pero si lo vuelve un proceso más lento, tal como pudo apreciarse en las variedades de maíz amarillo y blanco Celaya. De igual manera, la concentración de cal en su nivel menor (0.1 %), propicia la misma cualidad de las últimas variedades mencionadas y a medida que crece la concentración de cal, el proceso de nixtamalización se vuelve más eficiente, especialmente con variedades de maíz que poseen mejores propiedades eléctricas.

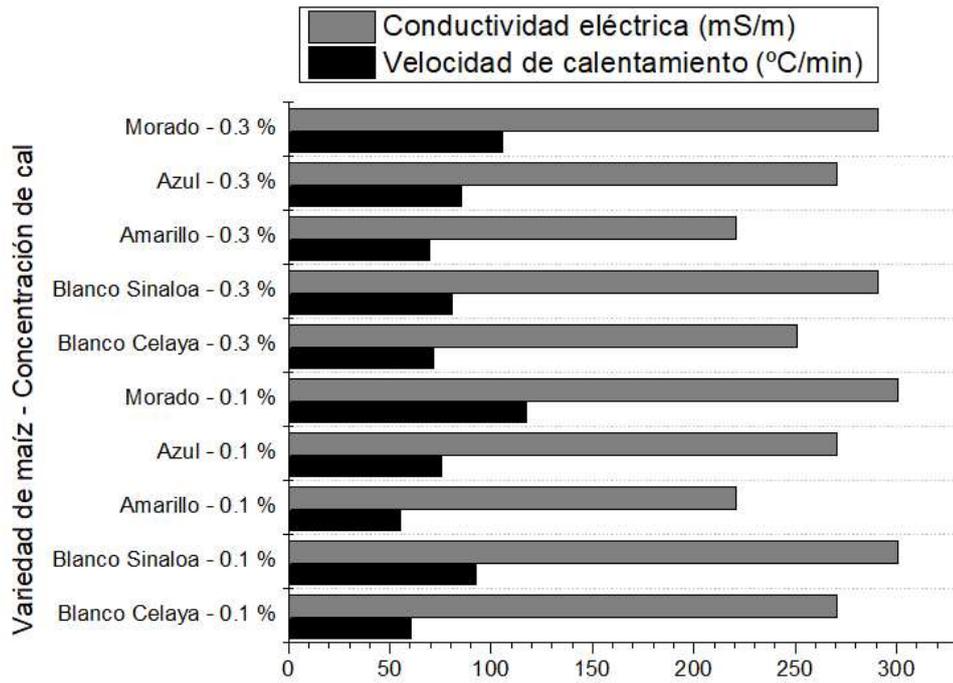


Figura 15. Comparación de conductividad eléctrica y velocidad de calentamiento en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

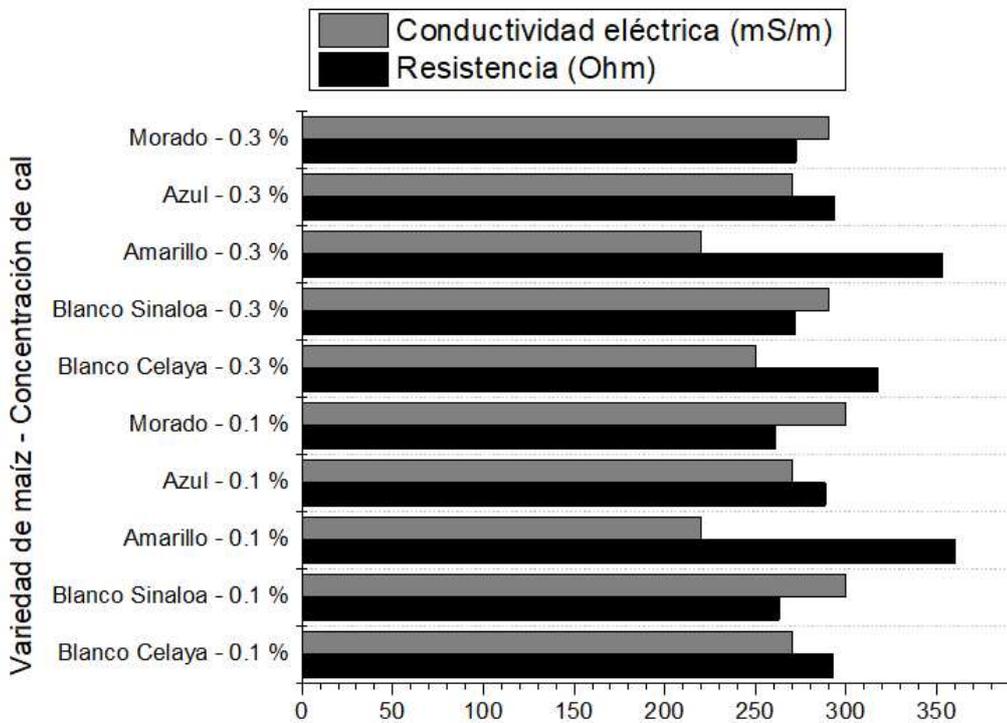


Figura 16. Comparación de conductividad eléctrica y resistencia en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico

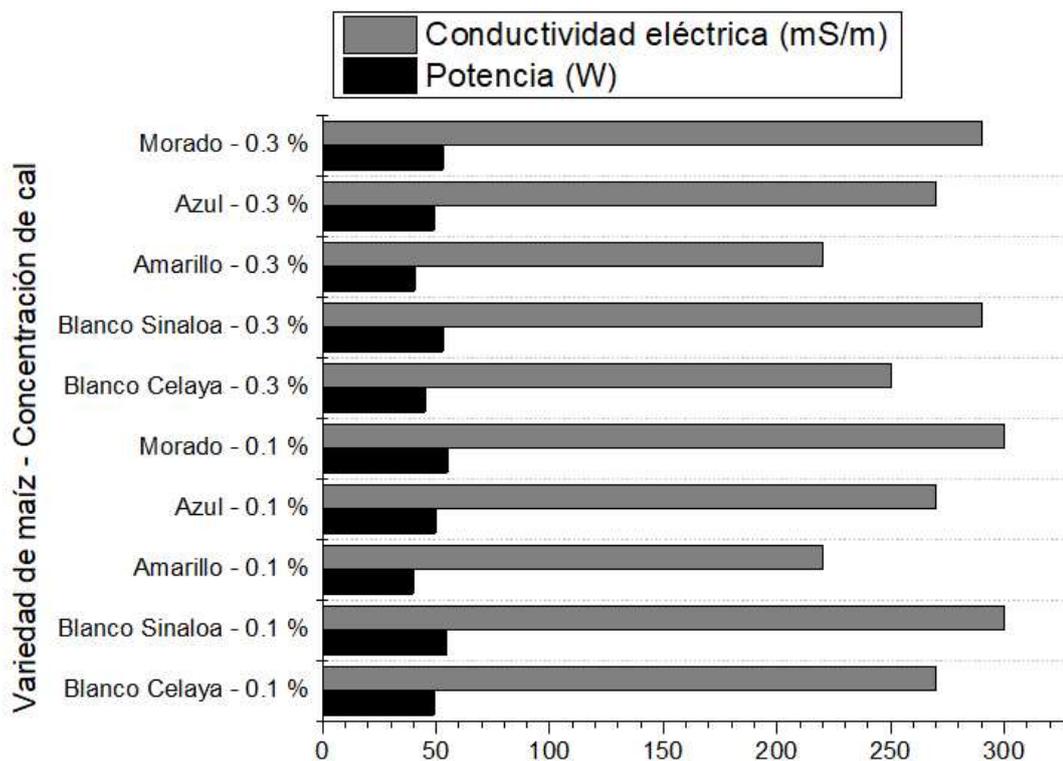


Figura 17. Comparación de conductividad eléctrica y potencia en las diferentes variedades de maíz nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

6.4 Caracterización fisicoquímica de tortillas de maíz.

En el cuadro 16 se muestran las propiedades fisicoquímicas de las tortillas obtenidas por nixtamalización con calentamiento óhmico. Las tortillas obtenidas del proceso de nixtamalización con calentamiento óhmico presentan diferencias significativas en los parámetros de pH y humedad.

Iniciando con el pH, los tratamientos logran afectar significativamente este parámetro, principalmente en función de la concentración de cal utilizada. Las distintas variedades de maíz, presentan diferencias significativas tras la variación en la concentración de cal en los tratamientos de nixtamalización, mostrando un comportamiento proporcional. Esto significa que, al aumentar el contenido de cal en el tratamiento, independientemente de la concentración inicial de aflatoxinas que posee, el pH aumenta conforme aumenta la concentración de cal. Esto se debe a que, al utilizarse cal (nixtocal) o hidróxido de calcio, el pH aumenta por la alcalinidad de este componente.

Cuadro 16. Caracterización fisicoquímica de las tortillas nixtamalizadas con calentamiento óhmico.

Propiedad	Variedad de maíz	Nivel 1 (ng/g)		Nivel 2 (ng/g)	
		Concentración de cal (%)			
		0.1	0.3	0.1	0.3
	Blanco Celaya	38.75 ± 0.61 ^{a, A}	38.64 ± 0.13 ^{b, A}	39.12 ± 0.16 ^{b, A}	38.83 ± 0.32 ^{b, A}
	Blanco Sinaloa	38.78 ± 1.39 ^{a, B}	40.46 ± 0.16 ^{a, A, B}	40.36 ± 0.12 ^{a, A, B}	41.16 ± 0.32 ^{a, A}
Humedad	Amarillo	37.52 ± 0.45 ^{a, b, A}	37.73 ± 0.18 ^{c, A}	38.24 ± 0.32 ^{c, A}	38.20 ± 0.23 ^{b, A}
	Azul	36.28 ± 0.55 ^{b, c, A}	37.05 ± 0.23 ^{d, A}	36.70 ± 0.13 ^{d, A}	37.08 ± 0.05 ^{c, A}
	Morado	34.40 ± 0.66 ^{c, A}	34.86 ± 0.18 ^{e, A}	34.08 ± 0.21 ^{e, A}	34.80 ± 0.26 ^{d, A}

Valor promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio con la misma letra minúscula en la misma columna del tratamiento evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$). Valores promedio con la misma letra mayúscula en la misma fila de la propiedad evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$).

Cuadro 16. Continuación.

Propiedad	Variedad de maíz	Nivel 1 (ng/g)		Nivel 2 (ng/g)	
		Concentración de cal (%)			
		0.1	0.3	0.1	0.3
pH	Blanco Celaya	6.51 ± 0.01 ^{b, C}	7.18 ± 0.02 ^{a, A}	6.49 ± 0.01 ^{c, C}	7.12 ± 0.02 ^{a, B}
	Blanco Sinaloa	6.55 ± 0.02 ^{b, B}	7.03 ± 0.04 ^{b, A}	6.53 ± 0.01 ^{b, c, B}	6.99 ± 0.02 ^{b, A}
	Amarillo	6.60 ± 0.03 ^{a, b, B}	7.05 ± 0.03 ^{b, A}	6.55 ± 0.03 ^{b, B}	6.99 ± 0.02 ^{b, A}
	Azul	6.41 ± 0.17 ^{b, B}	6.96 ± 0.01 ^{c, A}	6.43 ± 0.02 ^{d, B}	6.91 ± 0.02 ^{c, A}
	Morado	6.80 ± 0.01 ^{a, C}	7.01 ± 0.01 ^{b, c, A}	6.75 ± 0.01 ^{a, D}	6.95 ± 0.02 ^{b, B}

Valor promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. Valores promedio con la misma letra minúscula en la misma columna del tratamiento evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$). Valores promedio con la misma letra mayúscula en la misma fila de la propiedad evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p>0.05$).

Según Brooker (2015), los valores de pH idóneos en tortillas, para la industria de nixtamalización, oscilan entre 5.2 y 6.2 en nixtamalización con el uso de aditivos ácidos y un límite de hasta 9.2, especialmente cuando se usa hidróxido de calcio (cal) en la nixtamalización.

De igual manera, la relación del pH en grano de maíz y pH en tortilla, es muy estrecha. Se estima que la nixtamalización puede aumentar desde 0.5 hasta 2.5 unidades de pH mientras se utilice hidróxido de calcio.

Los maíces logran establecer la relación mencionada en ambas mediciones de pH (grano y tortilla), lo cual provoca diferencias estadísticas, cuando se compara el pH entre variedades de maíz que han sido nixtamalizadas bajo las mismas condiciones.

Las variaciones de pH aumentan conforme aumenta el contenido de cal, obteniendo mayores valores de pH en los tratamientos de 0.3 % de cal. Esto se debe a que, independientemente de que se encuentre en un nivel 1 o 2 de contaminación con aflatoxinas, el pH depende enteramente del pH inicial del grano y de la concentración de cal. Igualmente, de ello provienen las diferencias estadísticas en las mediciones de pH.

En términos de humedad, las variedades de maíz presentan diferencias estadísticas al compararse entre sí, pero no muestran diferencias estadísticas al hacerlo entre los tratamientos aplicados a la misma variedad de maíz.

El contenido de humedad en una tortilla representa entre 30 % y 50 % de su peso. La humedad en las totillas representa el rendimiento del maíz para la elaboración de estos productos ya que, muestra el grado de retención de agua en función de la dureza y tamaño del grano.

A pesar de que en la tortilla ya estén desgranados los gránulos de almidón, los granos de maíz más duros y grandes, suelen poseer mayor contenido de almidón en las células del endospermo, lo cual les hace tener mayor grado de absorción de agua. A su vez, el contenido inicial de humedad del maíz es proporcional al grado de absorción de agua. Los granos de menos de 15 % de humedad inicial son eficientes en el proceso de nixtamalización, obteniendo productos de hasta 50 % de humedad (Brooker, 2015).

Según Gaytán-Martínez *et al.* (2012), las tortillas obtenidas con calentamiento óhmico poseen un contenido de humedad de hasta 47.59 % de humedad, en función del maíz analizado y el contenido inicial de humedad que posee. Este valor límite no muestra diferencias significativas con los resultados de la presente investigación, lo cual indica que, el rendimiento de los maíces es más alto en maíces duros que en maíces suaves, como se mencionaba anteriormente.

Las diferencias estadísticas se presentan entre variedades de maíz a las que se les ha aplicado el mismo tratamiento y se deben a la comparación entre contenido inicial de humedad del grano de maíz y sus propiedades físicas. La comparación entre los tratamientos aplicados a una misma variedad de maíz no presenta diferencias estadísticas por la misma razón.

6.5 Cuantificación de aflatoxinas en maíz nixtamalizado

En el Cuadro 17 se muestran las concentraciones iniciales para el nivel 1 y 2 en el maíz contaminado y en los Cuadros 18 y 19 se muestran los contenidos finales de aflatoxinas y porcentaje de degradación de aflatoxinas en el producto nixtamalizado con calentamiento óhmico.

El contenido de aflatoxinas, en las tortillas elaboradas con las distintas variedades de maíz, presentó diferencias estadísticas significativas al compararse entre sí, tras ser sometidas a las mismas condiciones de tratamiento.

Cuadro 17. Concentración inicial de aflatoxinas en las variedades de maíz contaminado para cada nivel.

Variedad de maíz	Nivel 1 (ng/g)	Nivel 2 (ng/g)
Blanco Celaya	224.40 ± 22.33	389.39 ± 30.94
Blanco Sinaloa	224.40 ± 22.33	389.39 ± 30.94
Amarillo	224.40 ± 22.33	389.39 ± 30.94
Azul	224.40 ± 22.33	389.39 ± 30.94
Morado	224.40 ± 22.33	389.39 ± 30.94

Valor promedio de 3 repeticiones ± error estándar.

Cuadro 18. Contenido de aflatoxinas (ng/g) en tortillas de maíz nixtamalizado mediante calentamiento óhmico.

Variedad de maíz	Concentración de aflatoxinas (ng/g)			
	Nivel 1 (224.40 ng/g)		Nivel 2 (389.39 ng/g)	
	Concentración de cal (%)			
	0.1	0.3	0.1	0.3
Blanco Celaya	152.90 ± 36.23 ^{b, B}	145.80 ± 36.01 ^{a, b, B}	325.48 ± 36.16 ^{a, A}	180.79 ± 28.55 ^{a, b, B}
Blanco Sinaloa	150.89 ± 14.72 ^{b, A}	101.92 ± 5.09 ^{b, c, A}	144.24 ± 34.68 ^{c, A}	124.90 ± 38.43 ^{b, A}
Amarillo	188.65 ± 8.54 ^{b, B}	186.10 ± 28.90 ^{a, B}	283.60 ± 25.20 ^{a, b, A}	233.20 ± 28.90 ^{a, A, B}
Azul	58.59 ± 6.03 ^{a, A}	57.10 ± 7.07 ^{c, A}	64.86 ± 3.09 ^{d, A}	53.39 ± 1.54 ^{c, A}
Morado	87.20 ± 16.50 ^{a, C}	63.58 ± 7.06 ^{c, C}	245.23 ± 0.00 ^{b, A}	169.56 ± 5.65 ^{a, b, B}

Valor promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Valores promedio con la misma letra minúscula en la misma columna del tratamiento evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$). Valores promedio con la misma letra mayúscula en la misma fila de la variedad de maíz evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

Cuadro 19. Porcentaje de degradación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado mediante calentamiento óhmico.

Degradación final de aflatoxinas (%)				
Variedad de maíz	Nivel 1 (224.40 ng/g)		Nivel 2 (389.39 ng/g)	
	Concentración de cal (%)			
	0.1	0.3	0.1	0.3
Blanco Celaya	31.87 ± 16.14 ^{b, A, B}	35.01 ± 16.05 ^{a, b, A, B}	16.41 ± 9.29 ^{a, B}	53.57 ± 7.33 ^{a, b, A}
Blanco Sinaloa	32.44 ± 6.59 ^{b, B}	54.58 ± 2.27 ^{b, c, A}	62.96 ± 8.90 ^{c, A}	67.92 ± 9.87 ^{b, A}
Amarillo	15.93 ± 3.80 ^{b, A}	17.08 ± 12.88 ^{a, B}	27.16 ± 6.47 ^{a, b, A, B}	40.11 ± 7.42 ^{a, A}
Azul	73.76 ± 2.69 ^{a, B}	74.56 ± 3.15 ^{c, B}	83.34 ± 0.79 ^{d, A}	86.29 ± 0.39 ^{c, A}
Morado	61.14 ± 7.35 ^{a, A, B}	71.67 ± 3.17 ^{c, A}	37.02 ± 0.00 ^{b, C}	56.45 ± 1.46 ^{a, b, B}

Valor promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Valores promedio con la misma letra minúscula en la misma columna del tratamiento evaluado, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$). Valores promedio con la misma letra mayúscula en la misma fila de la variedad de maíz evaluada, no son significativamente diferentes (Tukey, $p > 0.05$).

De igual manera, se presentan diferencias estadísticas al comparar el efecto de los distintos tratamientos aplicados a una sola variedad de maíz. En el Cuadro 18 se presenta el contenido de aflatoxinas en las tortillas de maíz elaboradas con las distintas variedades de maíz analizadas y en el Cuadro 19 se presentan los porcentajes de degradación de aflatoxinas tras la nixtamalización.

Cabe aclarar que, se pueden presentar algunas diferencias durante la comparación estadística a pesar de que la concentración de aflatoxinas en tortilla, exprese la destoxificación del maíz de la misma manera. Esto se presenta de modo que, a pesar de que el porcentaje de degradación sea alto, los niveles de contaminación inicial en el Nivel 2 siempre son más altos que el Nivel 1, debido a que, desde la contaminación inicial, el Nivel 2 posee una concentración más alta de aflatoxinas. Siendo así, las diferencias en niveles mayores de concentración de aflatoxinas en las tortillas de maíz, independientemente de que el porcentaje de degradación precedente de su tratamiento de nixtamalización sea más alto, puede presentarse debido a esta razón.

Al comparar entre variedades de maíz (Cuadro 18), se puede apreciar que las diferencias recaen entre las concentraciones obtenidas de los diferentes tratamientos aplicados. Los valores de concentración de aflatoxinas en las tortillas de maíz, crecen conforme el porcentaje de degradación también lo hace, de manera que adoptan un comportamiento inversamente proporcional.

Por ello se puede apreciar que, generalmente las concentraciones en las tortillas de maíz, difieren estadísticamente, debido a los porcentajes de degradación, propiciando una posible similitud debido a que se está comparando entre la misma variedad de maíz. Esto, aunque la similitud estadística se presente de la misma manera en el porcentaje de degradación para cada variedad de maíz analizado.

No obstante, algunas variedades como el maíz blanco Celaya, presenten concentraciones que pudieran mostrar similitud entre sí, siguen el mismo principio ya mencionado, pudiendo obtener concentraciones más altas dentro de los tratamientos con concentración inicial de Nivel 2. A su vez, estas concentraciones mostrarán menor proporción en tratamientos con concentración de cal al 0.3 % debido al porcentaje de degradación mayor que se presenta. Esto sucede de igual manera en variedades de maíz amarillo y morado, en las cuales la diferencia

estadística está bien marcada. Por el contrario, en las variedades de maíz azul y blanco Sinaloa, las concentraciones aparentan ser estadísticamente similares, teniendo menores concentraciones de aflatoxinas en tratamientos con 0.3 % de cal, a pesar de que dichas concentraciones pudieran mostrarse como similares. Esto se debe a la similitud de los valores del porcentaje de degradación, que, al ser similares, expresan de la misma manera la degradación de aflatoxinas en las tortillas de maíz.

Por otro lado, al comparar los tratamientos frente a las variedades de maíz, existe una diferencia marcada entre las concentraciones finales obtenidas en las tortillas de maíz. Para el tratamiento de Nivel 1 de contaminación inicial de aflatoxinas y 0.1 % de cal, las variedades de maíz azul y morado presentan similitud estadística y gran diferencia frente a las demás variedades. Este hecho no sucede en los demás tratamientos ya que, para dichos restantes, todas las variedades de maíz presentan diferencias entre sí.

No se espera que las variedades posean una misma concentración final de aflatoxinas en tortillas de maíz, ya que todas parten de un mismo nivel de contaminación inicial marcado como Nivel 1 y Nivel 2. Esto permite explicar dichas diferencias y el por qué no tienen una diferencia tan bien marcada como se puede apreciar en el primer tratamiento mencionado. Tras someterse a los tratamientos, las distintas variedades de maíz presentan el efecto de destoxificación de manera diferente, partiendo del hecho de que el porcentaje de degradación de aflatoxinas será mayor mientras se use mayor concentración de cal, lo cual indicaría que la concentración final en las tortillas, sería menor. Esto va ligado con las cualidades fisicoquímicas de la variedad de maíz, así como su posible presencia de compuestos fenólicos, hecho que presenta mayor relevancia en el porcentaje de degradación. La destoxificación del maíz, tras ser nixtamalizado, se presenta en mayor medida en los tratamientos con mayor concentración de cal, independientemente del nivel inicial de contaminación y la variedad de maíz.

En este entendido, las diferencias presentadas se dan principalmente por los diferentes porcentajes de degradación de cada maíz que, en conjunto con los factores ya mencionados, permiten la obtención de concentraciones de aflatoxinas en la relación antes mencionada. Esto último, sin necesidad de que

presenten una relación o similitud entre variedades, sino que, dicha similitud se presenta al comparar entre tratamientos, como ya se mencionaba anteriormente (Figura 18 y 19).

Ejemplificando la variedad de maíz amarillo, los tratamientos para el Nivel 1 de aflatoxinas con 0.1 % de cal y aquel de Nivel 2 de aflatoxinas y 0.3 % de cal, se presentan estadísticamente similares y estadísticamente diferentes de los tratamientos restantes. Esta variación se presenta de manera similar en los porcentajes de degradación obtenidos en los tratamientos aplicados al maíz blanco Celaya, los cuales presentan concentraciones de aflatoxinas mucho mayores en las tortillas de maíz.

Para la variedad de maíz blanco Sinaloa, los porcentajes de degradación presentan diferencias significativas, principalmente del tratamiento de Nivel 1 de aflatoxinas con 0.1 % de cal frente a los demás tratamientos, mismos que presentan similitud entre sí por poseer porcentajes de degradación más altos y concentraciones de aflatoxinas en tortillas más bajas.

Para las variedades de maíz azul y morado, se pueden apreciar claramente las diferencias entre la eficiencia de los tratamientos en función del contenido de cal aplicado. Los porcentajes de degradación obtenidos para los tratamientos con 0.3 % de cal, son más altos que aquellos obtenidos en los tratamientos con 0.1 % de cal debido a que estos últimos presentan concentraciones de aflatoxinas más altas.

Con ello, se infiere que la degradación se presenta de manera proporcional a la concentración de cal utilizada. En los tratamientos con mayor concentración de cal, el porcentaje de degradación aumenta, aunque a pesar de ser mayor, la diferencia yace en la variedad de maíz utilizada, hecho que se confirma con concentraciones más bajas de aflatoxinas en las tortillas de maíz (Figura 18 y 19). En esto influye la composición proximal del maíz y sus características físicas que, de inicio, puede propiciar una contaminación inicial mayor por la forma en que actúan como sustrato para el hongo *Aspergillus flavus*. De igual manera, existen compuestos fenólicos en los maíces, como son las antocianinas, que pueden ayudar a la degradación de aflatoxinas.

Según Arroyo *et al.* (2007) las antocianinas presentes en maíces azul y morado, pueden actuar como componentes quelantes ante la presencia de metales pesados y toxinas. De este modo y en el contexto de capacidad antioxidante, podría atribuirse una degradación más eficiente en variedades de maíz azul y morado que, como se puede observar en el Cuadro 11, los porcentajes de degradación son mayores, especialmente en niveles altos de contaminación inicial.

Por otro lado, al comparar los tratamientos individualmente pero frente a todas las variedades de maíz, se presentan diferencias estadísticas. Esto se debe a las propiedades fisicoquímicas del maíz. Ciertamente, las variedades de maíz azul y morado son maíces de dureza intermedia y baja, respectivamente. Este hecho permite que el maíz sea infectado y a su vez destoxificado con mayor facilidad tras la obtención de las concentraciones iniciales de aflatoxinas, hecho que es completamente contrario con los demás maíces que, tienen durezas más altas. A su vez, se presenta un porcentaje de degradación mayor ya que, al menos en los tratamientos de Nivel 1 de contaminación inicial de aflatoxinas, las variedades de maíz azul y morado muestran similitud estadística y a su vez se diferencian claramente de las demás variedades de maíz. Debido a ello, la variación entre variedades de maíz, sometidas al mismo tratamiento, se presenta como diferencias estadísticas entre sí mismas, con porcentajes de degradación más altos en las variedades de maíz azul y morado, especialmente en los tratamientos que utilizan mayor concentración de cal (0.3 %), seguido por los porcentajes de degradación obtenidos en el maíz blanco Sinaloa y aquellos más bajos en variedades de maíz amarillo y blanco Celaya.

El hecho anterior permite confirmar que, como se mencionó anteriormente, la concentración de cal influye de manera proporcional en el porcentaje de degradación tanto como la composición proximal del maíz, cualidades fisicoquímicas y presencia de compuestos fenólicos.

Ya que la eliminación suele ser mayor en las variedades de maíz azul y morado, esto también puede deberse a que, al tener un pH más alcalino que las demás variedades de maíz, se pueda favorecer la degradación en medio alcalino con ayuda del hidróxido de calcio y el calentamiento húmedo.

Según Zavala-Franco *et al.* (2020), al someter el maíz a proceso de nixtamalización, el tratamiento alcalino permite la degradación de aflatoxinas (Figura 18), misma que se asiste con el calor húmedo durante la creación de la tortilla.

Para el caso presente, el calor húmedo se adquiere al momento de colocar la tortilla moldeada en una fuente de calor convencional (comal) que, al encontrarse a temperaturas superiores a 270 °C, logran degradar aflatoxinas junto con el tratamiento alcalino, lo cual mejora la degradación a tal punto que estos metabolitos no puedan recuperar su estructura original, dando como resultado una concentración remanente de aflatoxinas que varía entre variedades de maíz (Figura 19).

La degradación de aflatoxinas está dada además por la presencia de altas temperaturas e hidróxido de calcio en los tratamientos de nixtamalización. Como reportan Zavala-Franco *et al.* (2020), la destoxicación de aflatoxinas en el maíz durante la nixtamalización y en presencia de hidróxido de calcio, se da por medio de la degradación de la AFB₁. Este mecanismo implica la ruptura del anillo de lactona presente en la estructura de dicha toxina, obteniendo un producto de degradación un β-cetoácido que sigue degradándose hasta obtener dos estructuras posibles denominadas como aflatoxina D₁ (AFD₁) y aflatoxina D₂ (AFD₂) (Figura 20).

Los porcentajes de degradación logran alcanzar hasta 86.29 % que, comparado con la nixtamalización convencional con un porcentaje de degradación de hasta 90 % (Zavala-Franco *et al.*, 2020), siendo un porcentaje de degradación considerable en harinas de maíces pigmentados y algunas variedades de maíz blanco (Sinaloa).

A pesar de ello, las concentraciones finales de aflatoxinas tras la nixtamalización, no cumplen con los límites establecidos por la NOM-188-SSA1-2020, que son hasta 12 ng/g como máximo. Esto indica que, a pesar de no cumplir con la normativa, el porcentaje de degradación en un caso real, podría competir realmente con la nixtamalización convencional.

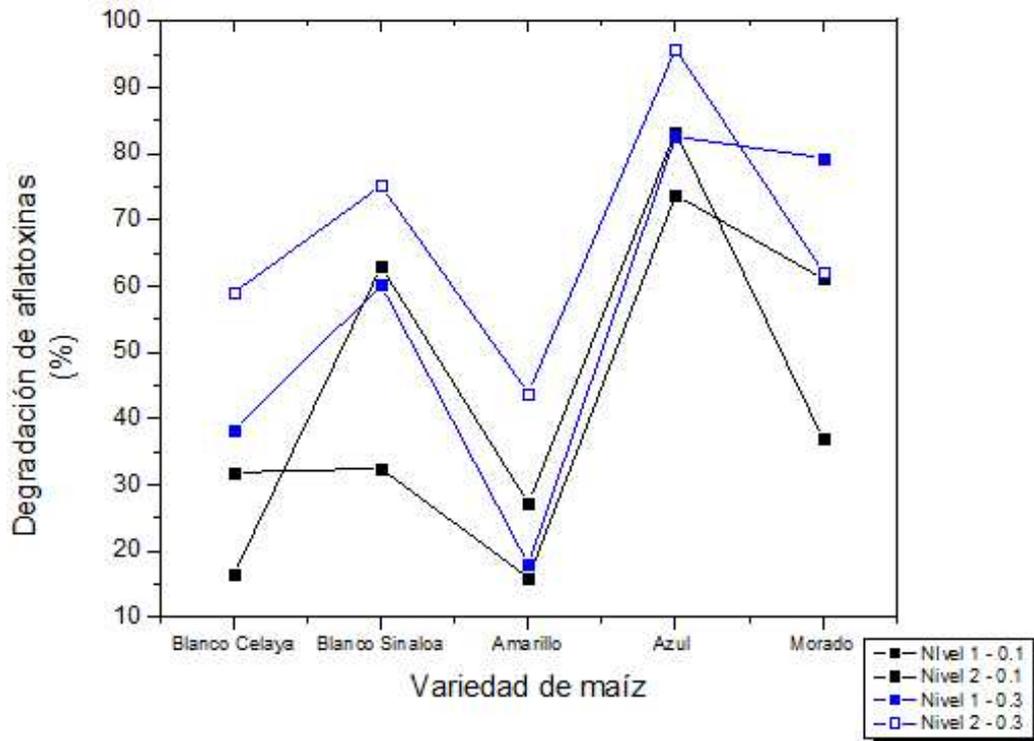


Figura 18. Degradación de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.

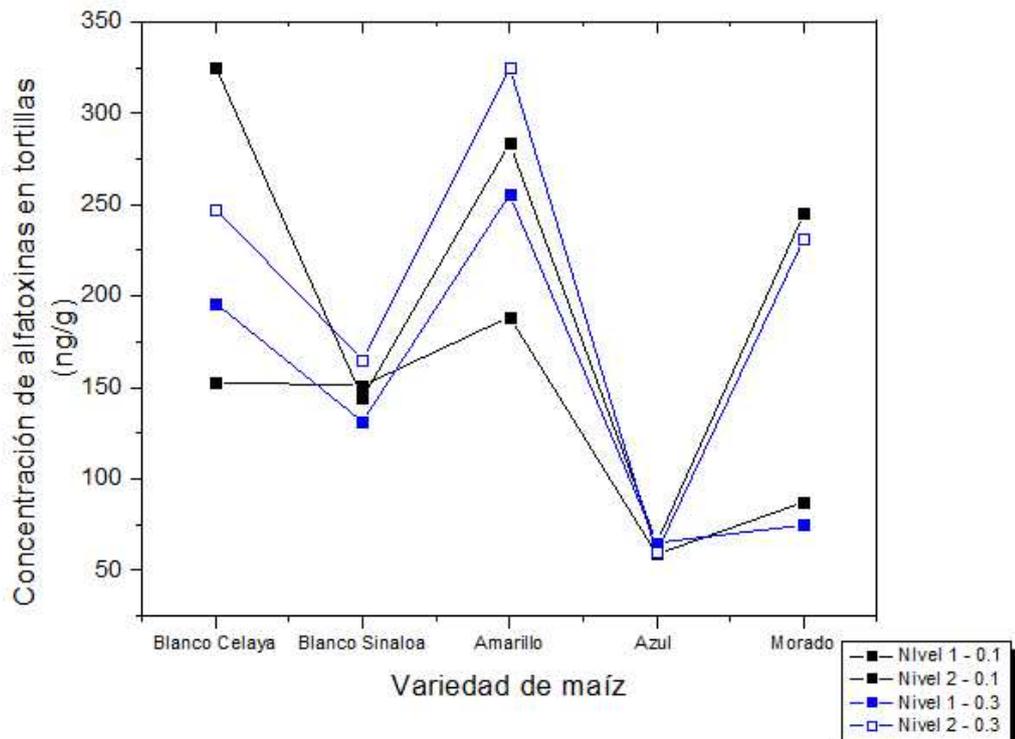


Figura 19. Concentración de aflatoxinas en tortillas de maíz nixtamalizado con calentamiento óhmico.

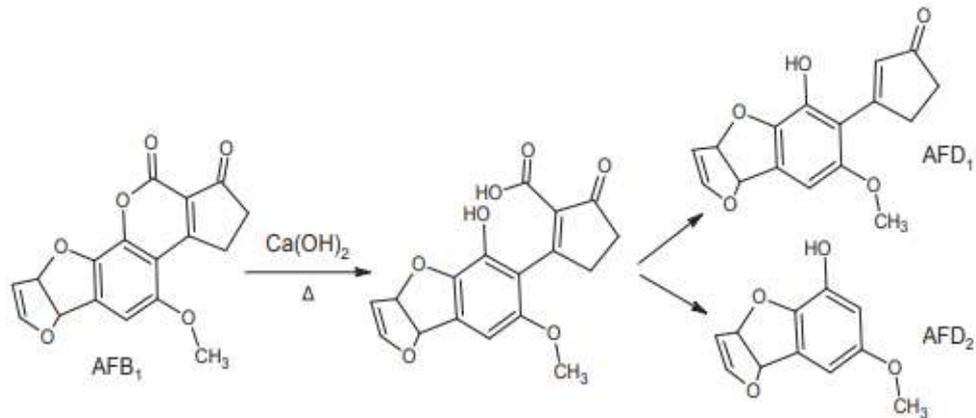


Figura 20. Mecanismo de degradación de la AFB₁ durante el proceso de nixtamalización (tomado de Zavala-Franco *et al.*, 2020).

Por último, se puede inferir que la eficiencia los tratamientos aplicados se ve principalmente influida por la concentración de cal utilizada. La degradación de aflatoxinas y destoxificación del maíz se muestra de manera proporcional hacia la concentración de cal utilizada, especialmente en variedades de maíz pigmentado, cuyos compuestos fenólicos pudieran propiciar mejor propiedad de degradación de aflatoxinas, independientemente de la concentración inicial de aflatoxinas presente.

De igual manera, los porcentajes de degradación de aflatoxinas tras la nixtamalización, se ven aumentados tras la transferencia de calor húmedo en la elaboración final de tortillas que, además de la eliminación otorgada por la concentración de cal presente, logra degradar aflatoxinas por medio de la elevación de temperatura por encima de su punto de fusión.

7. CONCLUSIONES

El uso de calentamiento óhmico como vía de conservación y transformación de cereales como el maíz (*Zea mays L.*) se muestra además como una alternativa viable para la destoxificación de posibles micotoxinas presentes. La nixtamalización asistida con calentamiento óhmico, además, aumenta la eficiencia de la nixtamalización convencional, reduciendo el tiempo de operación y cantidad de residuos generados.

La destoxificación por medio de la degradación de micotoxinas presentes en el maíz, es viable al usar altas concentraciones de cal en el proceso de nixtamalización con calentamiento óhmico. El uso de altas concentraciones de cal en al menos un 0.3 % en peso del lote total para nixtamalización, asegura porcentajes de degradación de hasta 86.29 % con concentraciones iniciales de aflatoxinas presentes en el maíz de hasta 389.39 ng/g, especialmente en variedades de maíz pigmentadas, de baja a intermedia dureza, en rangos de pH de 7 a 9 y contenido de humedad por debajo de 15%. Sin embargo, no se logra obtener las concentraciones seguras para su consumo.

La presencia de compuestos fenólicos en las variedades de maíz pigmentadas, así como su contenido de humedad, favorecen la eliminación de aflatoxinas en los tratamientos con mayor concentración de cal (0.3 %) durante la nixtamalización.

Los maíces de menor dureza y mayor contenido de humedad, tales como el azul, blanco Sinaloa y morado, poseen mejor conductividad eléctrica y menor resistencia al momento de nixtamalizarse con la concentración más alta de cal (0.3 %), lo cual favorece una mayor eliminación de aflatoxinas en estas variedades de maíz, tanto como mayor eficiencia en la cocción de la harina de maíz y la velocidad del proceso (velocidad de calentamiento). El pH del grano de maíz no fue un factor significativo en la conductividad eléctrica de las harinas de maíz.

El proceso de nixtamalización con calentamiento óhmico permite la obtención de harinas nixtamalizadas para la elaboración de tortillas de calidad aceptable, mostrándose como una alternativa de destoxificación adicional por medio de la

aplicación de calor húmedo que, a su vez, no se muestra como un método de conservación destructivo. Esto último, debido a que la disponibilidad nutricional y de compuestos fenólicos en las variedades de maíz analizadas, contribuye significativamente a la destoxificación del maíz durante el proceso de nixtamalización con calentamiento óhmico.

Además de la eficiencia para la destoxificación del maíz, el calentamiento óhmico se muestra como una alternativa viable al proceso de nixtamalización convencional, en términos de disminución de tiempo de proceso, disminución de residuos y disminución del consumo energético.

8. BIBLIOGRAFÍA

Anguiano-Ruvalcaba, G. L., Vargas-Cortina, A. V. Y. & Guzmán-De Peña, D. (2005). Inactivación de aflatoxina B1 y aflatoxicol por nixtamalización tradicional del maíz y su regeneración por acidificación de la masa. *Salud Pública de México*. 47(5): 369-375.

AOAC: Association of Official Analytical Chemists. (2000). Official Methods of Analysis en Dr. George W Latimer, Jr. (ed.), Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (17 ed.). (Nueva York, 2000; ed. online, AOAC Publications, 4 Ene. 2000), <https://doi.org/10.1093/9780197610145.002.001>.

Aragón, C. F., Figueroa-Cárdenas, J.D., Zárate, M. F., & Gaytán-Martínez, M. (2012). Calidad Industrial de Maíces Nativos de la Sierra Sur de Oaxaca. Oaxaca, México. 15-47.

Arámbula-Villa, G., Barrón Ávila, L., González Hernández, J., Moreno Martínez, E., & Luna Bárcenas, G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays L.*) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos latinoamericanos de Nutrición*. 51(2): 187-194.

Arendt, E. K., & Zannini, E. (2013). Maizes en Arendt, E. K., & Zannini, E. (Ed.), *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries* (1a ed., Vol. 1, pp. 67–115). Woodhead Publishing.

Arroyo, J., Raez, E., Rodríguez, M., Chumpitaz, V., Burga, J., De la Cruz, W. & Valencia, J. (2007). Reducción del colesterol y aumento de la capacidad antioxidante por el consumo crónico de maíz morado (*Zea mays L.*) en ratas hipercolesterolémicas. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*. 24(2): 157-162.

Barac, A. (2019). Mycotoxins and Human Disease. en: Presterl, E. (Ed.) *Clinically Relevant Mycoses* (1a ed., Vol. 1, pp. 213-225). Springer Cham.

Bogantes-Ledezma, P., Bogantes-Ledezma, D. & Bogantes-Ledezma, S. (2004). Aflatoxinas. *Acta Medica Costarricense*. 46(4): 1-6.

Bressani, R., Castillo, S.V. & Guzmán, M.A. (1962). The nutritional evaluation of processed whole corn flour. *Agriculture. J. Food Chemistry*. 10: 308-312.

Brooker, D. J. (2015). Quality assurance for corn and wheat flour tortilla manufacturing. en Rooney, L.W. & Serna-Saldivar, S.O. (Ed.) *Tortillas* (1a ed., Vol. 1, pp. 97-123). Woodhead Publishing & AACC International Press.

Bullerman, L. B., Schroeder, L. L., & Park, K. Y. (1984). Formation and control of mycotoxins in food. *Journal of Food Protection*. 47(8): 637-646.
<https://doi.org/10.4315/0362-028X-47.8.637>.

Campechano-Carrera, E. M., Figueroa-Cárdenas, J.D., Arámbula Villa, G., Martínez Flores, H. E., Jiménez Sandoval, S. J., & Luna Bárcenas, J. G. (2012). New ecological nixtamalisation process for tortilla production and its impact on the chemical properties of whole corn flour and wastewater effluents. *International Journal of Food Science & Technology*. 47(3): 564-571.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02878.x>.

Canelo, A. G. & Tipian, J. P. (2018). Determinación de micotoxinas por el método de ELISA en soya para aves en producción en la provincia de chincha. *Revista De La Sociedad Química Del Perú*. 84(1): 27-40.

Carranza-Mesén, F., Meneses, M. B., Montero, M. M. G., & Meneses, M. V. (2022). Especies de *Aspergillus* asociadas a granos de maní (*Arachis hypogaea* L.) y frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivados en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 50810: 1-9.

Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2023). Guideline for Isolation Precautions: Preventing Transmission of Infectious Agents in Healthcare Settings. Recuperado de:
<https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/isolation/index.html>.

Choi, J., Choung, H. J., Joo, Y. H., Kang, H. & Kim, Y. (2010). Performance characteristics of a simultaneous heating and cooling heat pump in the heat recovery mode. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 18(03): 237-245. <https://doi.org/10.1142/S2010132510000162>.

Contreras-Jiménez, B. L. (2009). Caracterización de harina de maíz instantánea obtenida por calentamiento óhmico. [Tesis Doctoral. CICATA-IPN, Unidad Queretaro, México]. <https://ri-ng.uaq.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1158/R1005070.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Dhanasekaran, D., Shanmugapriya, S., Thajuddin, N., & Panneerselvam, A. (2011). Aflatoxins and aflatoxicosis in human and animals. *Aflatoxins-Biochemistry and Molecular Biology*. 10(22717): 221-254.

Dong, H. Z., Hou, H. X., Liu, C. F. & Zhang, H. (2008). Relationships between some physicochemical properties of starches from maize cultivars grown in East China. *Starch*. 60: 305–314. <https://doi.org/10.1002/star.200800665>.

Duarte-Vogel, S. & Villamil-Jiménez, L. C. (2006). Micotoxinas en la salud pública. *Revista De Salud Pública*. 8: 129-135.

Elias-Orozco, R., Castellanos-Nava, A., Gaytan-Martinez, M., Figueroa-Cárdenas, J. D., & Loarca-Pina, G. (2002). Comparison of nixtamalization and extrusion processes for a reduction in aflatoxin content. *Food Additives & Contaminants*. 19(9): 878-885. <https://doi.org/10.1080/02652030210145054>.

Flores-García, F. M., Morales-Sánchez, E., Gaytán-Martínez, M., de la Cruz, G. V. & del Carmen Méndez-Montevalvo, M. G. (2024). Effect of electric field on physicochemical properties and resistant starch formation in ohmic heating processed corn starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. 266: 131414. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131414>.

Garzón-González, H. D., Jaimes-Mendez, N., Rojas-Contreras, L., Salmen-Halabi, S. & Gil-Durán, M. A. (2021). Efecto citotóxico de deoxinivalenol sobre la proliferación de la línea celular hepg2. *Revista MVZ Córdoba*. 26(3): 2080.

Gaytán-Martinez, M. (2011). Estudio del calentamiento ohmico para la obtención de masa y harinas de maíz nixtamalizado. [Tesis de doctorado. CICATA-IPN Unidad Queretaro, México]. <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/8334>.

Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J. D. C., Vazquez-Landaverde, P. A., Morales-Sanchez, E., Martínez-Flores, H. E. & Reyes-Vega, M. L. (2012). Caracterización fisicoquímica, funcional y química de harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico y proceso tradicional. *CyTA-Journal of Food*. 10(3): 182-195. <https://doi.org/10.1080/19476337.2011.606478>.

Gaytán-Martínez, M., Figueroa-Cárdenas, J. D., Reyes-Vega, M. D. L. L., Morales-Sánchez, E. & Rincón-Sánchez, F. (2013). Selección de maíces criollos para su aplicación en la industria con base en su valor agregado. *Revista fitotecnia mexicana*. 36: 339-346.

Gobierno de México. (2023). Requerimientos unificados sanitarios, epidemiológicos e higiénicos en relación a las mercaderías sometidas a supervisión (control) epidemiológica. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/128214/1-Resoluci_nNo299RequerimientosUnificadosSanitariosEpidemiol_gicoseHigi_nicos.pdf.

González, R., Reguera, E., Mendoza, L., Figueroa, J. M., & Sánchez-Sinencio, F. (2004). Physicochemical changes in the hull of corn grains during their alkaline cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52(12): 3831-3837. <https://doi.org/10.1021/jf035175h>.

Gyóri, Z. (2017). Corn: Grain-Quality characteristics and management of quality requirements en Wrigley, C., Batey I. & Miskelly D. (Ed.) *Cereal Grains* (2a ed., Vol. 1, pp. 257-290). Woodhead Publishing.

Hedman, H. D., Varga, C., Duquette, J., Novakofski, J., & Mateus-Pinilla, N. E. (2020). Food safety considerations related to the consumption and handling of game meat in North America. *Veterinary Sciences*. 7(4): 188. <https://doi.org/10.3390/vetsci7040188>.

Hwang, J.H.& Lee K.G. (2006). Reduction of aflatoxin B1 contamination in wheat by various cooking treatments. *Food Chemistry*. 98: 71-75. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.038>.

IARC. (2012). International Agency of Research on Cancer. Recuperado de: <https://www.iarc.who.int/>.

Jiménez-Nevárez, Y. B., Milán-Carrillo, J., Mora-Rochín, S., Montoya-Rodríguez, A., Reyes-Moreno, C., Cuevas-Rodríguez, E. O. & Milán-Noris, E. (2018). Características tecnológicas y fitoquímicas de maíz criollo raza elotero de Sinaloa. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 3: 616-620.

Kostić, A. Ž., Milinčić, D. D., Petrović, T., Krnjaja, V., Stanojević, S. P., Barać, M. B. & Pešić, M. B. (2019). Mycotoxins and mycotoxin producing fungi in pollen: review. *Toxins*. 11(2): 64. <https://doi.org/10.3390/toxins11020064>.

Lan, H., Sun, R., Fan, K., Yang, K., Zhang, F., Nie, X. & Wang, S. (2016). The *Aspergillus flavus* histone acetyltransferase *AflGcne* regulates morphogenesis, aflatoxin biosynthesis, and pathogenicity. *Frontiers in Microbiology*. 7: 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01324>.

Landers, K. E., Davis, N. D. & Diener U. L. (1967). Influence of atmospheric gases on aflatoxin production by *Aspergillus flavus* in peanuts. *Phytopathology*. 57:1086-1090.

Liew, W. & Sabran, M. (2018). Mycotoxin: its impact on gut health and microbiota. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 8: 1-17. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00060>.

Loy, D. D. & Wright, K. (2003). Nutritional properties and feeding value of corn and its by-products. en: White, P. J. & Johnson, L. A. *Corn: Chemistry and Technology* (3a ed., Vol. 1, pp. 633-659) Woodhead Publishing & AACC International Press.

Martínez-Reyna, P. (2023). Caracterización física, química, nutracéutica y propiedades tecnofuncionales de tres variedades de maíz (*Zea mays L.*) criollo pigmentado (blanco, amarillo y negro). [Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México] <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/4340>.

Mendoza, C. (1975). Method for obtaining nixtamalized flours. United States Patent. 3,859,452. Ene. 7.

Mendoza, N. A. S., Jiménez-Martínez, C., Cardador-Martínez, A., Campo, S. T. M. & Ortíz, G. D. (2016). Caracterización física, nutricional y no nutricional de las semillas de inga paterno. *Revista Chilena De Nutrición.* 43(4): 1-10.

Molina, M. R., Letona, M. & Bressani R. (1977). Drum-drying for the improved production of instant tortilla flour. *J. Food Sci.* 42: 1432- 1434. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb08392.x>.

Morales-Sánchez, E. (2008). Reporte final del proyecto SIP 2008-0912. Recuperado de: https://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20080912_6250.pdf.

Morales-Sánchez, E., Figueroa-Cárdenas, J. de D., & Gaytán-Martínez, M. (2010). Proceso y aparato cocedor de calentamiento óhmico continuo para obtener masa y harinas de maíz nixtamalizada y productos derivados. Registro de Patente: MX 3337742. IMPI. México. Diciembre 16, 2016.

Moraveji, M. K., Ghaderi, E. & Davarnejad, R. (2010). Simulation of the transport phenomena during food drying with ohmic heating in a static system. *International Journal of Food Engineering.* 6(5): 1-16. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1668>.

Motbaynor, A., Kassaye, D., Keffale, M., & Wasihun, P. (2021). Magnitude of aflatoxigenic aspergillus species, level of aflatoxin B₁, and associated factors in stored feed at poultry farms in dire dawa, Ethiopia. *Veterinary Medicine International.* 2021: 1-11. <https://doi.org/10.1155/2021/6638083>.

Nguyen, T. B., Vu, T. B., Pham, H. M., Tran, C., Thi, H. H. L. & Thi, N. T. V. (2020). Detection of aflatoxin B₁ in maize grains using fluorescence resonance energy transfer. *Applied Sciences.* 10(5): 1578. <https://doi.org/10.3390/app10051578>.

NMX-FF-034/1-SCFI-2020. (2020). Productos alimenticios para uso humano no industrializados-cereales-maíz-parte 1: Granos para tortillas y productos nixtamalizados - Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la

Federación.

CDMX,

México.

https://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-FF-034-1-SCFI-2002_MAIZ_blanco.pdf.

NOM-188-SSA1-2002. (2002). Productos y Servicios. Control de aflatoxinas en cereales para consumo humano y animal. Especificaciones sanitarias. Diario Oficial de la Federación. CDMX, México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=719385&fecha=15/10/2002#gsc.tab=0.

Oblitas-Cruz, J. (2019). Tecnologías emergentes en la preservación de alimentos–Revisión. Caxamarca. 16(2): 151-161.

Olayo-Contreras, V. M., Alemán-Castillo, S. J., Rodríguez-Castillejos, G., & Castillo-Ruíz, O. (2022). Almidón resistente como prebiótico y sus beneficios en el organismo humano. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 24: 1-10.

Organización Mundial de la Salud: OMS. (2018). Micotoxinas. Recuperado de. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>.

Palacios-Rojas, N. (2018). Calidad nutricional e industrial de Maíz: Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz “Evangalina Villegas” CDMX, México: CIMMYT. 29-66.

Paliwal, R. L. (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Recuperado de: <https://curlacavunah.files.wordpress.com/2010/04/el-maiz-en-los-tropicos.pdf>.

Paredes-López, O., Guevara-Lara, F., & Bello-Pérez, L. A. (2010). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. Ciencias, 92(092). Recuperado de <https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14831>.

Pellegrini, N. & Agostoni, C. (2015). Nutritional aspects of gluten-free products. Journal of the Science of Food and Agriculture. 95(12): 1-26. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7101>.

Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G. & Gómez-Montiel, N. O. (2019). H 327 AO, híbrido trilineal de maíz oleoso de grano amarillo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42(3): 313-315.

Ramírez, K., Rangel-Peraza, J. G., Bustos-Terrones, Y. A., Aguayo Rojas, J. & Rochín Medina, J. J. (2018). Effect of different salts on total phenolic compounds and their bioactivity during the development of a sustainable nixtamalization process using a fractional factorial design. *Journal of food processing and preservation*. 42(9): 13681. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13681>.

Ramírez-Araujo, H., Gaytán-Martínez, M., & Reyes-Vega, M. L. (2019). Alternative technologies to the traditional nixtamalization process. *Trends in Food Science & Technology*. 85: 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.007>.

Requena, F., Saume, E., & León, A. (2005). Micotoxinas: Riesgos y prevención. *Zootecnia tropical*. 23(4): 393-410.

Rooney, L. W. & Serna-Saldivar, S. O. (2003). Food use of whole corn and dry-milled fractions. en White, P. J. & Johnson, L. A. (Ed.) *Corn: Chemistry and Technology* (3a ed., Vol.1, pp. 57). Woodhead Publishing and AACC International Press.

Ruíz-Gutiérrez, M., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C., Talamás-Abbud, R., Barnard, J., Márquez-Meléndez, R., ... & Lardizábal-Gutiérrez, D. (2011). Nixtamalización en dos pasos con diferentes sales de calcio y su relación con las propiedades químicas, texturales y térmicas en masa y tortilla. *Revista de ingeniería de procesos alimentarios*. 35(5): 772-783.

Salgado-Ordosgoitia, R. D., Contreras, A. P., Cohen-Manrique, C. S. & Rodríguez-Manrique, J. A. (2019). Análisis de las curvas de gelatinización de almidones nativos de tres especies de ñame: criollo (*Dioscorea alata*), espino (*Dioscorea rotundata*) y diamante 22. *Información Tecnológica*. 30(4): 93-102.

Salinas Moreno, Y., Hernández Martínez, V., Trejo Téllez, L. I., Ramírez Díaz, J. L. & Iñiguez Gómez, O. (2017). Composición nutricional y de compuestos

bioactivos en tortillas de poblaciones nativas de maíz con grano azul/morado. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 8(7): 1483-1496.

Salinas-Moreno, Y. S., C. G., Estrada, B. C., & Martínez, V. A. V. (2013). Variabilidad en contenido y tipos de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz. *Revista fitotecnia mexicana*. 36(3-A): 285-294.

Salinas-Moreno, Y., & L. Aguilar-Modesto. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays L.*) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ing. Agrícola y Biosist.* 2: 5–11.

Sánchez, R. A. M., Figueroa-Cárdenas, J. D., Taba, S., Vega, M. D. L. L. R., Sánchez, F. R. & Galván, A. M. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27(3): 213-222.

Sanchis, V. (1993). Aplicaciones de las técnicas de biología molecular para el control de la contaminación por aflatoxinas. VOLUMEN MONOGRÁFICO DE ALIMENTOS. 69.

Sanders, T. H., Davis, N. D., & Diener, U. L. (1968). Effect of carbon dioxide, temperature, and relative humidity on aflatoxin production in peanuts. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 45: 683-685. <https://doi.org/10.1007/BF02541257>.

Sandoval-Flores, V. (2016). Identificación de razas de maíz criollo del Valle de Oaxaca resistente y susceptible a la acumulación de Aflatoxina B1 producida por *Aspergillus flavus* y la expresión de los genes: ZmCOR, Zeamatin, aflR y norB. [Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Guanajuato, México] <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/1505>.

Souza, D. R., Souza, G. A., Araujo, I. F. B., Pereira, L. M., Bezerra, V. S. & Marques, R. B. (2017). Efeitos tóxicos dos fungos nos alimentos. *Revista Intertox De Toxicologia. Risco Ambiental E Sociedade*. 10(2):1-10. <https://doi.org/10.22280/revintervol10ed2.281>.

Suo, C., Wei, R., Zhang, W., & Li, Y. (2021). Research on the three-dimensional power frequency electric field measurement system. *Journal of Sensors*. 2021: 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/8859022>.

Uribe-Yunda, D. F., & Navas, M. C. (2012). Mecanismos moleculares involucrados en la mutagenicidad inducida por aflatoxina B1. *Revista Ciencias de la Salud*. 10(3): 403-419.

USDA. (2023). Mycotoxin Research. Recuperado de: <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/dawson-ga/national-peanut-research-laboratory/docs/mycotoxin-research/page-3/>.

Varghese, K., Pandey, M. C., Radhakrishna, K. & Bawa, A. S. (2012). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *Journal of Food Science and Technology*. 51(10): 2304-2317. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0710-3>.

Vázquez-Carrillo, M. G. V., Báez, L. G., García, J. L. A., Sánchez, F. M. & Merino, J. C. (2003). Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocruzas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 26(4): 231-238.

Villar, M. T., Medina, J. M. A., & Gómez, J. L. G. (2014). La aflatoxicosis: Un problema a resolver dentro de la Medicina Veterinaria. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*. 15(2): 1-34.

Villarreal, D. Z., & García-Marín, P. C. (2016). El uso de las cenizas como posible precursor de la nixtamalización en el oeste de Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*. (57): 7-18.

Watson, S. A. (2003). Description, development, structure, and composition of the corn kernel. en White, P. J. & Johnson, L. A. (Ed.) *Corn: Chemistry and Technology* (3a ed., Vol. 1, pp. 147-163) Woodhead Publishing and AACC International Press.

Wrolstad, R. E., & Smith, D. E. (2017). Color analysis en Nielsen, S. (Ed.) *Food analysis* (5a ed., Vol.1, pp. 545-555). Springer Cham.

Xu, Y., Gong, Y. & Routledge, M. N. (2018). Aflatoxin exposure assessed by aflatoxin albumin adduct biomarker in populations from six african countries. *World Mycotoxin Journal.* 11(3): 411-420. <https://doi.org/10.3920/WMJ2017.2284>.

Yu, J., Chang, P. K., Ehrlich, K. C., Cary, J. W., Bhatnagar, D., Cleveland, T. E. & Bennett, J. W. (2004). Clustered pathway genes in aflatoxin biosynthesis. *Applied and environmental microbiology.* 70(3): 1253-1262. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.3.1253-1262.2004>.

Zannini, E., Jones, J. M., Renzetti, S. & Arendt, E. K. (2012). Functional replacements for gluten. *Annual Review of Food Science and Technology.* 3: 227–245. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101203>.

Zavala-Franco, A., Arámbula-Villa, G., Ramírez-Noguera, P., Salazar, A. M., Sordo, M., Marroquín-Cardona, A. & Méndez-Albores, A. (2020). Aflatoxin detoxification in tortillas using an infrared radiation thermo-alkaline process: Cytotoxic and genotoxic evaluation. *Food Control.* 112: 107084. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107084>.

Zavala-Franco, A. (2015). Efecto del proceso de nixtamalización por infrarrojo sobre el contenido de aflatoxinas en las tortillas de maíz. [Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México] http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/2013.