



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FIJACIÓN DE CALCIO
EN GRANOS DE MAÍZ, DURANTE EL PROCESO DE
NIXTAMALIZACIÓN.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS
P R E S E N T A:
ELIZABETH RAMOS CARRILLO

ASESOR: M. en C. ELSA GUTIERREZ C.

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (FES Cuautitlan): Por la formación profesional que recibí.

A la M. en C. Elsa Gutiérrez Cortez: Por su gran apoyo, valiosa dedicación y compartir conmigo sus conocimientos para la realización de este trabajo; y ser para mí una gran amiga.

Al Dr. Mario Enrique Rodríguez (CFATA; UNAM campus Juriquilla) y Dra. Isela Rojas (Facultad de Ciencias Naturales, UAQ): Por su valioso tiempo dedicado a este trabajo.

A la Técnica Académica María del Pilar Fernández: Por su asesoría y compartir conmigo su experiencia en las determinaciones de Espectrofotometría de Adsorción Atómica.

A mis padres: Por su gran apoyo, esfuerzo, ejemplo y sacrificios, que han realizado para que yo sea la persona que soy ahora. Gracias por todo...

A mis hermanos: Por su apoyo...

A Marco (MKDN): Por estar conmigo, apoyándome en todo momento, no importando la situación; espero que este triunfo lo sientas como tuyo, Te amo...

A Natalia y Maribel: Por su apoyo a lo largo de este tiempo y por tantos momentos inolvidables que vivimos, y recuerden que gran parte de este trabajo es gracias a ustedes, gracias por su amistad...

A todos mis compañeros de la H. Generación 24, gracias por su amistad y nunca olvidare todas las locuras que hicimos, mi divertí mucho...

A mi gran amiga Ana Rosa Sotelo Vences: Por tu gran amistad y apoyo, durante todos estos años...

ÍNDICE

Resumen.....	i
Introducción.....	ii

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Historia del maíz.....	1
1.2 Definición del maíz.....	1
1.3 Variedades de maíz.....	2
1.4 Características del maíz.....	3
1.5 Genética del maíz.....	4
1.6 Maíz híbrido.....	5
1.7 Maíz QPM (Quality Protein Maize)	6
1.8 Producción de maíz en México (Estadísticas).....	9
1.9 Composición del maíz	11
1.10 Estructura del Maíz.....	12
1.10.1 Cofia.....	12
1.10.2 Germen.....	13
1.10.3 Endospermo.....	14
1.10.4 Pericarpio.....	15
1.11 Proceso de Nixtamalización Tradicional.....	17
1.11.2 Cambios fisicoquímicos durante el proceso de nixtamalización.....	18
1.12 Harina de Maíz Nixtamalizada.....	25
1.12.1 Efectos benéficos del proceso alcalino.....	28
1.12.2 Importancia del calcio en la dieta.....	30
1.13 Técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	31

Capítulo 2

Metodología

Desarrollo Experimental.....	32
2.1 Caracterización de la materia prima.....	35
2.1.1 Análisis Químico del grano.....	36
2.1.1.1 Humedad.....	35
2.1.1.2 Calcio Endógeno (grano total, estructuras).....	35
2.1.2 Análisis físico del grano de maíz.....	36
2.1.2.1 Peso promedio.....	36
2.1.2.2 Dimensiones.....	36
2.1.2.3 Porcentaje de pericarpio, germen y endospermo.....	36
2.2 Caracterización y acondicionamiento del equipo.....	37
2.2.1 Validación de termopares.....	37
2.2.2 Caracterización del punto térmico del reservorio de cocción.....	38
2.2.3 Instalación de la computadora, programa y termopares.....	38
2.3 Experimento piloto.....	40
2.3.1 Caracterización del equipo (Molino de piedras, horno de vacío, Molino de martillos, Ro-tap, Serie de tamice).....	41
2.4 Condiciones de proceso.....	42
2.4.1 Proceso tecnológico de harina de maíz nixtamalizado	43
2.4.1.1 Descripción del proceso tecnológico.....	44
2.5 Acondicionamiento de Unidades Experimentales (muestra).....	46
2.5.1 Preparación de las unidades experimentales.....	46
2.5.2 Separación manual de pericarpio.....	47
2.5.3 Separación manual de germen.....	47
2.5.4 Separación manual de endospermo.....	47
2.5.5 Secado de las muestras (pericarpio, germen y endospermo).....	48
2.5.6 Molienda y tamizado de las muestras (pericarpio, germen y endospermo).....	48
2.5.7 Raspados de Endospermo en 10%, 20% y 80%.....	48
2.5.8 Elaboración de harinas de maíz nixtamalizado.....	48

2.6 Determinación de calcio residual.....	49
2.6.1 Determinación de calcio residual en grano total y en estructuras (pericarpio, germen y endospermo).....	49

Capítulo 3:

Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de la materia prima.....	51
3.1.1 Análisis químico del grano.....	51
3.1.1.1 Determinación de humedad.....	51
3.1.1.2 Determinación de calcio endógeno.....	51
3.1.2 Análisis físico del grano.....	52
3.1.2.1 Peso promedio.....	52
3.1.2.2 Dimensiones del grano.....	52
3.1.2.3 Porcentaje de pericarpio, germen y endospermo.....	53
3.2 Caracterización y acondicionamiento del equipo.....	54
3.2.1 Validación de termopares.....	54
3.2.2 Caracterización térmica del reservorio de cocción.....	54
3.3 Experimento piloto.....	55
3.3.1 Caracterización de equipos (Molino de piedras, horno de vacío, Molino de martillos, Rop-tap y serie de tamices).....	56
3.4 Condiciones de proceso.....	56
3.5 Acondicionamiento de unidades experimentales (muestra).....	56
3.6 Resultado de Calcio residual en grano total.....	57
3.6.1 Resultado de Calcio residual en pericarpio.....	61
3.6.2 Resultado de Calcio residual en germen.....	63
3.6.2 Resultado de Calcio residual en endospermo.....	65
3.6.2.1 Resultado de Calcio residual en raspados del endospermo.....	66

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones.....	68
Recomendaciones.....	70
ANEXO.....	71
Referencias Bibliográficas.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura anatómica del grano de maíz.....	12
Figura 2: Diagrama tecnológico de nixtamalización tradicional.....	17
Figura 3: Cuadro metodológico.....	34
Figura 4: División de cuadrantes del reservorio de cocción (1, 2, 3, 4 representan los cuadrantes y C representa el centro).....	38
Figura 5: Sistema prototipo de cocción-reposo para la nixtamalización	39
Figura 6: Diagrama de proceso para la elaboración de Harina de maíz nixtamalizado.....	43
Figura 7: Concentración de calcio residual en granos de maíz nixtamalizados.....	58
Figura 8. Concentración de calcio residual en pericarpio durante la nixtamalización.....	62
Figura 9: Concentración de calcio residual en germen durante la nixtamalización.....	63
Figura 10: Concentración de calcio residual en endospermo durante la nixtamalización.....	65
Figura 11: Concentración de calcio residual de raspados de endospermo durante la nixtamalización	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características Morfológicas.....	2
Tabla 2. Variedades de maíz QPM.....	8
Tabla 3. Demanda anual a nivel nacional de maíz blanco.....	9
Tabla 4. Demanda anual a nivel nacional de maíz amarillo.....	9
Tabla 5. Producción de maíz y su aplicación.....	10
Tabla 6. Demanda de maíz en México.....	11
Tabla 7. Composición química (base seca) de las partes anatómicas del maíz.....	11
Tabla 8. Requerimientos específicos para harina instantánea de maíz.....	27
Tabla 9. Determinación de humedad en maíz nativo QPM H-368C.....	51
Tabla 10. Resultados de calcio endógeno del grano de maíz QPM-H368C.....	51
Tabla 11. Peso promedio ¹ del grano de maíz QPM- H368C.....	52
Tabla 12. Dimensiones del grano de maíz QPM-H368C.....	52
Tabla 13. Porcentaje de estructuras anatómicas del maíz QPM-H368C.....	53
Tabla 14. Valores para corrección de termopares.....	54
Tabla 15. Caracterización térmica del reservorio de cocción.....	55
Tabla 16. Condiciones experimentales con las que se obtuvieron las muestras.....	56

RESUMEN

Aproximadamente el 50% del consumo de maíz en México es en forma de tortillas, las cuales son preparadas a través del proceso obligado conocido como nixtamalización. El cocimiento de maíz, es un método que se lleva a cabo mediante un tratamiento térmico-alcalino que se realiza en dos etapas, inicia con una cocción de los granos en una solución saturada de hidróxido de calcio, posteriormente los granos se reposan en su mismo licor de cocción, enseguida se presenta una secuencia de operaciones unitarias que comprenden la molienda húmeda del nixtamal para obtener un granulado; a partir de ahí el proceso puede tener dos variantes: en la primera al hidratarse el granulado proporciona una masa para hacer tortillas. La segunda, el granulado, continúa con un secado y una molienda seca para elaborar harinas instantáneas de maíz que hoy en día presenta muchas ventajas debido al ritmo acelerado en que vivimos, ya que reduce considerablemente el tiempo de preparación de las tortillas a solo 20 minutos, ahorro de espacio, menor tiempo de proceso, mejor manejo en su almacenamiento y mayor vida de anaquel. Durante este proceso se fija calcio en el grano que es biodisponible en el organismo humano, sin embargo debido a la pérdida de las estructuras durante el tiempo de reposo el calcio también se pierde. Por lo tanto el tratamiento a que se somete el cereal debe tener un equilibrio entre la pérdida y la conservación del calcio. Por esa razón, en este trabajo se llevó a cabo un estudio detallado de la fijación de calcio en grano total y en las diferentes estructuras de maíz a diferentes condiciones de proceso, empleando tres temperaturas de cocción del grano: 72, 82 y 92 °C y diferentes tiempos de reposo: 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 horas (Gutiérrez, 2006). Se realizó un análisis cuantitativo de la fijación de calcio residual mediante determinaciones por espectrofotometría de absorción atómica, utilizando estándares de calibración de calcio, así como un sistema de referencia para maíz. Los datos experimentales de calcio residual fueron utilizados para la elaboración de curvas que representan el contenido de calcio en grano total a diferentes tiempos de reposo, en pericarpio, germen y endospermo. Se obtuvo la tendencia con respecto al tiempo de reposo y a la temperatura. El comportamiento de calcio residual indica un incremento, posteriormente una pérdida y enseguida un aumento que está relacionado con la fijación de calcio en las estructuras internas del maíz. Al hacer el análisis con respecto a la temperatura en función del tiempo de reposo la tendencia presentada es la misma para todas las temperaturas, pero la concentración de calcio presente en el grano y en las estructuras está en dependencia directa con la temperatura, la mayor fijación de calcio en el grano se presentó a 92 °C, con desplazamientos de los picos máximos al disminuir la temperatura de tratamiento.

INTRODUCCION

En las últimas décadas ha existido un mayor interés científico por entender los cambios fisicoquímicos de compuestos orgánicos tales como biopolímeros y sistemas de alimentos, no únicamente por su importancia en la dieta sino también debido a la necesidad de conocer su evolución durante los procesos de transformación, para poder disponer de su manufactura, manejo y almacenamiento.

Una característica distintiva de la ingeniería en alimentos y de otras disciplinas afines es que se ocupan de la transformación de materiales orgánicos para obtener otros con diferentes propiedades, que resultan de utilidad para la industria y el consumidor. Esta transformación de materia prima a productos elaborados durante los procesos tecnológicos, está conformada por una secuencia de operaciones unitarias donde están inmersos fenómenos de transferencia de masa, calor y de momentum, o una combinación de ellos. Por lo tanto, el ingeniero y el tecnólogo deben ser muy cuidadosos con las condiciones de proceso que manejan para que pueda existir un equilibrio entre las pérdidas de nutrimentos durante cualquier tratamiento y las propiedades que se desean obtener del alimento (Lobo, 1997). Un ejemplo de ello es el cocimiento de maíz con cal para la nixtamalización, es un método ancestral que se lleva a cabo mediante un tratamiento térmico-alcalino para su transformación culinaria, y ha sido practicado por las culturas asentadas principalmente en América central desde la época precolombina hasta el momento, sin haber experimentado grandes modificaciones (Sefa *et al.*, 2003). El proceso es conocido comúnmente como nixtamalización, nombre que procede de dos vocablos de origen Náhuatl, derivado de *nextli* que significa “ceniza ó ceniza-cal” y *tamalli* que significa “masa de maíz” es decir masa que se obtiene con el uso de cal.

La nixtamalización es el proceso más antiguo de la industria alimentaría en México, representativo de la cultura nacional, de suma importancia porque proporciona una gran variedad de alimentos básicos para la dieta de los mexicanos, que están presentes todos los días en su mesa, en cualquier horario, en formas tan diversas como variadas dependiendo de la localidad (Serna-Saldívar *et al.*, 1988; Trejo-González *et al.*, 1982).

Durante el proceso, el cereal cocido e hidratado (nixtamal) sufre modificaciones en el contenido de nutrimentos; sus estructuras como pericarpio, cofia, germen y endospermo, se pierden de manera física y química (FAO, 1993). Algunos de los componentes que son afectados son: fibra soluble, carbohidratos, lípidos, fibra dietética insoluble, vitaminas y proteínas, las que pierden algunos aminoácidos, tales como la arginina, histidina, leucina, lisina y triptófano. Este último aspecto resulta relevante, ya que el maíz es reconocido por su bajo contenido en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano (White y Jhonson, 2003). Para tratar de compensar las deficiencias y pérdidas de estos aminoácidos limitantes por efecto en la cocción alcalina del maíz híbrido normal, se han llevado a cabo diversos trabajos en el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) en el campo de la investigación agrícola, que dieron como resultado la introducción de variedades de maíz con alta calidad proteínica (QPM's por sus siglas en inglés), en donde el contenido de lisina y triptófano se ha elevado de manera considerable en un 100 y 90 % respectivamente con relación al maíz normal. En estos híbridos, el aumento de estos aminoácidos se debe a la disminución en el contenido de prolaminas; en consecuencia, el correspondiente a las albúminas, globulinas y glutelinas se incrementa (Vasal, 2001). Aun cuando se reduce el contenido total de proteína durante la cocción alcalina, se ha reportado un incremento en la velocidad de liberación de alfa aminoácidos, en el valor biológico de su proteína y en la eficiencia proteínica relativa presentada (Bressani y Scrimshaw, 1958; Bressani *et al.*, 1990).

Además, durante el tratamiento térmico-alcalino, también se promueve: a) un importante aumento de minerales, principalmente calcio y fósforo, b) la presencia de proteínas que se hacen biodisponibles y c) cambios deseables como almidón parcialmente gelatinizado, que da una serie de propiedades reológicas y mecánicas a la masa y con ello características particulares al producto terminado muy deseables al consumidor.

La incorporación de calcio al grano se lleva a cabo mediante el fenómeno de transferencia de masa por el mecanismo de difusión, debido a que existe un gradiente de concentración de calcio entre la solución y el maíz, al adicionar hidróxido de calcio a la solución de cocción en combinación con una alta temperatura se promueven cambios fisicoquímicos en la estructura más

externa que rodea al grano conocida como pericarpio, la cual se considera como una barrera a la difusión de agua y de calcio y que está constituida principalmente de una matriz de fibras de hemicelulosa y celulosa.

El pericarpio es la estructura de primer contacto con el licor de cocción, va transformándose al paso del tiempo y durante el proceso modifica su permeabilidad y facilita la difusión al interior del grano, lo que quiere decir que la difusión se lleva a cabo por etapas en las estructuras de maíz y a su vez va promoviendo cambios diferentes debidos a la naturaleza química de cada una de ellas; la magnitud de estos cambios dependerá de las condiciones de proceso establecidas para el tratamiento (Fernández-Muñoz *et al.*, 2004).

Sin embargo, en la literatura se encuentra que cuando se estudian esos cambios, cada investigador utiliza una variedad diferente de maíz y un solo nivel de variación en las variables críticas, es decir, una temperatura de cocción y un tiempo de reposo. Lo anterior dificulta realizar un análisis comparativo entre los trabajos existentes. Por lo tanto, no es posible concluir sobre el tipo de transformaciones físicas que ocurren durante el proceso de nixtamalización. Aunado a que en la República Mexicana las condiciones de proceso varían de acuerdo a la zona geográfica, las costumbres del lugar y la tradición de las familias, por mencionar algunas de ellas. Estas situaciones son comunes cuando no existe una estandarización del proceso de nixtamalización, lo que no ha permitido poder extrapolar datos a nivel industrial. Se requiere entonces tener primero los parámetros controlados y las historias térmicas que aseguren el tratamiento al grano, en otras palabras estandarizar el proceso y posteriormente analizar los cambios al maíz mientras se procesa a diferentes condiciones, para tener un marco referencial en el cual se pueda operar y aplicar a la Industria del maíz.

México es la cuna del proceso de nixtamalización y el principal consumidor de este cereal, por tanto deberíamos ser pioneros en la innovación tecnológica y científica en la industria, y en consecuencia tener el liderazgo mundial en la producción de harinas de maíz nixtamalizado y sus derivados. Esto debe ser un reto a futuro para quienes estamos involucrados en el estudio y entendimiento del proceso de nixtamalización.

Mientras este antiguo tratamiento era casi exclusivo de nuestro país, los estudios existentes hasta hace una década estuvieron basados

fundamentalmente en aspectos nutrimentales, en el almacenamiento y conservación de granos, las condiciones de cultivo, mejora de la calidad del cereal para consumo humano y animal con algunas propuestas alternativas para modificar el proceso de nixtamalización tradicional.

Hoy en día los productos elaborados a partir de maíz han desbordado las fronteras de México con una amplia perspectiva y rápido crecimiento en la comunidad europea y en Estados Unidos (González *et al.*, 2004^a). Pero aun no existe una estandarización normalizada del tratamiento y existe un amplio rango de condiciones de proceso. Además desde el punto de vista de la ingeniería, el método tradicional de nixtamalización ha sido subestimado e ignorado, ya que el equipo es obsoleto, ineficiente y de elevados gastos de insumos; es necesario proponer modificaciones para un apropiado control y eficiencia del proceso dado que no ha logrado reproducirse con éxito a nivel industrial, puesto que este último no supera los estándares de calidad establecidos por el proceso artesanal-tradicional.

Por otro lado los cambios promovidos en las estructuras del maíz han sido poco estudiados, sin establecer la funcionalidad e importancia que en conjunto proporciona cada una de las partes del maíz durante su tratamiento.

El proceso de nixtamalización para la producción de tortillas incrementa considerablemente el contenido de calcio (Serna-Sardívar *et al.*, 1990; 1992). Esta fuente de calcio es extremadamente importante para la gente que tiene en la tortilla su principal alimento. Estudios realizados en ratas alimentadas con tortillas mostraron que crecen mejor, absorben y retienen más calcio que sus contrapartes alimentadas con granos crudos (Serna-Sardívar *et al.*, 1992).

La absorción de calcio es incrementada por la vitamina D y afectada, de manera negativa, por el ácido fítico, oxalatos y la fibra dietética insoluble (Serna-Sardívar *et al.*, 1990). La disponibilidad de Calcio es también afectada por la cantidad relativa de fósforo (Kies, 1985).

Su importancia en la dieta diaria se debe a que el calcio es el elemento mineral más abundante en el cuerpo. Aproximadamente el 99 % de este calcio está presente en los huesos, y el restante (1 %) está en tejidos blandos y fluidos del cuerpo donde está involucrado en una variedad de funciones fisiológicas, tales como la coagulación de la sangre y actividad neuromuscular (Ranhotra, 1986).

Los niveles de ingestión recomendada por día son de 800 mg de calcio. Aunque ingestiones de calcio de 500-600 mg por día podrían ser adecuados para algunas sociedades (Ranhotra, 1986).

El consumo “per capita” por persona de tortilla en México es de aproximadamente 325 gramos diarios. Esta cantidad cubre con el 37 % de los requerimientos de calcio para una persona adulta (Serna-Sardívar *et al.*, 1990). En contraste, la gente que consume maíz sin cocer con cal (África, Colombia y otros países de mundo) suministran menos del 1 % de sus requerimientos por esta vía. Braham y Bressani (1966) encontraron que la biodisponibilidad de calcio en tortillas era alta y que la adición de L-lisina a la tortilla daba por resultado un incremento en la absorción y retención de calcio.

En este trabajo se ha estudiado la concentración de calcio fijado en granos de maíz y en sus principales estructuras, por influencia de las condiciones de proceso previamente establecidas (Gutiérrez, 2006).

ANTECEDENTES

1.1 Historia de maíz

El maíz (*Zea mays*) es quizá la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal. Su origen sigue siendo un misterio, a diferencia de otros cereales. Por mucho tiempo se ha considerado al Teocintle de Chalco (*Zea mays ssp mexicano*) como su probable antecesor y se ha sostenido la hipótesis que es de origen mexicano. Fundamentando en que el Teocintle y el maíz tienen 10 cromosomas y son parcialmente homólogos. El maíz es un híbrido natural entre el Teocintle y una gramínea afín ya extinguida, la cual se caracterizaba por ser una planta que producía el grano en forma de espiga. El Teocintle ha sobrevivido como planta silvestre, mientras que el maíz actual existe y se conserva gracias a la ayuda del hombre (Reyes, 1990). Científicos Paleobotánicos han reportado evidencias de que en el valle de Tehuacan, Puebla y al norte del estado de Oaxaca en el sur de México, se cultivaba maíz desde hace 7000 años. Cualquiera que sea el origen del maíz, lo cierto es que a la llegada de los europeos a nuestro continente, el maíz se cultivaba y constituía la base de la alimentación de muchas de las civilizaciones precolombinas en América, en particular de las asentadas en el actual México y Centroamérica (Castañeda, 1990).

Hay suficiente evidencia de que México fue el centro primario de domesticación y dispersión del maíz y que las migraciones humanas lo fueron poco a poco llevando a otros lugares como Sudamérica (Katz *et al.*, 1974; Paredes-López y Sarharopulos-Paredes, 1983; Trejo-González, 1982).

El maíz era un artículo esencial en las civilizaciones maya y azteca, tuvo un importante papel en las creencias religiosas, festividades y nutrición. A fines del siglo XV, dado el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano fue introducido en Europa a través de España, se difundió entonces por los lugares de clima más calido del mediterráneo (FAO, 1993).

1.2 Definición de maíz: Planta de la familia de las gramíneas, con el tallo grueso, de uno a tres metros de altura, según las especies; hojas largas, planas y puntiagudas; flores masculinas en racimos terminales y las femeninas en espigas axilares resguardadas por una vaina (Kent, 1971).

1.3 Variedades de maíz

- **Maíz dulce** (*Zea mays L. subsp. mays Saccharata*) que se utiliza fundamentalmente para comer como verdura cuando es joven.
- **Maíz de harina o Maíz harinoso o amiláceo** (*Zea mays L. subsp. mays Amylacea*) Es una variedad que posee el contenido de almidón suave y que se utiliza para la elaboración de harina.
- **Maíz de corteza dura o maíz duro** (*Zea mays L. subsp. mays Indurata*) Variedad americana que se caracteriza porque el grano posee una corteza muy dura.
- **Pop corn o maíz reventador o maíz palomero** (*Zea mays L. subsp. mays Everta*) Caracterizado por la capacidad explosiva de la cubierta al ser sometida al calor. Se utiliza para la elaboración de palomitas.
- **Maíz dentado** (*Zea mays L. subsp. mays Indentata*) Cuando madura presenta una gran muesca o depresión en el grano (Desrosier, 1996).

El maíz es un cereal que constituye la base de la alimentación en Latinoamérica, además que es un cereal que se adapta ampliamente a diversas condiciones ambientales, esta es una de las razones del por que se cultiva en gran parte del mundo (Marín-Sánchez *et al.*, 1991). El maíz pertenece a la familia de las gramíneas del género *Zea* y su nombre científico es *Zea mays*, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Características Morfológicas

Nombre común	Maíz
Nombre científico	<i>Zea mays</i>
Familia	<i>Gramineas</i>
Genero	<i>Zea</i>

Fuente: Bender, (1994).

1.4 Características del maíz

La planta mide de dos a cuatro metros de altura, es de raíz fasciculada, está constituida principalmente por formas adventicias (las que se originan del tallo). El tallo es cilíndrico y no ramificado, las hojas son alternas y drísticas (solo una sale de cada nudo), las flores masculinas están situadas en la parte terminal del tallo, agrupadas por partes en algunas espiguillas, a su vez reunidas en un gran racimo de espigas. Las flores femeninas están agrupadas en filas dobles sobre una masa compacta llamada olote, constituyendo inflorescencias llamadas mazorcas que se presentan en las axilas de las hojas y están protegidas por numerosas espatas que reciben el nombre de totomoxtle (de color verde cuando están tiernas y después amarillentas cuando son maduras), las cuales encierran por completo la mazorca y sólo quedan ligeramente separadas del ápice, por donde sale un penacho de largos filamentos o hilos muy suaves de color amarillo-dorado, mejor conocidos como cabellitos de elote (Rojas, 1997).

Los granos de maíz son producidos dentro de una inflorescencia femenina o espiga (mazorca). Esta estructura puede estar formada por 300 hasta 1000 granos, dependiendo del número de hileras, del diámetro y la longitud del olote. El peso de la mazorca puede variar dependiendo del número de granos presentes. El maíz comparado con otros cereales, es el que presenta mayor tamaño, tiene unas diversidades de formas y tamaños debidas a su origen genético y a su colocación dentro de la mazorca. Los granos en la parte superior de la mazorca son largos y redondeados, los del final de la punta son de menores dimensiones y redondos, los de la parte central son aplastados debido a la presión en granos adyacentes durante el crecimiento. El rango del peso de los granos se encuentra entre 100-600 mg. Las medidas promedio del maíz en el centro de la mazorca son: 5 mm de espesor, 10 mm de ancho y 12 mm de largo. El color del maíz depende de la variedad, existen blancos, amarillos, naranjas, rojos, morados, cafés, etc. Sus diferencias en color pueden ser debidas a la genética en el pericarpio, en la capa de aleurona, del germen y del endospermo, ya que cada una de las diferentes fracciones puede presentar distinta coloración (Klaus y Karel, 1991; Paredes-López y Sarharopulos-Paredes, 1982; Watson y Ramstad, 1987; White y Johnson, 2003).

El maíz generalmente es cosechado mecánicamente con contenidos de humedad que van del 18-30 % y ya seco hasta con 13 % para garantizar su almacenamiento prolongado. La dureza del grano es una propiedad intrínseca importante debido a que afecta los requerimientos de la molienda, las propiedades nutritivas, la formación de polvos, la densidad del grano, la densidad volumétrica y la elaboración de alimentos. Esta característica está relacionada con la razón 2:1 del endospermo córneo y endospermo harinoso respectivamente; otra característica importante del grano es la vitreosidad, algunos granos son vítreos o de aspecto traslúcido, mientras que otros son opacos y harinosos. Tradicionalmente se ha asociado la calidad vítrea con la dureza y alto contenido de proteína, y la opacidad con la blancura y escasez de proteína. Sin embargo, la causa de la dureza del endospermo y de su transparencia son diferentes y no siempre se presentan juntas. La dureza es producida por la fuerza de unión entre la proteína y el almidón en el endospermo, fuerza que es controlada genéticamente. La transparencia en cambio, es el resultado de la escasez de cavidades aéreas en el grano, aún no es claro el mecanismo de control, pero parece estar relacionado con la cantidad de proteína (Lange y Hill, 1987).

1. 5 Genética del maíz

El maíz se ha tomado como un cultivo muy estudiado para investigaciones científicas en los estudios de genética. Continuamente se está estudiando su genotipo y por tratarse de una planta monoica aporta gran información ya que posee una parte materna (femenina) y otra paterna (masculina) por lo que se pueden crear varias recombinaciones (cruces) y crear nuevos híbridos para el mercado.

Los objetivos de estos cruzamientos van encaminados a la obtención de altos rendimientos en producción. Por ello, se selecciona en masa aquellas plantas que son más resistentes a virosis, condiciones climáticas, plagas y que desarrollen un buen porte para cruzarse con otras plantas de maíz que aporten unas características determinadas de lo que se quiera conseguir como mejora de cultivo. También se selecciona según la forma de la mazorca de maíz, aquellas sobre todo que posean un elevado contenido de granos sin deformación (Kent, 1971).

Un ejemplo de la importancia de la genética del maíz es su gran aporte en la nutrición de millones de personas en todo el mundo. Los cereales en general tienen baja concentración de proteínas y la calidad de estas es limitada por la eficiencia de algunos aminoácidos esenciales, como la lisina (FAO 1993^b).

Numerosos investigadores han analizado las causas de la baja calidad de las proteínas del maíz; Mitchell y Smuts, hicieron mejoras al completar dietas de proteínas de maíz con un 0.25 % de lisina Braham y Bressani (1968), mostraron que agregar lisina se mejora levemente la calidad de las proteínas; el maíz con alto contenido en lisina es denominado opaco2 (FAO, 1993^a).

Otros estudios indican que es el triptofano y no la lisina el principal aminoácido limitante de las proteínas del maíz, lo cual puede ser cierto en algunas variedades con una concentración elevada de lisina o para productos de maíz que hayan sido sometidos a algún tipo de elaboración. La adición simultánea de lisina y triptofano mejora considerablemente la calidad de las proteínas del maíz (Hogan *et al.*, 1955).

Durante el estudio de la genética del maíz se obtienen nuevos híbridos que han mejorado a este cereal y que puede aportar una mejor fuente de aminoácidos en la alimentación humana.

1.6 Maíz Híbrido

Desde los primeros tiempos del cultivo del maíz en América, los indios pusieron especial cuidado en la selección de las mazorcas destinadas a sembrar en la siguiente temporada. La continuada selección originó muchas variedades y razas nuevas. Estas fueron seleccionadas conforme a su adaptabilidad a diferentes suelos y climas. En 1905 científicos botánicos iniciaron nuevos métodos en la producción de diferentes clases de maíz en los E.U.A. Se descubrió entonces, experimentalmente, que cuando el polen de una planta de maíz fecundaba las mazorcas de la misma mata los granos así originados producían una gran variedad de plantas distintas; algunas eran muy pobres, mientras que otras presentaban características aceptables. Con la repetición de este proceso, y guardando sólo las mejores plantas como semillas para cada raza, se obtuvieron líneas puras (Kent, 1971).

Estas líneas suelen poseer características excelentes, tales como resistencia a enfermedades e insectos. Pueden tener fuertes sistemas de raíces y tallos que les permitan resistir erguidos temporales vientos. Pero todas dichas razas producen menos que las plantas abuelas originarias. Esto parecía hacer poco deseables las nuevas variedades. Pero se observó también que cuando las mencionadas líneas puras se polinizaban en forma cruzada con otras, los granos así producidos con frecuencia daban plantas híbridas más productivas. En algunos casos esos híbridos eran mejores, no solo en cuanto a resistencia a enfermedades y robustez de las cañas, sino que también daban un rendimiento más alto que las viejas variedades que habían servido para seleccionarlas. Así pues, purificando primero, o escogiendo las características más convenientes de las antiguas variedades y luego recombinando éstas, se crearon las nuevas variedades superiores de maíz. Fueron los expertos en genética de los Estados Unidos de Norte América, quienes empezaron a perfeccionar las razas del maíz con dichos métodos; así obtuvieron distintas clases de híbridos, hay varios procedimientos por medio de los cuales las líneas puras pueden cruzarse para producir maíces híbridos. Cuando se cruzan solo dos líneas el resultado es un híbrido simple. Si luego se emplean dos razas de cruce simple para formar un híbrido más complejo, éste se llama híbrido doble. Casi todos los híbridos propagados en los E.U.A. son cruces dobles. La producción de estos híbridos es mucho mayor y la semilla es más barata; lo que explica su gran difusión.

1.7 Maíz QPM (Quality Protein Maize)

A principios de los 60's, en la Universidad de Purdue se descubre un maíz mutante que tenía la característica de presentar el doble en los contenidos de Lisina y Triptofano en la proteína del endospermo, al cual se le conocía como opaco2, a partir de ese momento, creció el entusiasmo por desarrollar híbridos y variedades comerciales con esta característica. El gen opaco2 se conocía desde los años 30's y se utilizaba como gen marcador en trabajos de cartografía, pues este gen se localiza en la región telomérica del brazo corto en el cromosoma 7 de maíz. En México, el Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), desarrolló versiones opacas de los principales híbridos y variedades de maíz comercial, pero en la década de los 70's, se acordó suspender el desarrollo de nuevos maíces opacos, debido principalmente a que éstos presentaban algunos inconvenientes como bajo rendimiento, debido al fenotipo harinoso, además el secado del grano en campo era más lento que los maíces normales, lo anterior lo hacía más susceptible a las plagas de almacén como los gorgojos y palomillas, eran más propensos al ataque de enfermedades de mazorca y grano (Mertz y Nelson *et al.*, 1964).

En un esfuerzo conjunto entre el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), fueron desarrollados diferentes híbridos QPM's experimentales, que posteriormente se evaluaron en el ámbito nacional bajo diferentes condiciones de humedad (riego y temporal). Los híbridos y variedades de maíz QPM's liberados y los que se encuentran en desarrollo, tanto para riego como para temporal, están diseñados para el mercado de la masa y la tortilla, se han considerado las características de calidad que requiere la industria. Sin embargo, debido a la naturaleza de los genes que determinan tanto la calidad nutricional como la modificación del endospermo, no ha sido posible alcanzar en su totalidad los parámetros requeridos para los estándares del proceso industrial, sin embargo existen materiales con buen potencial.

Los híbridos y variedades de maíz QPM liberados y los que se encuentran en desarrollo, tanto para riego como para temporal, están diseñados para el mercado de la masa y la tortilla, se han considerado las características de calidad que requiere la industria. Sin embargo, debido a la naturaleza de los genes que determinan tanto la calidad nutricional como la modificación del endospermo, no ha sido posible alcanzar en su totalidad los parámetros requeridos para los estándares del proceso industrial. A continuación se muestran en la tabla 2 algunas variedades de granos híbridos de maíces QPM en México.

Tabla 2. Variedades de maíz QPM

Variedad de maíz híbrido	Reflectancia (Color)	Peso Hectolitrito (Kg/hL)	Índice de flotación
HV-362C	71	74	21
H-363C	67	76	22
H-364C	69	80.2	24
H-368C	72	74.3	45
H-441C	70	79.3	24
H-442C	70	81.6	12.1
H-469C	73	75.6	30
H-519C	65	78	17
V-537C	60	78	27.5
H-551C	64	82	7
H-552C	64	81	18
H-553C	65	79.4	43

Fuente: Programa de maíz del campo Experimental Bajío, INIFAP (2004).

En la tabla 2 se muestran diversas variedades de maíz QPM que han sido liberados en Mexico; y sus características como color, peso hectolitrito e índice de flotación. Entre las variedades liberadas se encuentra el maíz H-368C que es la variedad de maíz QPM que se utilizó en la experimentación de este trabajo.

1.8 Producción de maíz en México (Estadísticas)

Los granos de maíz pueden ser blancos, amarillos, rojos o azules existiendo estas variedades en distintos países (Kent, 1971). En la tabla 3 y 4 se muestra la demanda de maíz blanco y amarillo por diferentes sectores y su consumo de los mismos. El maíz blanco generalmente es utilizado para la elaboración de tortillas, la harina de maíz nixtamalizada no solo se utiliza para la elaboración de tortillas sino de otros productos típicos de México como son los tamales, que se elaboran de distintas formas en gran parte del territorio nacional. El maíz amarillo tiene gran aplicación para la obtención de almidón que es utilizado en gran parte de la industria alimentaria.

Tabla 3. Demanda anual a nivel nacional de maíz blanco

Sector	Consumo
Harina	3.0 toneladas
Tortilla tradicional	2.8 toneladas
Consumo humano	2.9 toneladas
Consumo animal	8.7 toneladas
Consumo total	10.5 toneladas

Fuente: Cámara nacional del maíz industrializado (2001–2005)

Tabla 4. Demanda anual a nivel nacional de maíz amarillo.

Sector	Consumo
Almidón y sus derivados	2.2 toneladas
Cereales y Botanas	0.4 toneladas
Sector pecuario plantas integrales	3.9 toneladas
Sector pecuario plantas independientes.	2.2 toneladas
Otros consumos del sector pecuario	3.9 toneladas
Demanda total aparente	23.1 toneladas

Fuente: Cámara nacional del maíz industrializado (2001–2005)

El maíz tiene gran aplicación en la alimentación animal, ya que es consumido en grano entero, molido, quebrado y en combinación con otros cereales.

En la tabla 5 se indica la producción de maíz en distintos estados de la República, nos muestra además que la mayor aplicación es el que se destina al consumo humano, teniendo también una gran demanda para consumo de animales.

Tabla 5. Producción de maíz y su aplicación.

Sector	Consumo Humano (ton)	Alimentos Balanceados (ton)	Engordadores (ton)	Almidonera (ton)
Sinaloa	1,461,000	60,000	425,000	50,000
Jalisco	600,000	100,000	80,000	50,000
Chiapas	415,000	30,000		
Bajío	380,000	50,000		10,000
Chihuahua	110,000	15,000	10,000	
Tamaulipas	100,000	20,000	7,000	
Sureste	300,000	20,000		
Valles Altos	200,000	60,000	7,000	
Otros	145,000			
Total Maíz	3,711,000	355,000	529,000	110,000

Fuente: Cámara nacional del maíz industrializado (1994–2005)

La tabla 6 muestra indicadores que hasta el 2005, el consumo de maíz se ha incrementado notoriamente, siendo el destinado a la elaboración de harina de maíz nixtamalizada y a la alimentación animal los que tienen mas demanda. Otros sectores que tiene mucha demanda es el destinado a la industria de alimentos, donde el maíz tiene gran aplicación, ya que se puede obtener el almidón de maíz, entre otros productos y en general el maíz es ampliamente utilizada en la industria de los granos y semillas para la elaboración de botanas y cereales.

Tabla 6. Demanda de maíz en México

Año	HMN ¹	Industria alimentos ² (ton)	ΣCANAMI ³ (ton)	Alimentación Humana (ton)	Alimentación Animal (ton)	Consumos (ton)
2000	2,685.0	2,224.8	4,909.8	2,986.0	4,184.0	12,079.8
2001	2,705.1	2,754.9	5,460.0	2,875.0	6,096.0	14,431.0
2002	2,719.6	2,383.0	5,102.6	2,810.0	7,557.4	15,470.0
2003	2,756.3	2,466.4	5,222.7	2,750.0	8,693.4	16,666.1
2004	2,790.8	2,552.7	5,343.5	2,788.9	5,503.0	13,635.4
2005	3,075.0	2,756.7	5,831.7	2,880.0	6,700.0	15,411.7

Fuente: Cámara nacional del maíz industrializado (2000-2005)

¹ Harina de maíz nixtamalizado

² Almidón, Botanas, Cereales y Semilla

³ Cámara nacional del maíz industrializado

1.9 Composición del maíz

Es importante conocer la composición química del grano de maíz. No solo del grano entero sino también de sus diferentes estructuras del mismo dado que este trabajo contempla el estudio de las estructuras del grano del maíz. En la tabla 7 se muestra la composición química en base seca del grano de maíz entero y de sus diferentes estructuras que son Endospermo, Germen y Pericarpio

Tabla 7. Composición química (base seca) de las partes anatómicas del maíz

Partes del grano	En peso %	Almidón %	Proteína %	Grasa %	Azúcares %	Ceniza %	FCH* %
Grano entero	100	72	10	5	2	1.7	9
Endospermo	83	87	9	1	0.5	0.2	2
Germen	12	8	20	34	12	10	14
Pericarpio	5	7	4	1	0.5	0.3	84

Valores promedio aprox. * FCH= Fibra cruda más hemicelulosas Fuente: (Klaus *et al.*, 1991).

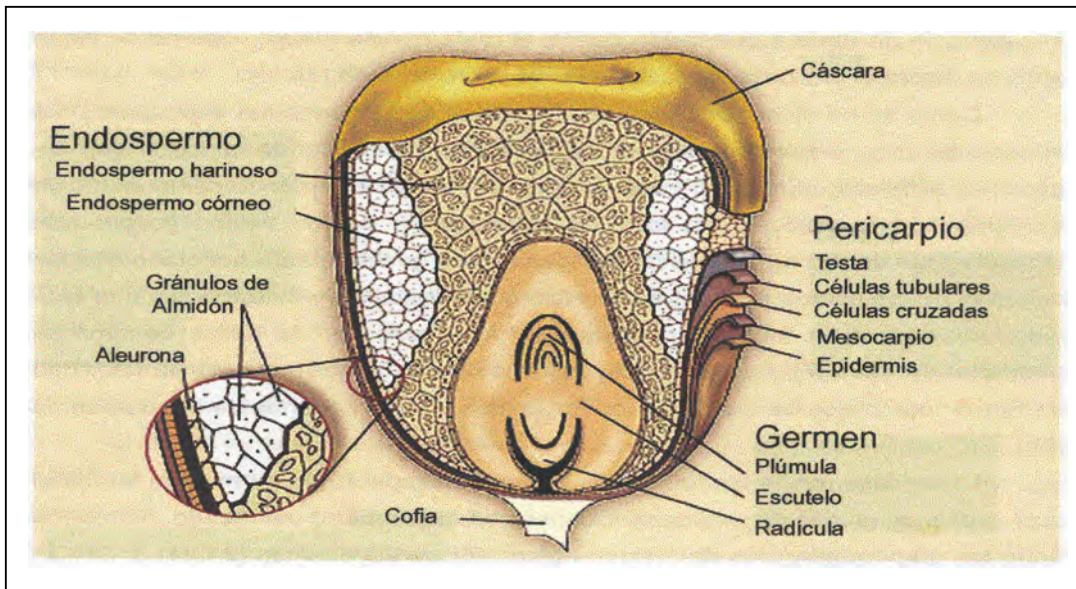
El endospermo cuenta con el mayor porcentaje de almidón, el germen tiene el mayor porcentaje de proteína, grasa y azúcares, y el pericarpio a pesar de ser la parte minoritaria del grano entero tiene significativamente almidón y proteína en su estructura, pero principalmente fibra.

1.10 Estructura del maíz

1.10.1 Cofia

Es la parte minoritaria, representa menos del 1 % del grano de maíz. Es una estructura fibrosa que mantiene al grano unido con el olote y por la cual se transportan los nutrientes que el grano necesita durante la etapa de crecimiento. Dentro de la cofia hay células esponjosas en forma de estrella, conectadas sólo por los finales de las ramas, formando así una estructura abierta que es continua con la capa de células cruzadas del pericarpio. Inmediatamente después de la cofia se expone una capa circular café oscura conocida como capa negra que se encuentra contra la base del germen y del endospermo, esta capa es de separación, con una probable función de sellado de la punta al grano, y sirve como barrera que protege al grano contra la invasión de insectos y microorganismos.

La aparición de esta capa coincide con la madurez fisiológica del grano para suspender el paso de nutrientes al interior (Klaus y Karel, 1991).



Fuente: Hosney. (1991), con modificaciones

Figura 1. Estructura anatómica del grano de maíz.

1.10.2 Germen

El germen comprende el 12 % del grano total. Esta estructura está constituida por grasas (34 %), proteínas (20 %), azúcares (12 %), almidones (8 %), elementos minerales (10 %), fibra cruda y hemicelulosa (14 %), trazas de almidón y otros compuestos (2 %). Aproximadamente el 60 % de las proteínas contenidas en esta estructura son globulinas y albúminas. Al germen podemos localizarlo en la porción más baja del endospermo de acuerdo a la figura 1.

En la estructura del germen se distinguen el embrión y el escutelo; ésta es la estructura que dará origen al nuevo embrión, contiene todas las enzimas esenciales, nutrientes y material genético para producir una nueva planta de maíz. Fundamentalmente en el escutelo están presentes los lípidos como componente mayoritario en forma de gotas microscópicas o esferomas, que tienen un diámetro de 1 a 1.3 micras, compuestas por una membrana de proteínas y lípidos; para que tenga lugar la interacción de los lípidos del germen, los cuales son ácidos grasos (linoleico, oleico, palmítico, esteárico, linolénico, mirístico) con el medio alcalino $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este último debe ser capaz de degradar, al menos parcialmente, la membrana que cubre dichas esferomas. Los lípidos de esta estructura se pueden clasificar en saponificables (susceptibles a hidrólisis en un medio alcalino) y lípidos no saponificables. Dentro de los lípidos saponificables se encuentran los monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos, fosfolípidos, glicolípidos y ácidos grasos libres. Entre los no saponificables, encontramos a los carotenoides, esteroides, tocoferoles, e hidrocarburos alifáticos. Los lípidos saponificables son mayoritarios en el germen, representan el 93 %, de esa parte los triglicéridos y forman la fracción mayoritaria con una abundancia del 85%. Por esta razón y por mera simplicidad es conveniente referir con el término de grasas a los triglicéridos, aunque en realidad comprende a todos los lípidos saponificables presentes. La composición de las grasas del grano de maíz, en términos de ácidos grasos libres resulta aproximadamente en porcentaje en peso de: mirístico 1-2 %, palmítico 7-11 %, esteárico 3-4 %, oleico 25-35 %, linoleico 50-60 %, existiendo también otros que son mayores de 18 carbonos, 1-2 % (Klaus y Karel, 1991).

1.10.3 Endospermo

El endospermo representa aproximadamente del 80-83 % del peso total del grano de maíz en base seca, según se muestra en la figura 1. Está constituido principalmente de un 87 % de almidón, 9 % de proteínas, 1 % de grasa, 0.5 % de azúcares, 0.3 % de trazas de minerales y 2 % de fibra cruda (hemicelulosas), y otros componentes secundarios. Dentro de las células alargadas se encuentran paquetes de gránulos de almidón, los cuales están en celdas que contienen gránulos de 5 a 30 micras, cubiertos en una matriz continua de proteínas hidrosolubles que está ligada al medio granular del almidón. El endospermo almidonoso es de dos tipos, harinoso y córneo o duro, en una relación 2:1. Esta relación está cercanamente relacionada con la dureza del grano; ambos están comprimidos por la matriz proteica que encapsula los gránulos de almidón. La parte harinosa rodea la fisura central del grano y es opaco para transmitir la luz. La opacidad es debida a la refracción de la luz sobre los espacios de aire alrededor de los gránulos de almidón los cuales resultan del desgarramiento de la delgada matriz proteica, la que se encoge durante el secado del grano. En esta parte, debido a que la matriz no se alarga completamente, los gránulos asumen una forma redondeada. El endospermo córneo se encuentra principalmente a los lados del grano, tiene entre 1.5 a 2.9 % mayor contenido de proteína que el harinoso. La matriz proteica que lo cubre es más gruesa, la cual se compone de material proteico amorfo, donde están insertados cuerpos proteicos discretos que a su vez están compuestos casi completamente de zeína, prolamina cuya composición carece prácticamente de lisina, un importante aminoácido esencial. La matriz permanece intacta durante el secado, ahí los gránulos de almidón se encuentran comprimidos en forma poliédrica, son de aspecto traslúcido y no tienen cavidades aéreas, además presenta la peculiaridad de transmitir la luz.

Por otro lado, las proteínas presentes en el endospermo representan el 75 % de la proteína total del grano. El contenido proteico esta influenciado por la disponibilidad de nitrógeno del suelo donde fue cultivado y por la genética del grano, los cambios en el contenido total de la proteína son en la parte interna a nivel del endospermo periférico, principalmente de la zeína (Klaus y Karel, 1991; Watson y Ramstad, 1987).

1.10.4 Pericarpio

El pericarpio es la parte más externa del grano, como lo muestra la figura 1, y cubre por completo al endospermo y al germen, y se le conoce también como cubierta de la semilla. Desde el punto de vista morfológico, el pericarpio se manifiesta como un conjunto de fibras de celulosa inmersas dentro de una matriz formada por hemicelulosa y lignina. Es una estructura muy delgada formada por capas celulares. Su espesor varía de 62 a 160 micras de acuerdo a la evaluación realizada en diferentes variedades de maíz.

Todas las partes del pericarpio están compuestas por células muertas que son tubos celulósicos excepto la capa de semilla más interna o testa (Klaus y Karel, 1991).

El pericarpio representa aproximadamente el 5 % en peso del grano total de maíz, está compuesto mayoritariamente por fibras celulósicas naturales: como son las hemicelulosas con un 67 % y las celulosas con un 23 %. Ambas están compuestas de cadenas construidas a partir de la unidad básica de azúcar, unidas mediante puentes glucosídicos; en ellas se incluyen los ácidos poliurónicos, que son polisacáridos con grupos ácidos en el carbono 6 de la unidad monosacárida.

La lignina, aunque no es un polisacárido, aparece generalmente asociada a las fibras celulósicas, sus unidades estructurales son derivadas del 3,4 dihidroxifenil-propano.

Entre los componentes secundarios del pericarpio se encuentran: almidones (7 %), proteínas (1.4 %), grasas (1 %), azúcares (0.5 %) y lignina (0.1 %). La mayor parte de los lípidos del pericarpio son esteroides y alcoholes alifáticos derivados de la película de ceras que forman la epidermis (capa más externa), además estos lípidos son no saponificables.

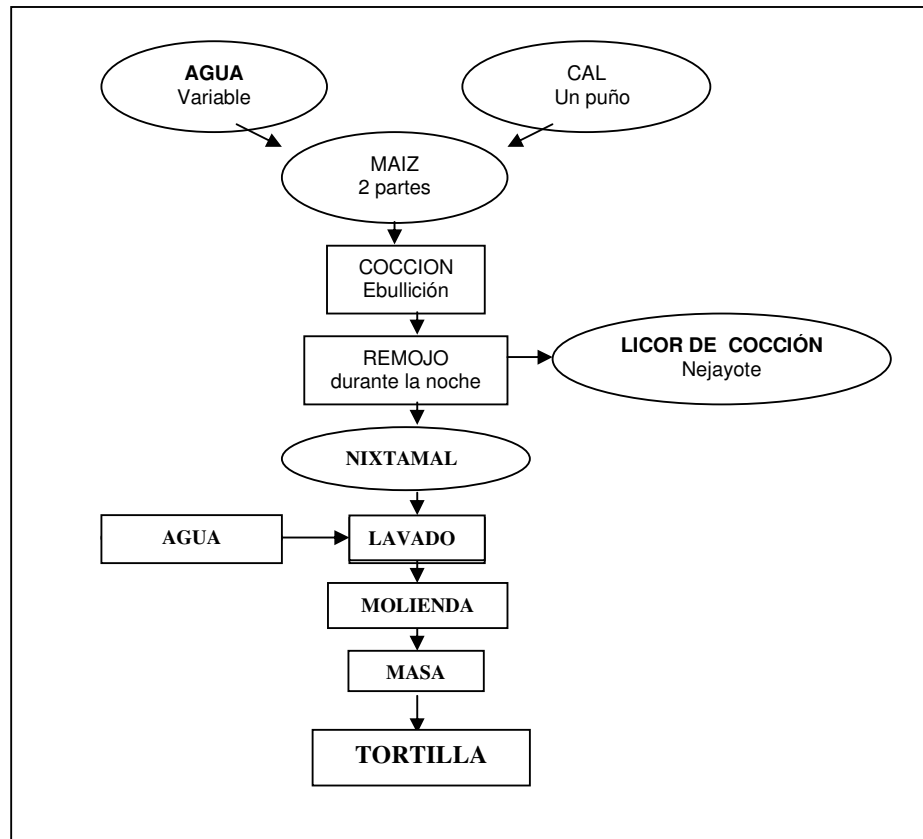
La pared celular que integra a las células del pericarpio está constituida por xilosa, arabinosa, galactosa, ácido glucurónico, glucosa, proteína, ácido paracumárico, ácido ferúlico, ácido diferúlico, ácido triferúlico, ácido acético y celulosa.

Las capas del pericarpio se describen del interior a exterior como muestra la figura 1. La capa de semilla o testa es la más interna del pericarpio, imparte propiedades semipermeables al grano y se adhiere firmemente a la superficie externa de la capa de aleurona. Después se encuentra la capa de células

tubulares, la cual es una hilera de tubos longitudinales con una distribución grande de espacio intercelular, presionados fuertemente a la testa. Posteriormente existe un área muy compacta llamada capa de células cruzadas, su característica distintiva son los cruces de capas que están tensadas en forma tangencial alrededor del grano, ésta se encuentra cubierta por una capa conocida como mesocarpio, que representa aproximadamente el 90 % de la masa total del pericarpio; está formada por células alargadas, empacadas y con numerosos hoyos, interconectados con los tubos de la capa de células tubulares, lo cual facilita la absorción de agua. Finalmente la capa más externa del pericarpio es la epidermis, está formada por una capa cerosa que le permite retardar el intercambio de humedad y le da brillo al grano (Watson y Ramstad, 1987).

Por estudios con espectros de resonancia magnética nuclear (NMR ^{13}C) en muestras de pericarpio, se han identificado que los componentes mayoritarios son principalmente hemicelulosa, celulosa, y en menor proporción proteínas, pectinas, almidón, grasas, y lignina (Martínez *et al.*, 2001). El pericarpio es la principal fuente de fibra en el grano, y es recomendable que durante el tratamiento térmico-alcálico se elimine parcialmente ya que es responsable del color indeseable de los productos procesados; sin embargo, su eliminación total durante el proceso ocasiona que los productos intermedios como la masa y harinas de maíz requieran mayores aditivos para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas que repercuten en la textura y flexibilidad de las tortillas. En estudios más recientes de muestras de pericarpio separadas del maíz se ha identificado a la hemicelulosa como un polisacárido de pentosa, conteniendo xilosa, arabinosa, galactosa, ácido glucurónico, glucosa, almidón, proteína, ácido cumárico, ácidos fenólicos (principalmente ácido ferúlico, ácido diferúlico, ácido triferúlico), ácido acético, ácido urónico, galactoglucano. La presencia de ferulatos en la fracción de fibra insoluble ligando cadenas de polisacáridos (arabinoxilanos) le proporciona integridad y firmeza a la pared celular junto con la lignina y la celulosa (González *et al.*, 2004^a).

1.11 Proceso de Nixtamalización Tradicional



Fuente: Illescas, (1943)

Figura 2. Diagrama tecnológico de nixtamalización tradicional.

La nixtamalización artesanal, es un proceso empleado para cocer el grano de maíz y obtener una masa con ciertas propiedades funcionales. Principalmente se realiza en México y en América central para elaborar tortillas y otros alimentos. Consiste en someter al grano de maíz a una serie de tratamientos drásticos, poco comunes en la industria alimentaria para cualquier tipo de alimento. Este proceso fue descrito por primera vez tal y como se realiza en México por Illescas (1943).

El método tradicional-artesanal de procesamiento del grano de maíz a la tortilla, utilizado en México, se muestra la figura 2. Consiste en colocar en un recipiente un puño de cal (aproximadamente 150 g) para dos cuartillos de maíz (5 kg) y

agua (cantidad variable). El maíz se lleva a cocimiento a temperaturas altas hasta que hierva, así se mantiene durante algunos minutos, después se suspende el calentamiento. Posteriormente se deja remojar a temperatura ambiente durante toda la noche en su mismo licor de cocción. Al día siguiente se drena el nejayote o solución alcalina y se lava el maíz dos veces.

El nixtamal lavado se muele en un metate y después en un molino manual de tornillo sinfín. Durante la molienda el nixtamal se tritura hasta formar partículas finas y gruesas. El granulado obtenido se hidrata y forma una masa plástica que es la base para la manufactura de tortillas y de otros productos nixtamalizados (Illescas, 1943).

1.11.2 Cambios fisicoquímicos durante el proceso de nixtamalización

Originalmente la nixtamalización tenía como propósito principal hacer disponibles algunas proteínas, gelatinizar parcialmente el almidón, remover el pericarpio e incorporar calcio al grano de maíz para elevar niveles nutricionales (Martínez *et al.*, 2001; González *et al.*, 2004). Hoy sabemos que este proceso logra muchos otros cambios fisicoquímicos no menos importantes que los anteriores que son necesarios para las transformaciones fisicoquímicas en el grano de maíz y que suceden a diferentes niveles con las variables críticas, las cuales son: la temperatura de cocción, el tiempo de reposo, la concentración inicial de hidróxido de calcio. Durante el proceso se favorecen algunos fenómenos y se inhiben otros.

Cada una de las estructuras mayoritarias del maíz es afectada de distinta forma, puesto que sus componentes químicos interaccionan por mecanismos diferentes con el calcio como a continuación se describe:

Durante la cocción y el reposo en el pericarpio hay una absorción de agua, suavizando y ablandando tejidos celulares, provocando hinchamiento y cambio de volumen al grano. El álcali actúa sobre los componentes de la pared celular degradándola, se modifica la permeabilidad del pericarpio facilitando la entrada del agua y la solución alcalina (Gutiérrez *et al.*, 2006). Después se presenta la precolación de esta estructura, luego el pericarpio se remueve, presentando primero una dilución de sólidos solubles (pectinas) presentes en el pericarpio y

una modificación en la matriz fibrosa al neutralizarse los ácidos urónicos de la hemicelulosa desprendiéndose las fracciones de hemicelulosa y lignina; estos sólidos insolubles se depositan en el nejayote formándose una suspensión, que con el tiempo sedimenta fracciones de calcio y de otros componentes del grano. Al neutralizarse los grupos ácidos por el hidróxido de calcio fijan calcio, donde forma sales con el ácido poliurónico y/o enlazados con grupos fenólicos derivados de la lignina, los cuales se oxidan, otorgándole un color no deseable a los productos nixtamalizados (González *et al.*, 2004^a; Serna *et al.*, 1988).

Una alta concentración de calcio forma compuestos amarillentos, la intensidad del color está estrechamente relacionada con los pigmentos carotenoides, flavonoides y el pH, por último hay una lixiviación del pericarpio en el nejayote, licor donde se llevo a cabo la cocción, por lo tanto hay una pérdida importante de materia que incluye fracciones de componentes estructurales del maíz, como el pericarpio, germen, endospermo, fibra dietética, carotenoides y calcio (Rooney *et al.*, 1995).

Las pérdidas de materia pueden variar de 1.08 % hasta 6.55 % dependiendo de la temperatura en que es cocido el grano, de la concentración de calcio, del tiempo de reposo, de la variedad de maíz y de la técnica de lavado utilizada (Sahai *et al.*, 2001; Serna Saldívar *et al.*, 1990; González *et al.*, 2004).

Se ha reportado que el pericarpio es la estructura que retiene la mayor cantidad de calcio, sin embargo representa una fracción muy pequeña del total del grano, una parte de esta estructura, junto con el calcio quedan en el nejayote durante la etapa de reposo del proceso y finalmente eliminados durante la etapa de drenado y lavado.

Durante la nixtamalización las proteínas de más bajo peso molecular, localizadas en el germen alteran los patrones de solubilidad, pasan al nejayote. Otro de los componentes que es más susceptible a presentar cambios durante el proceso térmico-alcálico es el germen que fija calcio al interactuar con los lípidos saponificables.

En un medio alcalino como la nixtamalización ocurre la hidrólisis de las grasas a través del mecanismo conocido como saponificación, es decir la formación de sales, de ácidos grasos y glicerina. Se ha reportado que el germen retiene 4 veces más calcio que el endospermo, la razón calcio-fósforo se ve incrementada significativamente, lo cual favorece el valor nutricional de la

tortilla y se acerca a la proporción requerida 1:1 de estos macro elementos (González *et al.*, 2004^a).

En el endospermo se localiza el almidón y durante la nixtamalización existen gránulos de almidón, parcialmente gelatinizados, otros sin gelatinizar, y otros completamente gelatinizados.

El almidón de maíz tiene una temperatura promedio de inicio de la gelatinización de 62-70 °C dependiendo de la variedad. Los gránulos gelatinizados funcionan como pegamento en la masa, el pericarpio remanente, que ha sido transformado en gomas solubles, es el componente que da cohesividad a la masa, el pH alcalino y el calor provocan rompimientos de algunos puentes de hidrógeno, además de la disociación de los grupos hidroxilo en las unidades de glucosa de las cadenas de amilosa y de amilopectina, lo que lleva a obtener polímeros con una carga negativa y que puede formar puentes de calcio, formándose una red continua que permite que la masa desarrolle flexibilidad, además este proceso disminuye la retrogradación del almidón (Fernández *et al.*, 2002). Un almidón completamente gelatinizado durante el proceso, ocasionado por cocimiento sobrado produce masas pegajosas, que son difíciles de manejar, por otro lado, cocimientos menores, produce masas que no presentarán característica de cohesividad (Bello *et al.*, 2002).

En el endospermo se libera niacina y se disuelven parte de las proteínas que rodean a los gránulos de almidón, están contenidas en forma de cuerpos discretos de una matriz.

La proteína prolamina, zeína, es típica en esta zona, tiene poca solubilidad en agua, y sus puentes disulfuro no se rompen en condiciones alcalinas, lo cual puede explicar, que esta proteína no es determinante para que desarrolle flexibilidad (Badui, 1999). En cuanto a las proteínas, hay una desnaturalización, particularmente las glutelinas, lo que las hace más digeribles. El tratamiento térmico–alcalino acrecienta también la disponibilidad biológica de la lisina y el triptófano, dado que la mayor parte de estos aminoácidos esenciales están contenidos en la fracción de glutelinas. La niacina que se encuentra formando un compuesto polipéptido en el maíz, que lo hace indisponible, se libera de dicho compuesto por hidrólisis alcalina, consecuentemente los consumidores tendrán mayor aporte nutricional. La susceptibilidad enzimática del almidón se

incrementa ligeramente conforme se va cocinando el maíz con la cal, sin embargo el mayor incremento se presenta durante la molienda y en el horneado, el pH de las cadenas de glucosa de la amilosa y la amilopectina aumenta, lo que ayuda a ser más lenta la retrogradación (recristalización del almidón) y a mantener las tortillas frescas. Han sido examinados los gránulos de almidón en microscopio con luz polarizada, y la mayoría de ellos, exhiben una refringencia; sin embargo la cruz de malta es menos clara y más ancha que de los gránulos de almidón naturales (Gómez *et al.*, 1989).

Así pues, la estructura del gránulo de almidón natural se descompone parcialmente durante la cocción, la cual estaba confirmada por un patrón de rayos X menos organizado. Sin embargo las alteraciones en la cristalinidad del almidón ocasionada por la cocción se restauran parcialmente por una recristalización o recocido durante el remojo (Gómez *et al.*, 1989, 1991). La reasociación de las moléculas de almidón puede afectar en forma considerable las propiedades reológicas de los productos hechos a base de la masa.

Durante el proceso de nixtamalización tradicional en el endospermo se saponifican los lípidos en la capa de la aleurona, formando sales de calcio con los ácidos grasos, esta presencia de sales disminuye la temperatura a la cual inicia la gelatinización. Hay un hinchamiento de las regiones amorfas del almidón, debido a la difusión y absorción de agua, hay una ruptura de las estructuras granulares debido a la hidratación, a medida que aumenta la gelatinización, hay una disolución de las moléculas de amilosa. Se forman compuestos de inclusión con ácidos grasos y la amilosa gelatinizada, que cristaliza como amilosa tipo V, el progresivo hinchamiento de los gránulos de almidón produce la desintegración total de la estructura granular, este desorden estructural produce la exudación de la amilosa, ocasionando la gelación del almidón.

Además en este complejo sistema disperso que se formó, la reasociación de la amilosa y la amilopectina, dependen del tiempo y de la temperatura, lo que constantemente cambia el contenido y la distribución del agua, esto se refleja en las propiedades reológicas y texturales de los productos elaborados a partir de masa o harina (capacidad de absorción), por tanto la distribución uniforme de agua en el nixtamal se consigue durante la etapa de reposo (Biladeris, *et al.*, 1986, 1990, 1991; Bello *et al.*, 2002).

Durante la molienda húmeda del nixtamal para producir masa, los gránulos de almidón también se gelatinizan debido a la fricción que se genera en las dos piedras moledoras, en algunos casos la molienda puede incrementar la temperatura de la masa entre un rango de 26 y 52 °C. Aproximadamente del 4 al 7 % de los gránulos de almidón pierden completamente la birrefringencia durante la cocción con cal, el reposo y la molienda. Muchos de los gránulos de almidón tienen una forma irregular y con frecuencia sólo parte (menos del 60 a 70 %) de un gránulo individual presenta birrefringencia. Estos cambios pequeños pero importantes, en la fracción del almidón de maíz modifican las propiedades de pasta del almidón, a fin de que exista esa característica de textura en los productos de maíz.

El 4-7 % del almidón gelatinizado forma el pegamento que ayuda a que exista una red continua entre los gránulos de almidón libres y el resto de componentes que forman la masa (Rooney *et al.*, 1995).

La mayor parte de la birrefringencia y la cristalinidad del almidón se pierden cuando los discos de masa son cocidos en forma de tortillas. La combinación de calor (280 a 310 °C) y un alto contenido de humedad (51 a 54 %) facilitan una mayor gelatinización del almidón. Sin embargo aún continúan gelatinizándose en el corto tiempo de cocido (de 20 a 40 segundos). El resultado de estos cambios es una típica tortilla con una textura semiplástica y plegable. El sabor de la tortilla puede mejorarse mediante las reacciones de Maillard que se presentan mientras se reducen los azúcares, los péptidos y los ácidos grasos insaturados. Al freír las tortillas, la humedad se evapora, siendo sustituida por aceite para freír y los gránulos de almidón pierden por completo lo que les quedaba de birrefringencia y cristalinidad. Los geles de almidón que se forman son con menos del 5% de gránulos birrefringentes y un patrón amorfo de rayos X se presenta (Rooney, *et al.*, 1995).

El uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como álcali, es fundamental para conseguir las propiedades mencionadas en las masas, con otros iones monovalentes como hidróxido de sodio ó potasio, no se obtienen buenos resultados en lo concerniente a propiedades plásticas de la tortilla (Badui, 1999; Fenema, 2000; Trejo *et al.*, 1982).

Durante las etapas críticas cocción y reposo del proceso de nixtamalización tradicional, los cambios físicos que se provocan al maíz facilitan la molienda, y

con eso un menor gasto de energía en los molinos, porque se suaviza en grano por la entrada de agua y la difusión de iones de calcio, que ocasionará cambios químicos como ya se menciono la desnaturalización de las proteínas del germen y del endospermo y la gelatinización del almidón, lo que dará como resultado un producto o masa obtenida de nixtamal,

Una adecuada hidratación de los componentes del maíz, un cuidadoso perfil térmico, una buena técnica de lavado van a darle las características reológicas deseables en la masa como son una viscosidad relativa, pegosidad cohesión, elasticidad, etc. Y muchos de estos cambios tienen una marcada influencia sobre las propiedades de textuales de los productos finales como son rollabilidad, elasticidad, color, olor y sabor de la tortilla. Existen también proteínas hidratadas e hidrolizadas, lípidos y iones de calcio. Las harinas de maíz nixtamalizado debe cumplir con ciertas características al ser hidratada, como son: color, aroma, capacidad de retención de agua, cohesividad, consistencia, y la cualidad de desarrollar flexibilidad, una vez que se transforme en tortilla, estas propiedades que desarrolla, se deben a los cambios que sufre el almidón, los componentes del pericarpio y del germen a lo largo del proceso, durante la nixtamalización.

La nixtamalización favorece algunos parámetros nutricionales de este cereal y empeora otros, de los efectos negativos de la nixtamalización se encuentran perdida de vitaminas que van desde un 30 hasta un 70 %, durante la cocción, reposo y lavado, también se pierde parte de la fibra dietética localizada en el pericarpio, así como tiamina, riboflamina y carotenoides, algunas proteínas, grasas y minerales.

Entre los efectos positivos de la nixtamalización puede citarse, además del mejoramiento de las características reológicas un aumento en la relación isoleucina-leucina, que son dos aminoácidos indispensables en la alimentación humana. Durante la cocción alcalina se rompe la ligadura de niacina a la estructura del grano y este importante nutriente se hace biodisponible, este hecho se ha empleado para explicar la ausencia de la enfermedad conocida como Pelagra. En los países consumidores de tortilla. La nixtamalización es responsable también de la disminución de *micotoxinas* como *fumonisin* (producidas por varias especies de hongos *Fusarium*) y de la reducción significativa de los contenidos de aflatoxinas, (agentes tóxicos y

hepatocarcinogénicos, producidos por los hongos *Aspergillus parasiticus* y *A. flavus*).

Existe también un notable incremento de calcio en el maíz nixtamalizado, unas 20 veces mayor que el no tratado, este macro elemento es indispensable en la nutrición humana, una insuficiente ingestión puede dar lugar a raquitismo, osteomalacia, osteoporosis, cáncer de colon y de la glándula mamaria, así como hipertensión arterial, además de que es un constituyente fundamental de los huesos y dientes. Por otro lado el calcio iónico participa en funciones tales como: relajación-contracción del corazón, contracción muscular, coagulación sanguínea, entre otras (Bressani *et al.*, 1990).

1.12 Harina de Maíz Nixtamalizada

El maíz se consume en muchas formas distintas, desde la sémola como pan de maíz, para rosetas y productos como los copos de maíz, totopos, tostadas, tamales, entre otros productos (Rooney *et al.*, 1995).

Desde hace siglos el maíz ha sido utilizado directamente como alimento humano en América Latina. Prácticamente, en todas las versiones, se forma primeramente con el maíz una masa. El método tradicional, que todavía se practica en zonas de Latinoamérica (Hoseney, 1991).

De acuerdo con información de Grupo Industrial Maseca (Gruma), el destino principal del grano, tanto para consumo final como intermedio, es la elaboración de tortillas de forma doméstica e industrial (Reyes, 1990). Los mexicanos consumimos 325 gramos diarios de tortilla. En algunas áreas rurales de México y América Central, el consumo de tortillas de maíz provee alrededor del 70 % de las calorías y la mitad de las proteínas en la dieta diaria (Paredes-López y Saharopulos, 1982). Desde que se liberó el precio de este producto, ha crecido el número de tortillerías de 38 mil a 47 mil puntos de venta. El precio ha aumentado hasta 65 por ciento en el mismo lapso. La tortilla de maíz es uno de los alimentos básicos de México, y si bien gran parte se obtiene de la producción para autoconsumo, la elaboración de tortillas a partir de harina industrializada es cuantitativamente importante y su utilización tiende a aumentar (Girald, 1994).

La harina refinada y la harina integral de maíz pueden ser consideradas como vehículos en los programas de fortificación puesto que son alimentos básicos en muchas partes del mundo.

La harina de maíz nixtamalizada es el producto que se obtiene de la molienda de los granos de maíz, sano y limpios; previamente nixtamalizados y deshidratados.

La harina de maíz nixtamalizada es reconstituida con agua produciendo masa y es procesada en forma de tortillas; también se puede extruir la masa con un extrusor para producir Corn Chips.

La importancia de poder manejar la masa para su posterior venta y reparto a las zonas donde es comercializada, para que a partir de ella se elaboren los diferentes productos que se obtienen normalmente de esta, y dada la gran demanda de estos productos en regiones diferentes a donde se produce la

masa nixtamalizada de maíz, se ha implementado un proceso industrial que permite la utilización de dicho material en zonas alejadas de los centros de producción y utilizarlas en tiempos posteriores a su elaboración. En México las harinas instantáneas han adquirido popularidad entre la población urbana debido a que eliminan las labores intensivas y tediosas del proceso tradicional; hoy en día presenta muchas ventajas debido al ritmo acelerado en que vivimos, ya que reduce considerablemente el tiempo de preparación de las tortillas a solo 20 minutos, ahorro de espacio, tiempo de proceso, mejor manejo en su almacenamiento y vida de anaquel (Gómez *et al.*, 1989; Bedolla *et al.*, 1984).

Desde que se incorporó el tratamiento artesanal a las filas de un macro proceso, su ingeniería sigue siendo la misma, sin haber cambios significativos que hayan hecho uso de los conocimientos científicos. Pensando con optimismo se puede decir que el proceso esta en desarrollo, encontrándonos en una etapa de acumulación cuantitativa de resultados científicos que en un futuro darán lugar a cambios en la tecnología, por que aun existe un conjunto de aspectos que requieren investigación y entendimiento para su aplicación en los productos elaborados a partir de maíz que hoy en día han desbordado las fronteras de México con un amplia perspectiva y un rápido crecimiento en la comunidad europea y en Estados Unidos (González *et al.*, 2004^a).

Las plantas industriales que producen la harina de maíz nixtamalizada, utilizan tecnología mecanizada del proceso, emplean básicamente los mismos pasos que se siguen en el proceso tradicional, solo que en este proceso industrial la masa se somete a etapas adicionales como la etapa de secado y molienda (Vargas-López, 1992).

En condiciones de almacenamiento adecuadas, la harina nixtamalizada presenta una vida de anaquel que varía de 6 a 8 meses, (Gómez *et al.*, 1989; Rubio, 1989; Vargas López, 1992). El incremento de costos, carencia de olor y textura son las principales desventajas de productos preparados de masa deshidratada. Las tortillas preparadas con harina instantánea son frágiles y pálidas y se deshidratan rápidamente, quebrándose en la parte central debido a que sus moléculas no realizan la interacción necesaria (Gómez *et al.*, 1989). Cantidades significativas de energía son usadas para secar la masa; aunque la eficiencia de energía del proceso es buena, los costos más bajos de línea para deshidratación de la masa son altos por unidad de producto, en relación a

masa fresca preparada directamente a partir de maíz. La demanda bioquímica de oxígeno en el tratamiento de su alto nivel de sólidos solubles y el gran volumen de nejayote de desecho, es uno de los mayores problemas que enfrenta la industria de la tortilla. También, la masa y la tortilla presentan menor vida de anaquel en relación a las preparadas por el proceso convencional. La rehidratación de la harina instantánea presenta menor plasticidad y cohesividad que la masa fresca (Gómez *et al.*, 1989).

Diversas investigaciones relacionadas con aspectos fisicoquímicos y nutricionales de la tortilla se iniciaron en 1953, con la finalidad de hacer más eficiente el proceso tradicional de nixtamalización. Estas investigaciones consideraron básicamente aspectos de relación agua:maíz, concentración de cal, temperatura y tiempo de cocimiento, reposo del grano cocido y molienda, sin modificar las características básicas del proceso de nixtamalización (Vaqueiro y Reyes, 1986). Posteriormente, en la década de los 70's se realizaron varias investigaciones con la finalidad de reducir tiempos de procesamiento mediante el cocimiento con vapor de agua, reduciendo los tiempos de cocimiento y la eliminación de la etapa de reposo (Industria de ensambles, 1990). No obstante, la calidad de la masa y la tortilla no fue satisfactoria (Katz *et al.*, 1974).

Los requerimientos especificados en la norma mexicana para la harina de maíz instantánea para elaborar tortillas se presentan en la tabla 8; además de presentar las siguientes especificaciones físicas: las tortillas deberán resistir la prueba del doblado; es decir al doblarse no deberán formar grietas. La finura de la harina será tal que el 75 %, como mínimo pasara a través de malla 60 (abertura de 250 micrones).

Tabla 8. Requerimientos específicos para harina instantánea de maíz

Componente	Porcentaje al envasar
Humedad	10 %
Genizas	2 %
Proteínas	7.5 %
Fibra cruda máxima	3 %
Extracto etéreo	5 %

Fuente: Del Valle, 1972

1.12.1 Efectos benéficos del proceso alcalino

El proceso de nixtamalización induce cambios importantes en el valor nutricional. La utilización de hidróxido de calcio durante la nixtamalización del maíz y la alta biodisponibilidad del calcio en la tortilla, evitan el desarrollo de osteoporosis que se puede manifestar como disturbios relacionados con el tejido óseo que son virtualmente desconocidos por los consumidores de tortilla. El contenido nutritivo, calidad de proteínas y el crecimiento de la biodisponibilidad del calcio ha sido estudiado por muchos investigadores en el maíz y productos derivados del mismo (Poneros y Erdman, 1998; Serna Saldívar *et al.*, 1990; 1992; Trejo-González *et al.*, 1982) analizaron las variables del proceso de nixtamalización de maíz (tiempo, temperatura y concentración de cal) para la preparación de tortillas a partir de 18 variedades de maíz y reportaron un crecimiento en el contenido de calcio aproximadamente 4.5 veces, una disminución en el contenido de proteínas (de 11.0 a 10.6 %), fibra cruda (2.3 a 2.0 %) y extracto etéreo (5.1 a 4.5 %).

Como la mayoría de los cereales, el maíz es deficiente en los aminoácidos esenciales lisina, triptófano y de la niacina (vitamina del complejo B) que previene la pelagra y que es sintetizada a partir del triptófano (Katz *et al.*, 1974; Paredes-López y Saharópulos-Paredes, 1983; Vargas-López, 1992). El efecto del hidróxido de calcio sobre el valor nutricional incluye el incremento en la biodisponibilidad de niacina, debido a la liberación del ácido nicotínico durante el tratamiento alcalino (Bressani, 1990; Serna-Saldívar *et al.*, 1990). Este tratamiento también mejora la relación calcio/fósforo del grano, por lo que se favorece la bioutilización del ión calcio (Bressani, 1990). La serie de cambios físico-químicos que se realizan durante el proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas, hacen que la tortilla mejore su calidad nutricional en relación al maíz crudo.

La nixtamalización resulta en un aumento del valor biológico de la tortilla mediante la desnaturalización selectiva de las proteínas del maíz, por una parte la zeína que es una proteína que representa del 39 % de las proteínas totales del maíz y es pobre nutricionalmente, reduce su solubilidad durante el cocimiento alcalino, por otra parte la glutelina que representa el 40 % y es rica nutricionalmente, incrementa su solubilidad haciéndola más digerible,

aumentando los aminoácidos esenciales lisina, triptófano, histidina, metionina y treonina; también la disponibilidad de niacina y sus precursores parecen ser aumentados (Bressani *et al.*, 1958; Bressani y Scrimshaw 1958; Paredes-López y Saharópulos-Paredes, 1983). Esto explicó los mejores perfiles de crecimiento en experimentos con ratas y cerdos alimentados con tortillas comparados con aquellos alimentados con maíz sin procesar (Bressani *et al.*, 1958; Bressani y Scrimshaw 1958; Katz *et al.*, 1974; Paredes-López y Saharópulos-Paredes, 1983). El cocimiento alcalino de maíz mejora selectivamente su calidad nutricional aumentando al balance de aminoácidos esenciales: la cantidad relativa de lisina es incrementada 2.8 veces, triptófano es incrementado ligeramente, y la relación relativa y absoluta es isoleucina a leucina son incrementadas 1.8 veces. La lisina es liberada haciéndola disponible para su aprovechamiento.

Los contenidos de fósforo, hierro y calcio son incrementados 15, 37 y 210 % respectivamente, durante el proceso de nixtamalización ocurre la destrucción de *Aspergillus flavus* en maíz contaminado (Trejo-González *et al.*, 1982).

1.12.2 Importancia del calcio en la dieta

El contenido de calcio (Ca) en la dieta es una de los problemas más difíciles de cubrir en los países en desarrollo, esto se debe principalmente a lo escaso y al alto precio de los productos de la dieta, el bajo contenido de calcio de los cereales, y la alta incidencia entre la población de intolerancia a la lactosa (Serna-Saldívar *et al.*, 1990). El problema es más acentuado en infantes y mujeres embarazadas y en etapa de lactancia, ya que requieren de mayor cantidad de calcio para el desarrollo del tejido óseo y la secreción de leche, respectivamente. La digestión crónica de bajos niveles de calcio esta asociada con el desarrollo de osteoporosis (adelgazamiento del tejido óseo), y es también una de las principales enfermedades que afectan a mujeres en etapas post- y premenopausiales y hombre en edad avanzada (Poneros y Erdman, 1998; Albanese *et al.*, 1986). El consumo de alimentos que contengan alta biodisponibilidad de calcio durante toda la vida podría prevenir o postergar la aparición o desarrollo de dichas enfermedades en la etapa de edad avanzada. En las mujeres en etapa post-menopausia, aunque los ejercicios y sana nutrición podrían proveer valores adicionales de calcio, las etapas principales de prevención y control de la osteoporosis son terapias a base de estrógeno e ingestiones de 1000-1500 mg de calcio por día (Albanese *et al.*, 1986). La insuficiencia de calcio en la dieta podría también predisponer a individuos susceptibles a hipertensión (elevada presión sanguínea). Niveles insuficientes de calcio podrían también mostrar un incremento en el cáncer de colon.

1.13 Técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

En la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, se pulveriza una disolución de la muestra en el seno de una llama en la que se calienta a incandescencia. El espectrofotómetro de absorción atómica difiere del fotómetro de llama. La espectrofotometría de absorción atómica mide la absorción de los átomos vaporizados no ionizados, de parte de la luz emitida por una lámpara catódica hueca cuyo cátodo emite una luz con la frecuencia de resonancia de un determinado elemento (Fisher, 1991). Los componentes necesarios de un espectrofotómetro de absorción atómica son:

- Fuente de luz
- Unidad de atomización
- Detector
- Sistema de datos
- Sistema óptico

La técnica de espectrofotometría destruye la muestra, determina cuantitativamente el elemento presente para determinar un analito en una muestra, es necesario proporcionar energía a los átomos y subir de nivel a los electrones, esto se lleva a cabo en el equipo utilizando una lámpara de cátodo hueco, que debe ser específica del analito que se desea analizar. En este nivel los electrones se encuentran en un estado basal y tiene una transición de un nivel de alta energía, a una de baja energía, esto sucede cuando hay emisión de luz o serie de líneas conocidas como espectro, cada frecuencia definida que es detectado por un aparato y es específica para cada elemento.

METODOLOGÍA

Desarrollo Experimental

Para llegar a la solución del problema planteado “Establecer la tendencia de calcio residual a diferentes temperaturas (72, 82 y 92 °C) y tiempos de reposo (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 horas) en granos de maíz durante el proceso de nixtamalización”; se formuló el siguiente objetivo general:

Objetivo General

Determinar calcio residual en granos de maíz y en sus diferentes estructuras (pericarpio, germen y endospermo), obtenido a diferentes condiciones de proceso durante el tratamiento térmico-alkalino. Para elaborar la tendencia de calcio residual y realizar un análisis comparativo entre ellas.

Objetivo particular 1:

Cuantificar calcio residual en harinas de maíz nixtamalizado obtenidas a diferentes temperaturas de cocción y distintos tiempos de reposo durante el proceso de nixtamalización. Para construir la tendencia de fijación de calcio residual en grano total.

Objetivo particular 2:

Obtener calcio residual aplicando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en pericarpio de maíz, separado manualmente de los granos, durante el proceso de nixtamalización, para explicar el comportamiento de una parte de la tendencia total de calcio residual en grano.

Objetivo particular 3:

Determinar calcio residual por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en germen, de granos sometidos a tratamiento térmico-alkalino a diferentes condiciones experimentales y separados manualmente. Para justificar parte del comportamiento de la gráfica de calcio residual en el grano de maíz.

Objetivo particular 4:

Medir la concentración de calcio residual por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en endospermo, obtenido de granos de maíz nixtamalizados a diferentes temperaturas y tiempos de reposo durante el tratamiento térmico-alkalino. Para explicar parte de la tendencia de calcio residual en grano entero.

El desarrollo experimental se resume en el cuadro metodológico que se muestra en la figura 3, este fue el mapa a seguir durante todo el trabajo experimental, el cual contiene la descripción del problema, los objetivos, las variables, así como las actividades a desarrollar.

El cuadro fué la organización racional de la descripción de actividades correspondientes al alcance de los objetivos. También marco las condiciones de trabajo para la parte experimental.

Las actividades preliminares que se ilustran en el cuadro metodológico, contemplan la caracterización de la materia prima y la caracterización y acondicionamiento del equipo.

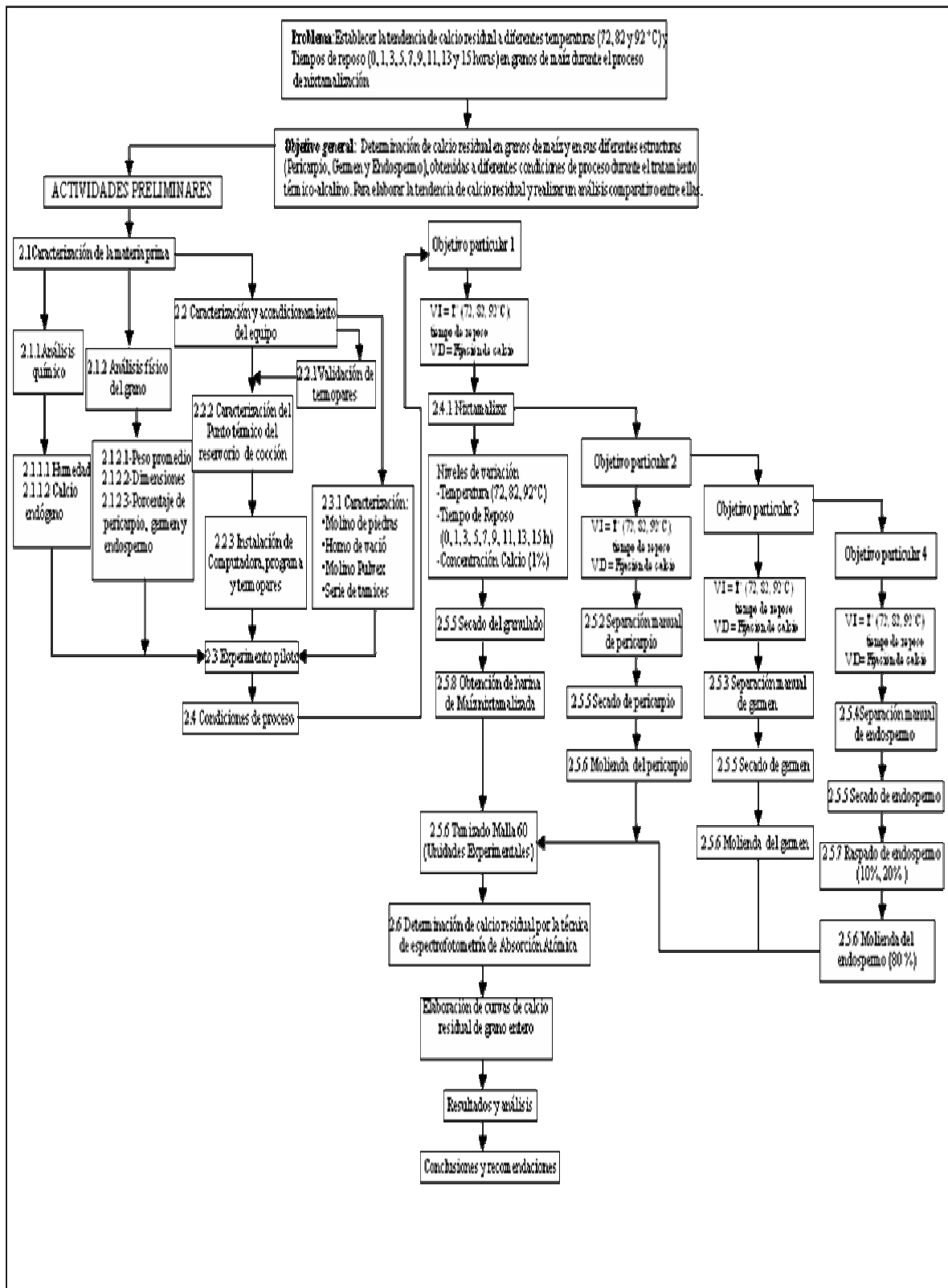


Figura 3: Cuadro metodológico.

2.1 Caracterización de la Materia Prima

El maíz QPM-H368C fue suministrado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) delegación Bajío, ubicado en Celaya, estado de Guanajuato. Esta variedad es un híbrido de alta calidad proteica obtenido a partir del desarrollo de versiones con el gen opaco, pero con fenotipo normal o cristalino donde se obtienen poblaciones de endospermo modificado, a este híbrido se le conoce como QPM (Quality Protein Maize).

La caracterización de la materia prima se realizó para conocer las cualidades del grano de maíz sin haber sido procesado (nativo), para definir los objetivos particulares y comparar con los cambios físicos que le provoca el tratamiento térmico-alkalino a los granos de maíz a diferentes condiciones de proceso.

2.1.1 Análisis químico del grano

2.1.1.1 Humedad

Dentro de la caracterización de la materia prima, se contempló un análisis químico para la determinación de humedad en grano de maíz, basándose en las técnicas de análisis de la AOAC (2000), método 965.17.

La determinación fue necesaria dado que puede ser un parámetro cuantitativo para establecer el tiempo de cocción de los granos de maíz y se realizó por triplicado.

2.1.1.2 Calcio endógeno

La determinación de calcio endógeno es importante para conocer su concentración de calcio en el grano nativo ó crudo. La fijación de calcio residual en granos de maíz procesado debe plantearse a partir del calcio endógeno. Esta actividad se realizó por espectrofotometría de absorción atómica para muestras de pericarpio crudo, de acuerdo al método descrito por Fernández *et al.* (2004).

El aparato está equipado con una lámpara de deuterio con corrector de trasfondo y una lámpara de cátodo hueco para leer calcio. Las condiciones en

que se operó el equipo fue: presión del aire (12 psi), presión de acetileno (70 psi), flama 422.7 nm, lámpara de uso corriente 10mA y el corte de ancho 0.7 nm. Las determinaciones se realizaron en un laboratorio certificado, LAFGA, del instituto de Geografía de la UNAM, para análisis de calcio en materiales, utilizando un microondas para digerir las muestras, un estándar de 1000 ppm de calcio para preparar la curva de calibración y una referencia certificada con meal-solid, para establecer el porcentaje de recuperación en un espectrofotómetro modelo AA-110 VARIAN.

Las determinaciones se hicieron por triplicado y se obtuvo el promedio de los resultados, así como la desviación estándar (Montgomery, 2003).

2.1.2 Análisis físico del grano de maíz

2.1.2.1 Peso promedio:

Dado que es necesario el conocimiento del peso de maíz para homogenizar cantidad de granos, se cuantificaron 1000 granos, registrando su peso en una balanza analítica. Se realizó por triplicado y se calculó el valor promedio de los datos.

2.1.2.2 Dimensiones:

Los granos de maíz QPM H-368C son de menores dimensiones que las variedades comunes (Serna-Saldívar *et al.*, 1996); ésto representa una ventaja, porque las superficies menores se deterioran menos que las superficies de granos grandes. La medición se realizó en muestras de 100 granos de maíz retenidos en un tamiz de abertura 8.0 mm, utilizando un vernier digital para semilla. Se midieron las dimensiones de largo, ancho y espesor de los granos. Se calculó el valor promedio y desviación estándar.

2.1.2.3 Porcentaje de Pericarpio, Germen y Endospermo

Las variedades QPM H-368C son granos que han sido modificados, la cantidad de pericarpio presente en el grano es variable, es necesario conocer el porcentaje de la estructura, ya que durante el tratamiento térmico-alcalino esta estructura se degrada y hay una pérdida de materiales que puede cuantificarse con un balance de materia, a partir de la cantidad de pericarpio disponible del grano crudo, con respecto al grano tratado.

La determinación de la distribución ponderal de las principales estructuras anatómicas del maíz se realizó en granos individuales, se aprovechó la actividad también para conocer el porcentaje real de cada estructura en el grano (cofia, pericarpio, germen y endospermo). Se llevó a cabo en 100 granos de maíz íntegros, hidratándolos con 50 ml de agua destilada por 40 minutos a temperatura ambiente, después se drenó el agua, los componentes anatómicos del maíz se separaron manualmente, secándose a temperatura ambiente por 24 horas; los granos y sus componentes fueron pesados individualmente en una balanza analítica calibrada. Para obtener el porcentaje real, se calculó el valor promedio de los datos y su desviación estándar.

2.2 Caracterización y Acondicionamiento del equipo

2.2.1 Validación de termopares

Los termopares son instrumentos de medición de temperatura, por lo que se debe asegurar que sus mediciones sean lo más confiables posibles. Se estableció un protocolo de validación para cinco termopares (Gutiérrez, 2006), utilizando un fluido conocido (agua destilada), considerando como referencia para el cálculo de la exactitud, la temperatura de ebullición en el estado de Querétaro, se utilizó un termopar patrón previamente calibrado por el Centro Nacional de Metrología (CENAM) ubicado en la carretera México-Querétaro S/N, con la aleación Constantan (Cu-Ni), con un rango de medición de -100 a 250 °C y 0.001 de precisión. Posteriormente los termopares se fijaron en un recipiente de 8 cm de diámetro, aislado térmicamente. Los termopares fueron distribuidos y fijados uno en el centro y los cuatro restantes, en cada uno de los cuadrantes. Se calentó el agua en una parrilla, registrando los datos de temperatura de cada termopar cada minuto, hasta que alcanzó la temperatura de ebullición. Con la finalidad de conocer las desviaciones de cada uno de ellos, se graficaron los datos de temperatura en función del tiempo. Posteriormente se corrigieron los termopares con los valores del termopar patrón, para obtener los valores reales. Estos termopares fueron utilizados para las mediciones de temperatura durante el trabajo experimental para establecer el perfil térmico con que se trató la muestra.

2.2.2 Caracterización del punto térmico del reservorio de cocción

Con los termopares descritos anteriormente, se llevó a cabo la caracterización térmica del reservorio: Se dividió el área superficial del cilindro en cuatro zonas, colocando un termopar en la parte central de cada una de ellas y en el centro del recipiente como lo muestra la figura 4. Este procedimiento se realizó inicialmente con agua y posteriormente con una muestra de maíz, agua y calcio, registrando las temperaturas durante una rampa de calentamiento de 1 hora, con el objeto de conocer el perfil de temperaturas.

Se colocaron los termopares en las mismas posiciones en la parte central de la zona, tomando el registro de temperaturas durante la etapa de cocción en la nixtamalización. Este mismo procedimiento se realizó en otra muestra, pero ahora se colocaron los termopares en la periferia y el centro de uno de los granos en cada uno de los cuadrantes.

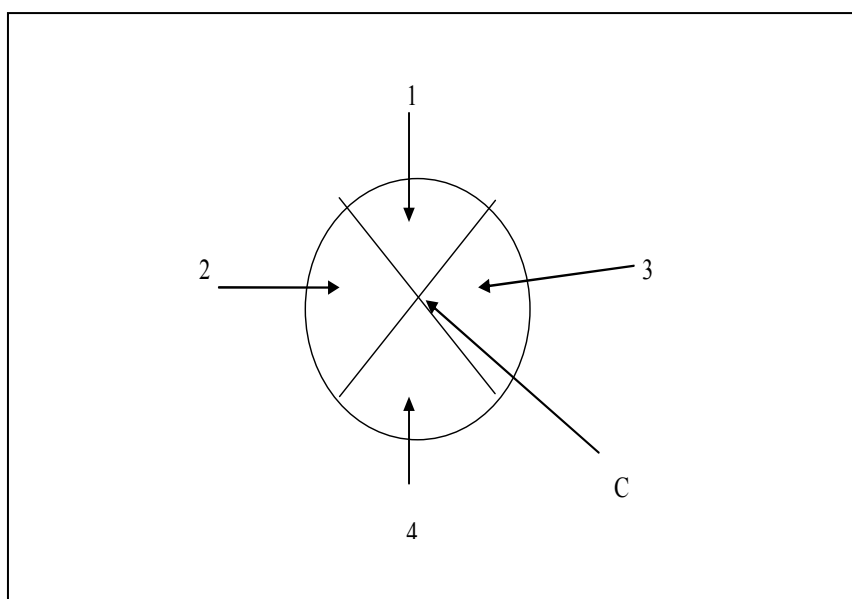


Figura 4: División de cuadrantes del reservorio de cocción (1, 2, 3, 4 representan los cuadrantes y C representa el centro).

2.2.3 Instalación de la computadora, programa y termopares

Los termopares se introdujeron y se fijaron perforando la tapa del reservorio de cocción, los cuales se conectaron en un aparato para la captura de datos en una computadora con un programa instalado, el cual efectúa la corrección de

temperaturas con el termopar patrón, realizando también el promedio de temperaturas.

El equipo fue diseñado para registrar la historia térmica de cada evento. En la figura 5, se muestra el sistema prototipo completo. **A este conjunto elementos se le ha denominado sistema prototipo de cocción-reposo para la nixtamalización** (se define de esta manera, en virtud de que en este contenedor también se llevará a cabo la etapa de reposo).

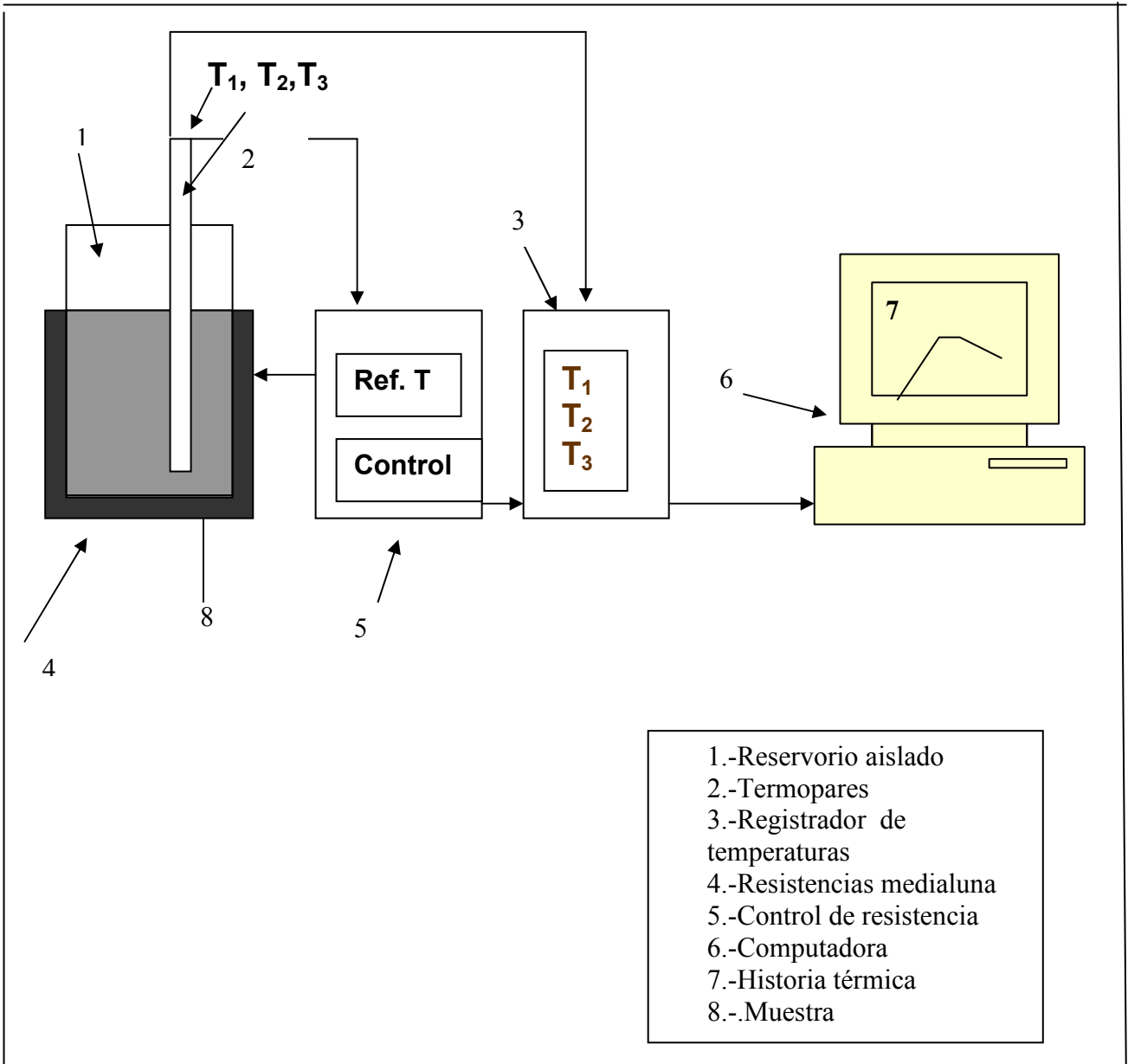


Figura 5: Sistema prototipo de cocción-reposo para la nixtamalización

2.3 Experimento Piloto

Una parte del experimento piloto se realizó en el sistema prototipo de cocción-reposo mostrado en la figura 5. Éste permitió, a la vez caracterizar todos los equipos que se utilizaron en la parte experimental, para el proceso de nixtamalización del grano de maíz objeto de estudio. Al interior del reservorio de cocción se vertieron 4 litros de agua, 2 kg de maíz y 20 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grado alimenticio. Se programó la temperatura deseada para el tiempo de cocción, una vez concluida la etapa de cocción y de reposo de los granos, se drenó el licor de cocción (nejayote) durante 10 minutos, enseguida el maíz se lavó de la siguiente manera: en un contenedor con dos litros de agua (relación 1:1 w/v) se vació el grano drenado, mezclando tres veces con una paleta en forma manual. Una vez cocido se eliminó el agua durante un período de 10 minutos drenándola, el mismo procedimiento se repitió para efectuar un segundo lavado.

El nixtamal se trituró en un molino de piedras (modelo Fumasa M100), que consta de un par de piedras colocadas una frente a la otra, una gira y la otra permanece estática. El grado de la molienda del nixtamal se estableció previamente por la abertura entre las piedras (3mm). El producto obtenido fue un granulado que cuando se hidrata forma una masa para hacer tortillas, en este punto concluye el proceso de nixtamalización tradicional. Sin embargo, debido a que gran parte de las determinaciones se llevaron a cabo en harinas porque así lo especifican las metodologías para la preparación de las muestras, apegándose al proceso tecnológico para fabricación de harinas de maíz que incluye otras dos operaciones unitarias, se secó y molió el granulado obtenido.

El secado se llevó a cabo en un horno de vacío a 40 °C, en este punto el equipo se caracterizó previamente colocando un termopar en cada nivel interno del horno para conocer la temperatura en cada zona. La muestra se retiró del horno cuando alcanzó un 12 % de humedad y se pulverizó en un molino de martillos (Pulvex 200), utilizando un dosificador a la entrada del equipo para no saturarlo y una criba a la salida de 0.5 mm. Finalmente, se obtuvo el análisis granulométrico para conocer su distribución de tamaños con una serie de tamices (30, 40, 60, 70, 80, 100 y plato) en un vibrador Rot-tap (modelo RX-29, serie 12032) durante 15 minutos de agitación, para ajustarse a la Norma

(NMX-FF-034-1-SCFI-2002), donde se especifica que el 75 % de la muestra deberá estar retenida en la malla 60, serie U.S.

2.3.1 Caracterización del equipo (Molino de piedras, horno de vacío, Molino de martillos, Ro-tap, Serie de tamices)

Uno de los propósitos de realizar el experimento piloto fue conocer el funcionamiento de los equipos que se utilizan durante la nixtamalización y los niveles en que pueden ser manipuladas las variables por el operador.

Después de realizar la cocción y reposo de maíz en el equipo prototipo de nixtamalización, se continuó la preparación de las muestras hasta obtener harinas, las cuales fueron las unidades experimentales con las que se trabajó durante el proyecto.

1.-El molino de piedras (modelo Fumasa M100), fue operado con una abertura entre las dos piedras de 0.3 mm, esto se consigue con 16 vueltas al tornillo sinfín de cierre. Las piedras se remojaron en agua durante una hora previa a ser instaladas al equipo.

2.- El granulado obtenido se secó en un horno de vacío, en el segundo y tercer nivel interno, ya que ahí se registró la temperatura de 40 °C, según lo estipulado en la caracterización del horno.

3.- Al molino de martillos (Pulvex 200),, se acondiciono un dosificador para alimentar el equipo y evitar un sobre calentamiento. Se le colocó una criba para tamizar de 0.5 mm, para obtener harinas de maíz nixtamalizado que cumplieran con la Norma (NMX-FF-034-1-SCFI-2002), donde se especifica que el 75 % como mínimo (0.250 mm) de la muestra deberá estar retenida en la malla 60, serie U.S.

4.- Se tamizaron 100 g de muestra, durante 15 minutos en un Rot-tap (modelo RX-29, serie12032), con una serie U.S; utilizando los tamices (30, 40, 60, 70, 80, 100 y plato).

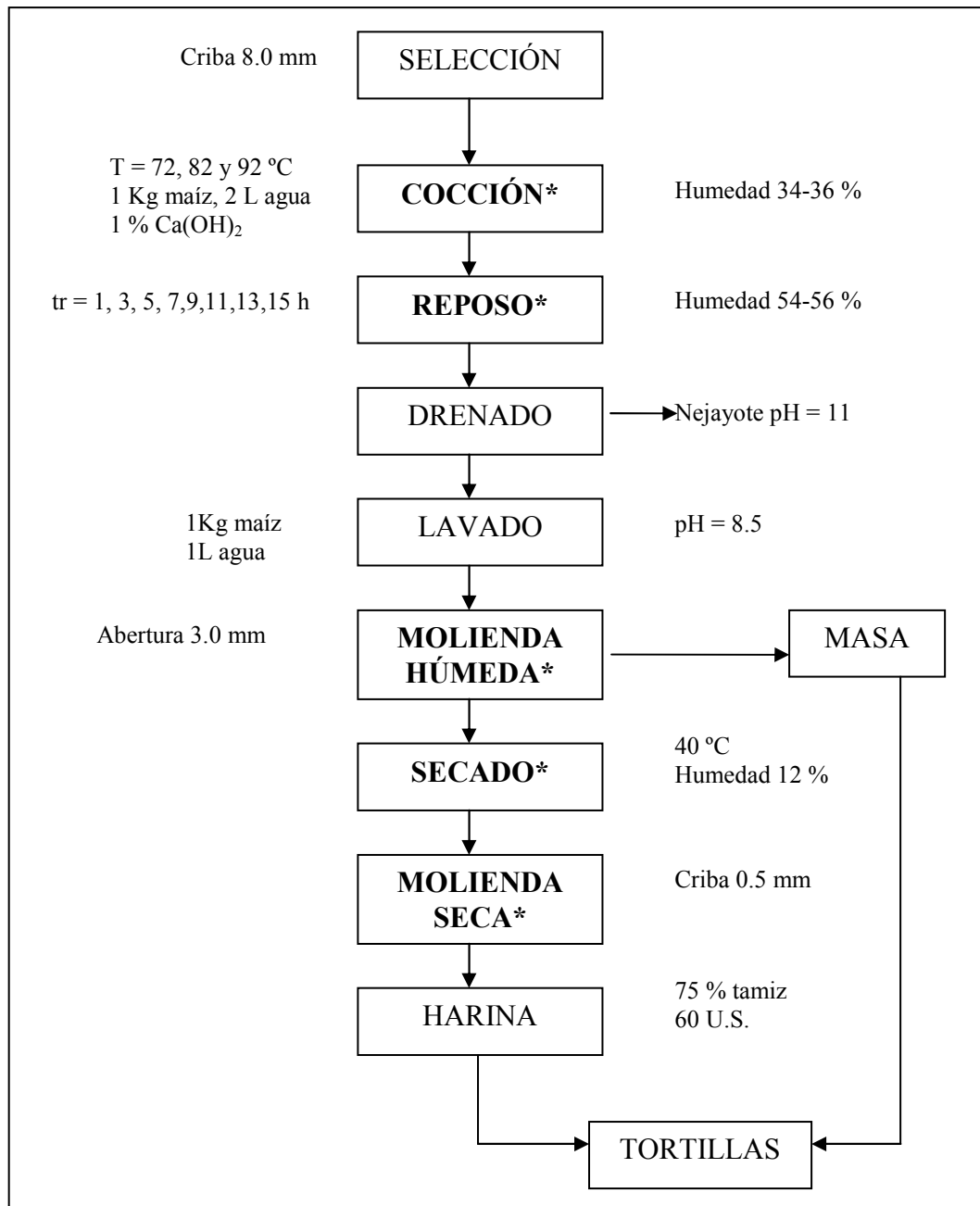
2.4 Condiciones de proceso

Con el establecimiento de las condiciones de proceso (Gutiérrez, 2006), se determinaron las variables críticas y se estandarizó el proceso.

Las condiciones de trabajo para la experimentación son las siguientes:

- Variedad de maíz QPM–H368C.
- Relación agua-maíz (1:2 v/m) para el cocimiento.
- 1 % de Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (en base al peso del grano).
- Las temperaturas de cocción fueron 72, 82 y 92 °C.
- El tiempo de reposo 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 horas.
- Para realizar los lavados se utilizó 1 litro de agua por kg de maíz para cada lavado.
- La abertura de las piedras en el molino fue de 0.3mm.
- La temperatura del horno de vacío fue de 40 °C.
- Se utilizó un molino de martillos (Pulvex), para la molienda seca.
- Se utilizó la serie de tamices U.S. (malla 30, 40, 60, 70, 80, 100 y plato), para el análisis granulométrico.
- Las muestras correspondientes a las estructuras anatómicas del maíz (pericarpio, germen y endospermo), fueron obtenidas manualmente y secadas a temperatura ambiente.
- Las muestras de harina de maíz nixtamalizada fueron obtenidas siguiendo el diagrama tecnológico de elaboración de harinas figura 6.

2.4.1 Proceso tecnológico de harina de maíz nixtamalizado



Fuente: Serna-Saldívar *et al.*, (1988). Modificado

*Condiciones críticas
 tr = tiempo de reposo

Figura 6: Diagrama de proceso para la elaboración de Harina de maíz nixtamalizado

2.4.1.1 Descripción del proceso tecnológico

La nixtamalización tradicional, es un proceso empleado para cocer el grano de maíz y obtener una masa con ciertas propiedades funcionales, principalmente se emplea en México y en América central para elaborar tortillas, totopos, tamales, entre otros alimentos (Martínez *et al.*, 1993).

El proceso consiste en una serie de tratamientos muy drásticos, a los cuales es sometido el grano de maíz, muy poco comunes en la industria alimentaria para cualquier tipo de producto. Este fue descrito por primera vez tal y como se realiza en México por Illescas *et al.* (1943), sin embargo es muy variable debido a los factores socioeconómicos y geográficos, en aspectos como tipo de maíz, porción de agua, concentración de hidróxido de calcio inicial, tiempo y temperatura de cocción, los cuales se seleccionan de acuerdo con la región del país y con los hábitos propios de cada familia (Rubio, 1993).

La nixtamalización también se conoce como tratamiento térmico-alcalino, por ser una de las etapas más importantes del proceso, durante este se realiza una cocción del grano a altas temperaturas (72, 82 y 92 °C) en presencia de un álcali (hidróxido de calcio) y un reposo en su mismo licor de cocción.

La descripción del proceso se realiza con el diagrama tecnológico para elaboración de harina de maíz nixtamalizado, que estableció Serna *et al.*, (1988), sin embargo es necesario establecer intervalos de operación debido a la variabilidad del proceso, mencionada anteriormente. Éste proceso consta de varias etapas, algunas de ellas son críticas, las cuales se señalan y en el diagrama de bloques que se muestra en la figura 6. A continuación se describe cada una de las etapas.

Selección: Se realiza en una criba de 8.0 mm para seleccionar granos de tamaño homogéneo, se eliminan granos picados y rotos.

Cocción: Tratamiento térmico-alcalino, se realiza a temperaturas superiores a 70 °C, (hasta temperaturas de ebullición en algunos lugares) en presencia de hidróxido de calcio. Las características químicas de la solución alcalina durante la cocción deben ser tales que la concentración de cal siempre exceda el punto de saturación de hidróxido de calcio. Las concentraciones empleadas durante el proceso están dentro del rango de 0.5 a 2.0 %, con un pH inicial de 12.4. Después de la cocción, el pH residual del licor de cocción (nejayote) es

aproximadamente de 11.0, finalmente para remover el exceso de cal el maíz se lava hasta que alcanza un pH de 8.5 en aguas residuales, de otra manera ocasiona un mal sabor en los productos elaborados, La cantidad de agua es muy variable desde 2 litros por kilogramo de maíz hasta 4 litros, la cocción puede iniciar desde temperatura ambiente y en ese momento se le agrega el hidróxido de calcio, Ca(OH)_2 , el maíz y el agua (Trejo *et al.*, 1982).

Reposo: En ésta etapa se deja reposar el grano en su medio de cocción (nejayote), en el mismo reservorio, con la solución caliente, por un tiempo que varía de 3-6 horas según la región geográfica o lo que establezca el operario. La mayoría de los investigadores coinciden, en que en esta etapa suceden los principales cambios al maíz, porque el agua y los iones de calcio han penetrado al interior del grano, al endospermo y al germen. Da comienzo la gelatinización del almidón en el endospermo, hay cambios de color, destrucción de algunos aminoácidos presentes en las proteínas, como albúminas y globulinas, saponificación de las grasas en el germen, aumento de la biodisponibilidad de la lisina, gluteína y triptófano. (Trejo *et al.*, 1982; Gómez *et al.*, 1989; Bressani *et al.*, 2001; Bello *et al.*, 2002; Fernández *et al.*, 2004).

Drenado: en esta etapa se elimina su licor o nejayote, que presenta un pH aproximado de 11, aquí se presenta una pérdida importante de materia (lo que se conoce en la literatura como materia seca perdida), pericarpio, calcio y fracciones de germen y endospermo (Sahai *et al.*, 2001)

Lavado: Generalmente se realizan dos lavados con volumen de agua que también es muy variable y que depende de donde se procese, para eliminar exceso de calcio, y disminuir el pH del grano, el agua del último lavado deberá tener un pH aproximado de 8.5.

Molienda (húmeda): El nixtamal ya lavado, se lleva a una molienda en húmedo en un molino de discos mejor conocido como molino de piedras, el que por fricción genera calentamiento, aumentando considerablemente la temperatura y produciendo gelatinización de más gránulos de almidón, se

obtiene un granulado que al hidratarse y manipularse produce una masa compuesta de germen, fragmentos de pericarpio, partículas de endospermo aglutinados por una mezcla parecida a un pegamento de gránulos de almidón fundidos, hojas de matriz proteica y lípidos emulsificantes (Gómez *et al.*, 1989).

Secado: Si se desea conservar y almacenar, se seca el granulado en un horno rotatorio, a temperaturas que oscilan entre 40 y 45 °C, hasta llegar a una humedad aproximada de 12 %.

Molienda (seca): Para obtener harinas instantáneas la muestra seca, se pulveriza en un molino pulvex, para darle otros usos, en una gran variedad de alimentos, se envasa en papel y se almacena. A pesar de que el maíz durante el proceso, pierde proteína, fibra, grasas y vitaminas, su calidad nutritiva es mayor que la de la materia prima, cabe subrayar que gracias al proceso un amplio sector de la población mexicana satisface sus necesidades diarias de calcio y carbohidratos (Serna *et al.*, 1988).

2.5 Acondicionamiento de unidades experimentales

2.5.1 Preparación de las unidades experimentales

La preparación de las muestras de maíz QPM H-368C se realizó de acuerdo al diagrama de bloques del proceso de fabricación de harinas de maíz nixtamalizado que se muestra en la figura 6.

El proceso inicia con la limpieza de los granos, haciéndolos pasar a través de una criba metálica con abertura de 4.0 mm de diámetro interno, para eliminar basura, productos extraños, fragmentos de granos. Se continuó con una selección por tamaño, utilizando una criba de 8.0 mm. Los granos retenidos se recolectaron, 2 kg de maíz se vertieron en el reservorio de cocción con 4 litros de agua y 20 gramos de hidróxido de calcio (1 % w/w). Inicialmente se trabajó a una temperatura de 92 °C, las muestras obtenidas a esta temperatura se denominaron serie I, con un tiempo de cocción obtenido en las actividades preliminares. Se inició el calentamiento con dos rampas, la primera desde la

temperatura de 22.5 °C hasta la temperatura de cocción 92 °C, ahí se mantiene la temperatura por el tiempo establecido en la determinación de tiempo de cocción, ésta corresponde a la segunda rampa; el sistema registró las temperaturas cada 30 segundos. Al terminar la etapa se suspendió el calentamiento y en este mismo reservorio se dejó el grano reposar durante periodos de: 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 horas, dependiendo del tiempo destinado para cada muestra, incluyendo las muestras que no fueron reposadas (0 horas y control), ésta última sin adición de hidróxido de calcio. Al concluir el reposo de cada una de las muestras, se drenó el nejayote por diez minutos, posteriormente se efectuaron dos lavados, después del último lavado se determinó el pH. Estos lavados tienen la función de eliminar partes de pericarpio disuelto, fracciones de endospermo, germen, exceso de cal y disminuir el pH. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para la temperatura de 82 °C que se nombró serie II y la de 72 °C se le nombró serie III. El nixtamal ya drenado, se separó en dos partes: 200 gramos para pruebas de fijación de calcio y estado del pericarpio, el resto de la muestra, 1800 g, se destinó para preparar las harinas de maíz nixtamalizado.

2.5.2 Separación manual de pericarpio

Los 200 g de granos de maíz obtenidos después de drenar el agua de los lavados, se dejaron a temperatura ambiente durante dos horas para secar parcialmente el pericarpio y facilitar su desprendimiento del grano.

2.5.3 Separación manual de germen

De la muestra anterior también se desprendió manualmente el germen de los granos nixtamalizados a diferentes condiciones de proceso.

2.2.4 Separación manual de endospermo.

De la misma muestra se obtuvieron los endospermos de granos nixtamalizados a diferentes condiciones de proceso.

2.5.5 Secado de las muestras (pericarpio, germen y endospermo)

Todas las muestras correspondientes a las estructuras anatómicas del maíz (pericarpio, germen y endospermo), se secaron a temperatura ambiente por 24 horas, hasta alcanzar una humedad del 12 %.

2.5.6 Molienda y tamizado de las muestras (pericarpio, germen y endospermo)

Las muestras de pericarpio, germen y endospermo se molieron en un molino de cuchillas y se tamizaron en mallas de 60–70 serie U.S. Todas las unidades experimentales se almacenaron en bolsas de polietileno, que a su vez se colocaron en contenedores de plástico para su conservación a 5 °C.

2.5.7 Raspados de Endospermo en 10 %, 20 % y 80 %

El raspado del endospermo se realizó lijando 5 de las 6 caras del grano (de los 200 g de la muestra de maíz nixtamalizado), con una muza de acero inoxidable, dando el mismo número de lijadas por cada cara, pesando la muestra obtenida hasta obtener el 10 % del grano con respecto al peso inicial. El polvo recolectado se guardó en bolsas de polietileno de cerrado hermético. El segundo raspado para obtener el 20% se realizó con el mismo procedimiento para obtener otro 10 %, que corresponde aun peso en total del 20 % del grano.

El resto de endospermo corresponde al 80 % de los granos, fue molido en un molino de cuchillas.

Todas las muestras se tamizaron en mallas de 60–70 serie U.S. Y se almacenaron en bolsas de polietileno, que a su vez se colocaron en contenedores de plástico para su conservación a 5 °C.

2.5.8 Elaboración de harinas de maíz nixtamalizado

De los 1800 g de muestra de nixtamal, se continuó el proceso de elaboración de harinas de maíz nixtamalizado; siguiendo el diagrama tecnológico de harina. Las muestras se molieron en un molino pulvex, las cuales constituyen las otras unidades experimentales que se utilizarán en actividades para obtener

calcio residual en grano total. Después se envasaron en bolsas de polietileno y se guardaron a temperatura de 5 °C para posteriores evaluaciones.

2.6 Determinación de calcio residual

2.6.1 Determinación de calcio residual en grano total y en estructuras (pericarpio, germen y endospermo)

Las determinaciones se realizaron por triplicado para todas las unidades experimentales (harinas, pericarpio, germen y endospermo). Se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica de acuerdo al método descrito por Fernández *et al* (2004). La descripción se detalló en la determinación de calcio endógeno para granos de maíz anteriormente mencionada en el punto 2.1.1.2 de este mismo capítulo. Se utilizó un estándar para calcio y una referencia certificada para maíz.

Se graficaron los datos de calcio residual versus tiempo, se obtuvo la tendencia para cada una de las estructuras. Se realizó un análisis comparativo de los comportamientos para tres temperaturas de cocción del grano, 72, 82 y 92 °C. Con los datos de calcio residual en harinas, pericarpio, germen y endospermo, se aplicó una regresión lineal para realizar el ajuste del comportamiento en esta estructura; ésta constituye una parte de la tendencia total de calcio residual, es decir, para poder darle una explicación a la fijación de calcio en el grano entero, se obtuvieron las tendencias de calcio residual en pericarpio, germen y endospermo.

Las muestras de harina de maíz, pericarpio, germen y endospermo molidas y tamizadas fueron digeridas, ya que estas contienen residuos orgánicos que pueden influir en las mediciones. La digestión de las muestras de harina, pericarpio, germen y endospermo, se realizó utilizando 0.25 g de muestra, agregando 10 ml de ácido nítrico con alto grado de pureza; para esto se utilizó un microondas a tres rampas de calentamiento: la primera de temperatura ambiente hasta 130 °C en 4:30 minutos, la segunda de 130 °C, hasta 150 °C en 4:00 minutos y la última de 150 a 175 °C en 4:00 minutos, manteniendo la temperatura constante durante 15 minutos. Después de digerir, la muestra se filtra, se le adiciona óxido de lantano y se afora a 50 ml. Se analizó la muestra

con adición de lantano porque forman compuestos más estables con el fosfato y libera mejor el calcio. La lectura se realizó en un equipo de espectrofotometría de absorción atómica (modelo AA-110 VARIAN) de flama utilizando como gases aire-acetileno para producir la flama; las muestras ya diluidas se colocan en un vaso de precipitado. Se introduce el nebulizador a la muestra y se hizo incidir la luz de una lámpara de un cátodo hueco a través de una muestra vaporizada por una flama, en la que los átomos en estado basal absorben la luz, disminuyendo su intensidad. Se eligió la longitud de onda de 422.7 nm característica del calcio. El porcentaje de absorción registrado por el detector es una medida de la concentración del elemento de la muestra.

Las condiciones experimentales en las que se trabajó el equipo son las siguientes:

- a) Presión de aire seco: 12 psi.
- b) Presión de acetileno: 70 psi.
- c) Longitud de onda del láser: 422.76 nm.
- d) Corriente de la lámpara: 10 mA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la materia prima

3.1.1 Análisis químico del grano

3.1.1.1 Determinación de humedad

Los resultados del análisis de determinación de humedad en granos crudos de la variedad de maíz QPM H-368C se reportan en la tabla 9. El valor sirvió de parámetro cuantitativo para establecer el tiempo de cocción del grano. Los datos del análisis representan el promedio de tres repeticiones.

Tabla 9. Determinación de humedad en maíz nativo QPM H-368C

Componente	Valor (%)
Humedad ¹	12.00 ± 0.50

¹porcentaje en base seca. (n = 3)

El valor representa el promedio ± desviación estándar

3.1.1.2 Determinación de calcio endógeno

La concentración de calcio endógeno se reporta en la tabla 10. La determinación se realizó en granos enteros y en el pericarpio de maíz por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica.

Tabla 10. Resultados de calcio endógeno del grano de maíz QPM-H368C

Calcio endógeno ¹	Valor (%)
Grano de maíz	0.06 ± 0.00
Pericarpio	0.03 ± 0.10

¹Calcio presente en el maíz crudo, (n = 7)

El valor representa el promedio ± desviación estándar

Fue necesaria esta determinación debido a que el maíz tiene su correspondiente calcio endógeno, al cual se va a sumar el calcio que el grano retiene durante la cocción y el reposo en el proceso de nixtamalización, para tener la cantidad de calcio total que se fija.

3.1.2 Análisis físico del grano

3.1.2.1 Peso promedio

En la tabla 11 se muestra el peso promedio de 1000 granos. El análisis se realizó con la finalidad de mantener con la mayor aproximación la cantidad de granos por muestra.

Tabla 11. Peso promedio¹ del grano de maíz QPM- H368C

Número de granos	Peso promedio (g)
1000 granos	380.20 ± 1.04

¹Determinación en base seca (n = 3)

Cabe mencionar que el peso promedio de 1000 granos de maíz variedad QPM-H368C es menor que los valores reportados para granos convencionales con calidad nixtamalera, el cual se encuentra en un rango de 402 a 436 g (Serna-Saldívar *et al.*, 1992), ya que esta es una variedad diferente a la utilizada convencionalmente en la nixtamalización.

3.1.2.2 Dimensiones del grano

Las mediciones de las dimensiones de los granos de maíz se realizaron para estandarizar tamaños de granos. En la tabla 12 se muestran los valores obtenidos de largo, ancho y espesor de 100 granos de maíz variedad QPM-H368C.

Tabla 12. Dimensiones del grano de maíz QPM-H368C

Medidas del grano	Dimensiones (mm)
Largo	10.10 ± 1.01
Ancho	7.80 ± 0.20
Espesor	4.00 ± 0.80

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar, (n = 100)

Los granos de maíz QPM-H368C corresponden a granos de dimensiones menores que los de las variedades convencionales de maíz más comerciales para uso del proceso de nixtamalización (Serna-Saldívar *et al.*, 1992). Esta característica significa que existen más granos de maíz por cada 1000 gramos, lo que trae como consecuencia mayor área superficial en contacto con la solución de cocción y por ende mayor fijación de calcio en la muestra.

3.1.2.3 Porcentaje de pericarpio, germen y endospermo

Se obtuvieron los pesos promedio de pericarpio y de cada una de las partes anatómicas del grano de maíz (cofia, germen y endospermo) para conocer el porcentaje real de cada grano de forma individual. La distribución ponderal de cada uno de los componentes mayoritarios para variedad de maíz QPM-H368C se reportan en la tabla 13.

La norma (NMX-FF-034/ 1- SCFI-2002) reporta para la cofia < 2 %, para el pericarpio < 5.5 % y para el germen < 12 %.

Tabla 13. Porcentaje de estructuras anatómicas del maíz QPM-H368C

Partes del grano	Porcentaje (%)	Norma (%)
Cofia	1.20 ± 0.10	2
Pericarpio	7.10 ± 0.40	5.5
Germen	12.50 ± 0.50	12
Endospermo	79.20 ± 0.80	80.50

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar, (n = 100)

Como se muestra en la tabla 13, los granos de maíz QPM-H368C, tiene un mayor porcentaje de germen y pericarpio. Lo que nos indica que al tener mayor porcentaje de pericarpio se tiene una mayor capa protectora (cáscara) en cada grano, y que puede impedir que se fije el calcio en las otras estructuras (germen y endospermo) durante la nixtamalización.

3.2 Caracterización y acondicionamiento del equipo.

3.2.1 Validación de termopares

Las mediciones instrumentales requieren de confiabilidad ya que le confiere rigor experimental al trabajo. Por esa razón se validó la técnica de mediciones de temperatura de los termopares, para asegurar que se conocen las desviaciones de cada uno de ellos. Los resultados se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Valores para corrección de termopares

Temperatura termopar patrón (2) (°C)	Temperatura termopar (1) (°C)	Temperatura termopar (3) (°C)	Temperatura termopar (4) (°C)	Temperatura termopar (5) (°C)
92	92.2	91.7	91.9	91.8
Desviación del valor de los termopares con respecto al valor del termopar patrón	- 0.2	+ 0.3	+0.10	+0.2

Con estos valores se corrigen las lecturas de los demás termopares en todas las mediciones, para ajustarse a las del termopar patrón. El programa realiza automáticamente la corrección y el promedio en el momento de registrar la temperatura.

3.2.2 Caracterización térmica del reservorio de cocción

Con los termopares descritos anteriormente se llevó a cabo la caracterización térmica del reservorio, para lo cual se dividió el área superficial del mismo en cuatro cuadrantes, colocando un termopar en la parte central de cada una de ellas y en el centro del recipiente. Los datos de los valores de temperatura se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Caracterización térmica del reservorio de cocción

Centro	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4
Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
92 ¹	92.32	92.30	92.26	92.34
90 ²	89.68	89.70	89.74	89.66
86 ³	85.80	85.70	85.60	85.90

¹Valor del termopar patrón localizado en el centro de la muestra.

² Localizado en la periferia del grano. ³ Localizado en el centro del grano.

La nixtamalización se realizó manteniendo una rampa de calentamiento a la temperatura de 92 °C durante la cocción. Los valores de la tabla 15 son los registrados en la muestra en el centro de cada cuadrante, en la periferia del grano, en el interior del grano. Las temperaturas fueron diferentes según la localización. Las medidas en la periferia del grano representaron un promedio de -2 °C con respecto a las del centro del cuadrante, y las medidas en el interior del grano -6 °C. Los valores utilizados para dejar fijos los termopares fueron los obtenidos en el centro de cada cuadrante. Se decidió colocar los termopares en el centro del reservorio ya que los valores registrados entre el centro y los cuadrantes son menores de 0.3 °C. Finalmente se perforó la tapa del reservorio y se introdujeron los termopares.

3.3 Experimento piloto

El experimento piloto, se realizó de acuerdo a la actividad 2.3, y la 2.3.1 correspondiente a la caracterización de los equipos se realizaron siguiendo los pasos de la metodología, capítulo 2 de este trabajo.

3.3.1 Caracterización de equipos (Molino de piedras, horno de vacío, Molino de martillos, Rop-tap y serie de tamices)

La caracterización de los equipos se realizó de acuerdo al punto 2.4.1 de la metodología experimental.

3.4 Condiciones de proceso

Las condiciones experimentales que se trabajaron para obtener las muestras quedaron registradas en el capítulo de metodología y aquí se presenta un resumen en la tabla 16. Las muestras se nombraron como serie I, II, III, para las temperaturas 72, 82 y 92 °C, respectivamente. En total fueron 33 muestras diferentes y sus correspondientes repeticiones, incluyendo las muestras en crudo, sin ningún tratamiento, las que no aparecen en la tabla 16.

Tabla 16. Condiciones experimentales con las que se obtuvieron las muestras

Serie	Temperatura (°C)	Concentración inicial de Ca (%)	Tiempos de reposo (h)
I	72	1	^a C, ^b 0 ,1,3,5,7,9,11,13,15
II	82	1	^a C, ^b 0 ,1,3,5,7,9,11,13,15
III	92	1	^a C, ^b 0 ,1,3,5,7,9,11,13,15

^aC. Control, muestra sin calcio y sin reposo.

^b0, muestra sin reposo

3.5 Acondicionamiento de unidades experimentales (muestra)

Las unidades experimentales fueron procesadas de acuerdo a lo que se describe en la parte de metodología a diferentes condiciones, registradas en la tabla 16. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno a 5 °C, perfectamente selladas en frascos y almacenadas para su posterior evaluación.

3.6 Resultado de Calcio residual en grano total

A partir de las determinaciones de calcio se construyeron las graficas de calcio residual en grano total en pericarpio, germen y endospermo de maíz nixtamalizados, sometidos a diferentes condiciones de proceso, para encontrar la tendencia de fijación de calcio en cada una de las estructuras y explicar la tendencia total, es decir la del grano entero.

El estudio de la concentración de calcio en maíz nixtamalizado en forma de harina fue un problema tratado por Trejo-González *et al.* (1982), su tendencia en una gráfica describe que el grano se satura de calcio en tiempos mayores a 7 horas. Posteriormente existen otros estudios que muestran lo contrario, ya que consideraron que el grano no es un todo homogéneo; su morfología muestra que tiene varias estructuras con distinta composición química, lo que implica diferente mecanismo de difusión de calcio, según el modelo propuesto por Fernández-Muñoz *et al.* (2002 y 2004) mostrado para una temperatura de 92 °C y después para 72 °C, donde indicó que la tendencia del contenido de calcio en función del tiempo de reposo debe ser explicada en términos de un sistema multicapa (pericarpio, germen y endospermo). Nosotros estamos de acuerdo con su planteamiento, dado que el pericarpio tiene mayor importancia, porque su degradación sucede en un largo período y de manera no homogénea, lo que trae como consecuencia que la difusión de calcio y agua no sea igual a todas las estructuras del maíz y que se requiere de diferentes tiempos para que exista una alta concentración de calcio en cada una de ellas. Como el grano experimenta cambios en las estructuras, el mecanismo de difusión debe tener relación con sus transformaciones fisicoquímicas. Zazueta *et al.* (2002) realizaron un experimento cualitativo para establecer la ruta de difusión de calcio al interior del grano y encontraron, al igual que Fernández-Muñoz *et al.* (2004), que el calcio entra de manera casi simultánea al germen y al endospermo una vez que atraviesa el pericarpio.

La figura 7 muestra el contenido de calcio en grano total, es decir en harinas de maíz nixtamalizado QPM-H368C, en función del tiempo de reposo. Las determinaciones se realizaron utilizando tres temperaturas de cocción 72, 82 y 92 °C. Y se obtuvo la tendencia de la difusión de calcio.

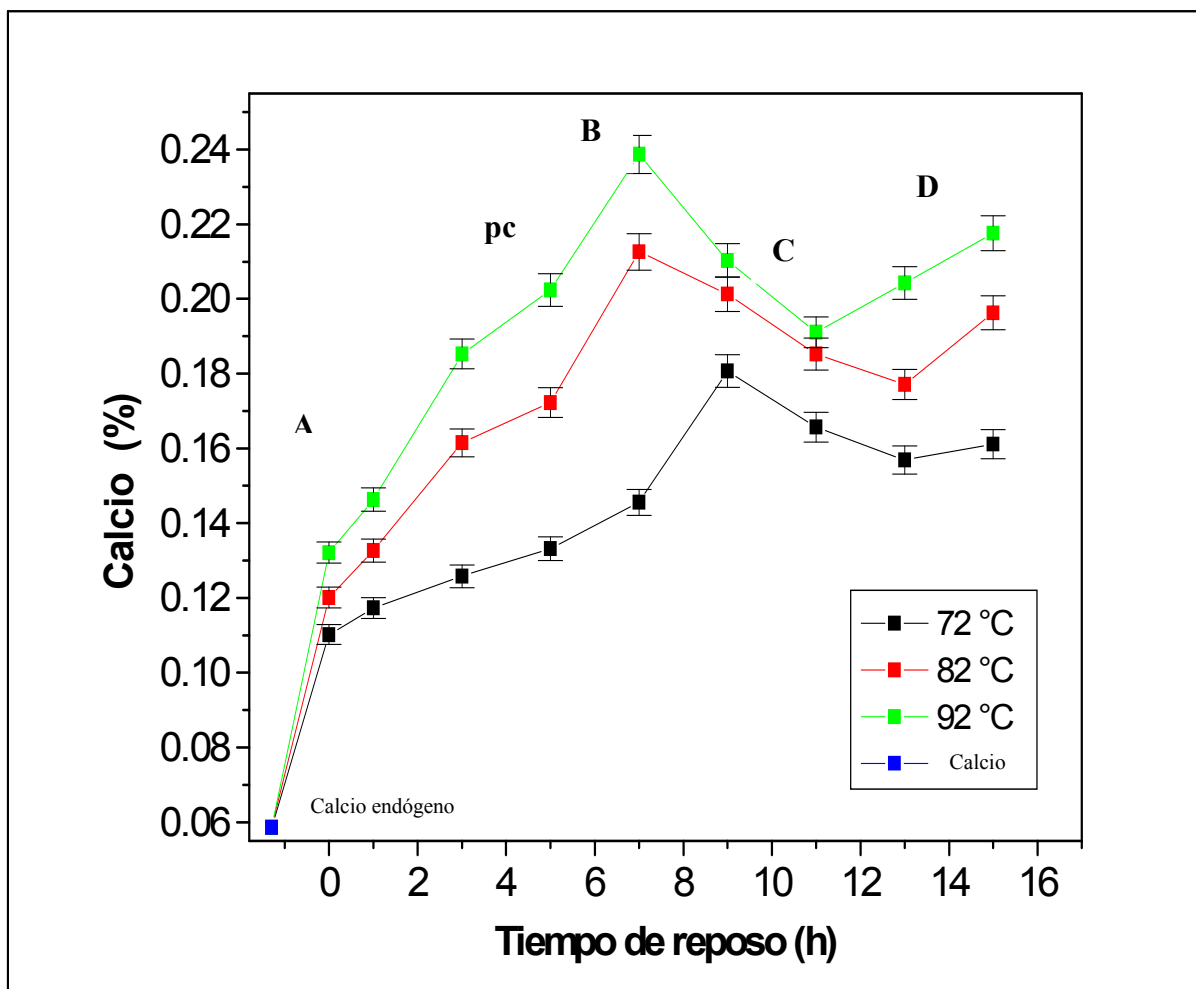


Figura 7: Concentración de calcio residual en granos de maíz nixtamalizados

En la figura 7 cada punto de la gráfica corresponde a concentraciones de calcio residual en los tiempos de reposo. El primer punto es el valor del calcio endógeno, que es el valor de la muestra control tratada térmicamente y sin adición de calcio ni horas de reposo con un valor de 0.0585 % de calcio. Después se obtiene un incremento de calcio en la hora cero, que corresponde a la primera etapa o cocción del grano, que tampoco tiene reposo, pero si fue sometida a tratamiento térmico-alcalino durante la cocción. Durante esta etapa se deposita calcio en el pericarpio. La fijación de iones de calcio se ve favorecida por la alta temperatura y un medio alcalino como se puede apreciar en la figura 7. Podemos observar claramente que existe una dependencia del contenido de calcio con la temperatura, es decir si aumenta la temperatura de proceso, se incrementa la concentración de calcio residual. Este hecho puede

ser explicado de la siguiente manera: la solución alcalina es sobresaturada, pues el límite de solubilidad del calcio es de 0.185 w/w para 0 °C, 0.15 w/w a temperatura ambiente y 0.08 w/w a 100 °C. (Trejo-González *et al.*, 1982; Zazueta *et al.*, 2002). Este hecho podría hacer suponer que a temperatura de 72 °C la solubilidad de la solución es mayor que a 92 °C. Por lo tanto hipotéticamente podríamos pensar que a temperaturas bajas de nixtamalización el licor de cocción es más agresivo para las estructuras de contacto del grano (pericarpio), dando ligeras modificaciones físicas y químicas en el pericarpio y permitiendo el ingreso de calcio a las estructuras internas. Pero de acuerdo a la figura este hecho no se da, debido a que el pericarpio está compuesto de fibras naturales: celulosa y hemicelulosa, que requieren elevadas temperaturas y altas concentraciones de calcio para ser modificadas morfológica y químicamente, como lo indican los estudios en muestras de pericarpio nixtamalizado, obtenidas por calorimetría diferencial de barrido realizados por González *et al.* (2004^a). De acuerdo a sus resultados, las temperaturas donde se presenta la descomposición química de la hemicelulosa y celulosa fueron 284 y 342 °C, respectivamente. Similares cambios pueden lograrse con concentraciones elevadas de calcio de alrededor de 20%, según Martínez *et al.* (2001). Estos niveles de calcio y temperaturas utilizados para provocar modificaciones fisicoquímicas en la celulosa y hemicelulosa, no corresponden a las condiciones reales del proceso de nixtamalización, por lo que no es factible en teoría que la solubilidad del hidróxido de calcio a las temperaturas manejadas en este trabajo, le provoquen grandes cambios fisicoquímicos por separado a estas fibras de celulosa y hemicelulosa. No obstante, el compuesto formado por la matriz fibrosa celulosa-hemicelulosa-lignina, si fue afectado por la combinación de temperatura-concentración, ya que el contenido de calcio residual en granos no presenta un comportamiento como el descrito por Trejo-González *et al.*(1982), mas bien el comportamiento del contenido de calcio en función del tiempo de reposo fue similar al reportado por Fernández-Muñoz *et al.*(2004), por lo que la explicación del contenido de calcio en función del tiempo debe contemplar los cambios en las tres estructuras mayoritarias del grano (pericarpio, germen, endospermo), debido a que su composición química, y ubicación en el grano son diferentes.

El análisis de este mecanismo de difusión de calcio se dividió en cuatro partes (figura 7): **A, B, C, D**, que corresponden a cuatro tiempos combinados.

El período inicia en 0 h, hasta el primer cambio de pendiente positiva en la curva, el segundo contempla desde el cambio de pendiente hasta el punto máximo. El tercero, desde el punto máximo hasta el descenso y punto mínimo, y el último corresponde al incremento final. El período A representa la habilidad del pericarpio para retener calcio que se fija en esta estructura en forma de sales de calcio y calcio iónico, y se manifiesta con un ascenso y un comportamiento lineal del tiempo de reposo. En el límite de la región A y B, el cambio de pendiente está caracterizado por un punto crítico (**p.c**) se ha denominado así en función de la importancia del pericarpio en la difusión puesto que esta estructura se degrada con las condiciones de proceso. Esto se debe a cambios físicos, referidos a una pérdida parcial del pericarpio y a un posible efecto de precolación (Gutiérrez, 2006). Inmediatamente después de este punto crítico, se detecta un incremento en la concentración de calcio residual en el grano, lo que quiere decir que la difusión de calcio va en aumento. Esto probablemente es debido a que los daños irreversibles ocasionados a la primera estructura de contacto con el álcali (pericarpio), ya no representa una barrera física para la difusión, sino que favorece la difusión a las estructuras internas como el endospermo y germen. Debido a este hecho, puede considerarse que la difusión de calcio al endospermo es a través del pericarpio.

El periodo C corresponde a un descenso bastante significativo de calcio, que está basado en la pérdida casi total del pericarpio, por efecto del tiempo de reposo y del lavado además de posibles pérdidas de la parte externa del endospermo y capa de aleurona.

Finalmente la última región D de la grafica de concentración de calcio residual correspondiente a la figura 7 manifiesta un incremento en el contenido de calcio, que puede estar relacionado con el mecanismo de fijación de calcio ahora en el endospermo; esto se debe a que la mayor parte del pericarpio se ha depositado en su licor de cocción. Por consiguiente, el pericarpio ya no es una barrera para que pasen los iones de calcio a las estructuras internas del grano, la entrada de calcio es casi simultánea para germen y endospermo.

El tercer punto importante de la gráfica es el comportamiento del contenido de calcio como función del tiempo de reposo, el desplazamiento de los puntos máximos de la concentración de calcio. Al disminuir la temperatura del tratamiento, este pico se corre hacia mayores tiempos de reposo. Esto se debe a que los cambios en el pericarpio dependen de la temperatura de cocción y este parámetro afecta la disolución de sólidos solubles, una disolución de las gomas y pectinas como explica Martínez *et al.* (2001), una remoción de la película cerosa que recubre la epidermis o capa más externa del pericarpio (Hurtado-Castañeda *et al.*, 2005). Estos cambios fisicoquímicos se verán reflejados en modificaciones como es el espesor por efecto de la temperatura. El deterioro de la estructura facilita el fenómeno de transferencia de masa a través del mecanismo de difusión, lo que refleja que a temperatura de 92 °C, el tiempo en que se llega a la máxima concentración de calcio en el grano es más rápido.

El análisis anterior se basa en el contenido de calcio en toda la estructura (grano total). Con estas observaciones no podría explicarse completamente el comportamiento de la gráfica, hasta no analizar que sucede con cada una de las estructuras del grano a través del tiempo. Considerando que el grano es un sistema multicapa, entonces la difusión de iones de calcio no será homogénea en el grano, pues cada una de ellas tiene diferente composición química. Al hacer el análisis por separado de todas las estructuras del maíz nos ayudará a entender como ocurre la difusión de agua y calcio para explicar con precisión el mecanismo de fijación de calcio residual.

3.6.1 Resultado de Calcio residual en pericarpio

Para entender el comportamiento del contenido de calcio en función del tiempo de reposo, presentado en la figura 7 para el grano total, fue necesario realizar una disección del grano en sus componentes anatómicos, iniciando por el pericarpio y determinar de manera cuantitativa el contenido de calcio residual. En la figura 8 se muestra el contenido de calcio residual en el pericarpio, como función del tiempo de reposo.

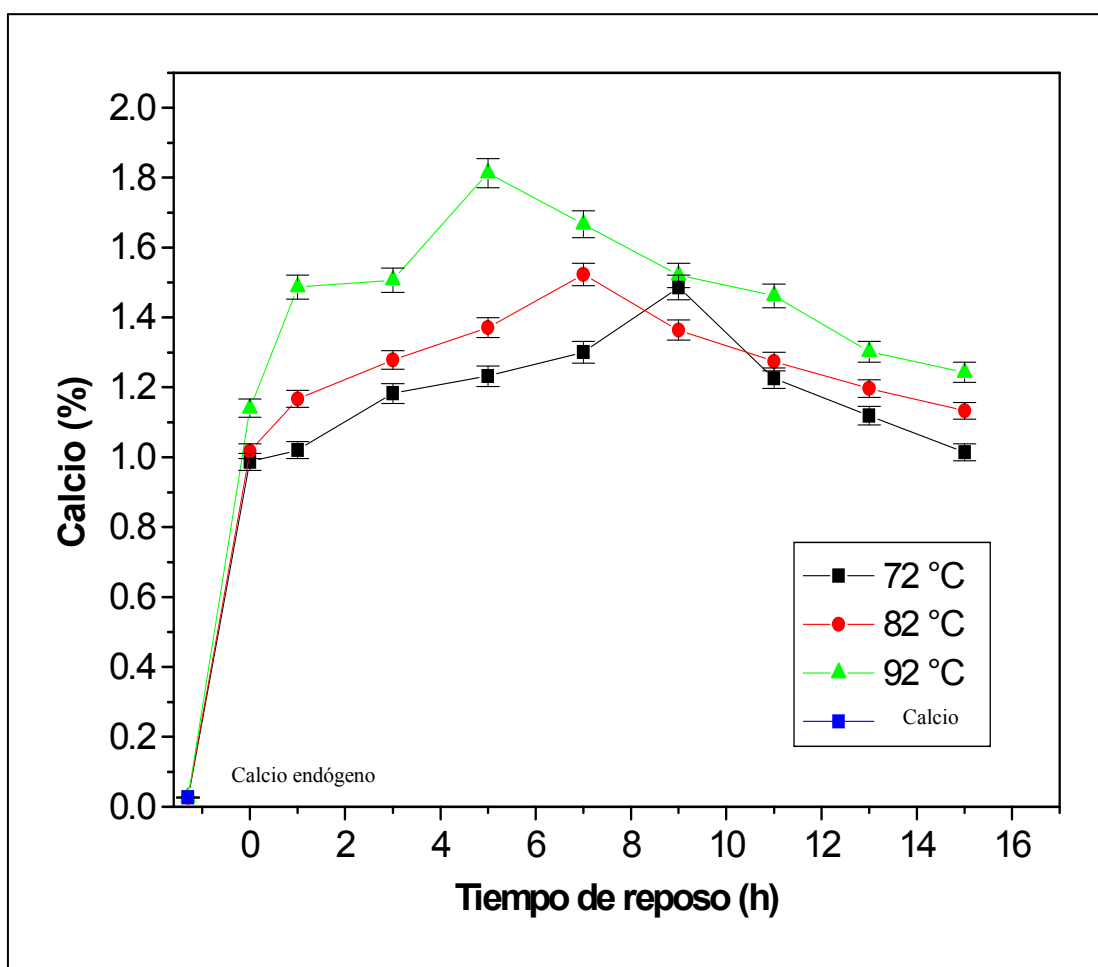


Figura 8. Concentración de calcio residual en pericarpio durante la nixtamalización.

Como se puede ver en la figura 8 la concentración de calcio residual en el pericarpio es mayor si la temperatura de tratamiento se incrementa; esto se puede apreciar a la temperatura de 92 °C hay un máximo a la hora 5, el cual se va desplazando hacia tiempos mayores, cuando la temperatura de tratamiento disminuye. Para cada tratamiento después de este pico característico, se presenta un descenso en el contenido de calcio, debido a las pérdidas de pericarpio por efecto de los lavados. Como el pericarpio se ha suavizado, es fácil de desprender del grano y depositarse en el licor de cocción, aumentando por consiguiente el contenido de calcio en el nejayote e incrementando las pérdidas de materia seca (Fernández- Muñoz *et al.*, 2004).

Como el proceso térmico-alkalino es realizado en condiciones atmosféricas, es factible que existan reacciones químicas entre los componentes del medio y el

grano en el nejayote. Esto significa que después de unos minutos de cocción se podrían formar algunos compuestos de calcio (Gutiérrez *et al.*, 2006).

El contenido de calcio mostrado en la figura 8 para el pericarpio, es entonces una parte del contenido de calcio del grano total mostrado en la figura 7 y pone de manifiesto que parte de la pérdida en el contenido total de calcio en el grano se debe a la pérdida por la disolución de los componentes del pericarpio y de los lavados del grano.

3.6.2 Resultado de Calcio residual en germen

La determinación cuantitativa de calcio residual en germen en función del tiempo de reposo obtenido en espectrofotometría de absorción atómica nos permitió construir la grafica 9, para diferentes temperaturas y tiempos de reposo.

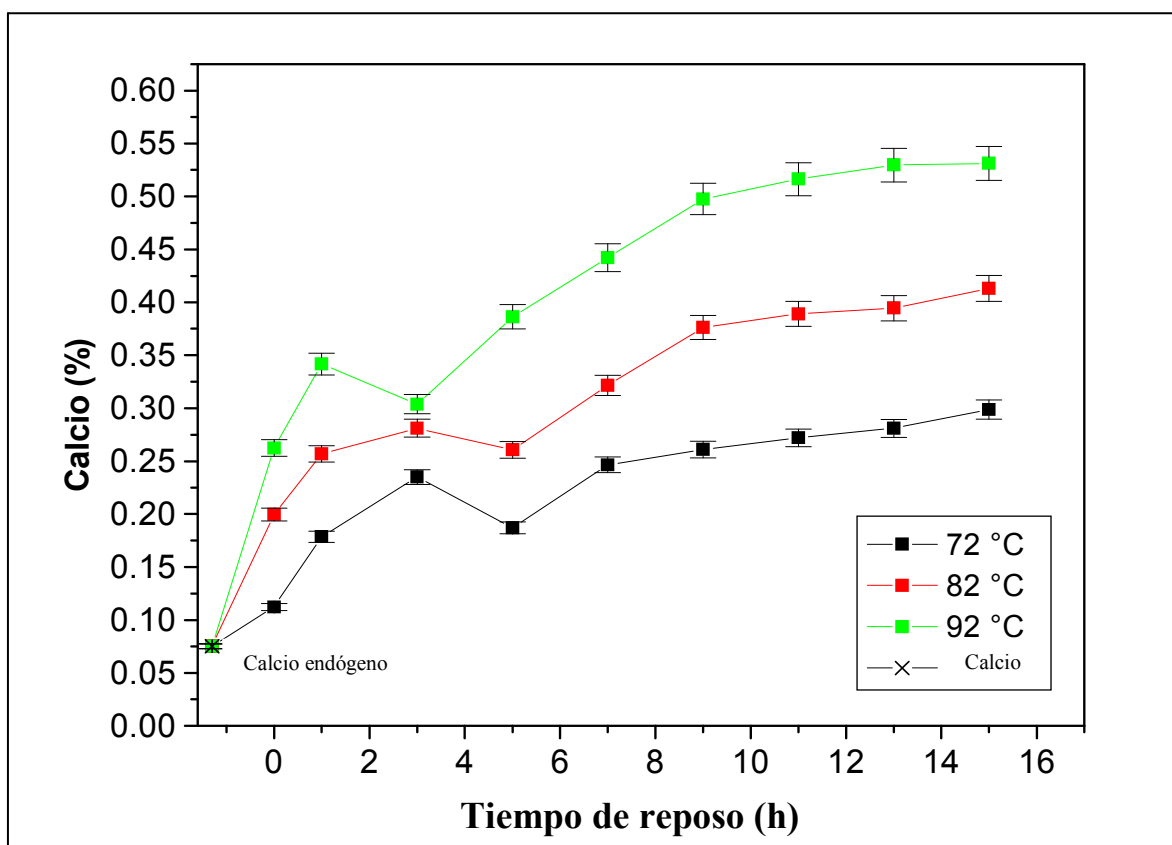


Figura 9: Concentración de calcio residual en germen durante la nixtamalización

En la figura 9 podemos apreciar que la fijación de calcio tiene una dependencia con la temperatura, el germen a 92 °C mostró mayor contenido de calcio que ha 72 °C con respecto al tiempo de reposo. Los puntos máximos de

concentración de calcio se encuentran localizados a 13 horas de reposo para la temperatura de 92 °C, y se mantienen para las 15 horas, no así para la temperatura de 82 y 72 °C donde tiene el valor máximo a las 15 horas de reposo, esto significa que el germen fija el calcio entre mas tiempo permanezca el grano de maíz en su licor de cocción llegando a un tiempo en que se satura, sin embargo la tendencia presenta un punto máximo a la primera hora de reposo e inmediatamente un descenso en el contenido de calcio, que se debe también a las pérdidas de esta estructura por efecto de los lavados efectuados al nixtamal lo que se conoce en la literatura como materia seca perdida (Sahai *et al.*,2000), por que las pérdidas de estructuras como el germen se han depositado en el nejayote llevándose una parte del calcio fijado durante el proceso. El contenido de calcio mostrado en la figura 9 (germen), corresponde a una parte de contenido de calcio total mostrado en la figura 7. El calcio que se fijo en el germen se debe a la saponificación de las grasas presentes en esta estructura a través de la reacción de hidrólisis de las grasas.

3.6.2 Resultado de Calcio residual en Endospermo

En la figura 10 se muestra en contenido de calcio en endospermo total en función del tiempo de reposo y de las temperaturas en las que el grano fue cocido.

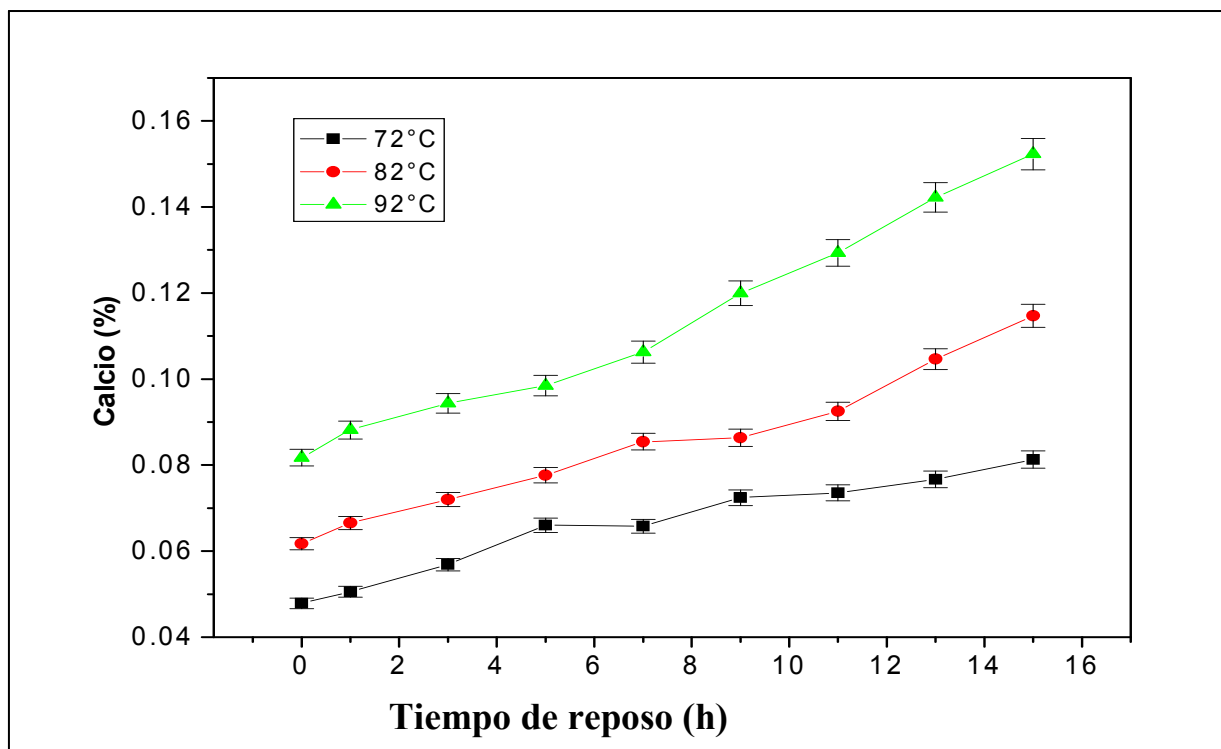


Figura 10: Concentración de calcio residual en endospermo durante la nixtamalización

El endospermo representa el 79.2 % del grano de maíz y es la estructura que presenta también mayor porcentaje de almidón. La concentración de calcio en el endospermo tiende a presentar un comportamiento casi lineal en función del tiempo de reposo. La fijación del calcio fue mayor a temperatura de 92 °C y menor a 72 °C, la tendencia de fijación de calcio aumento al aumentar el tiempo de reposo, la difusión en esta estructura es gobernada por cambios de permeabilidad en el pericarpio.

La gelatinización del almidón tienen una gran importancia en las propiedades finales de los productos elaborados con estos granos procesados; a mayor concentración de calcio fijado en esta estructura (endospermo) se retarda el fenómeno de la gelatinización (Zazueta *et al.*, 2002), por lo que la fijación de

calcio en esta estructura no es homogénea, debido a que las capas externas del endospermo tienen un almidón corneo y las más internas un almidón harinosos. El almidón vitrio es más duro que el harinoso además por localización fija mayor porcentaje de calcio debido a que la difusión se presenta primero en la parte del endospermo periférico y por que ha sido más tiempo expuesto a la solución alcalina. Por lo que fue necesario hacer un análisis en las diferentes partes del endospermo obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 11.

3.6.2.1 Resultado de Calcio residual en raspados del endospermo

En la figura 11 se muestra el contenido de calcio en la periferia del endospermo o primera capa (10 % de raspado) después en la segunda capa (20 % de raspado) y el restante (80 % de endospermo).

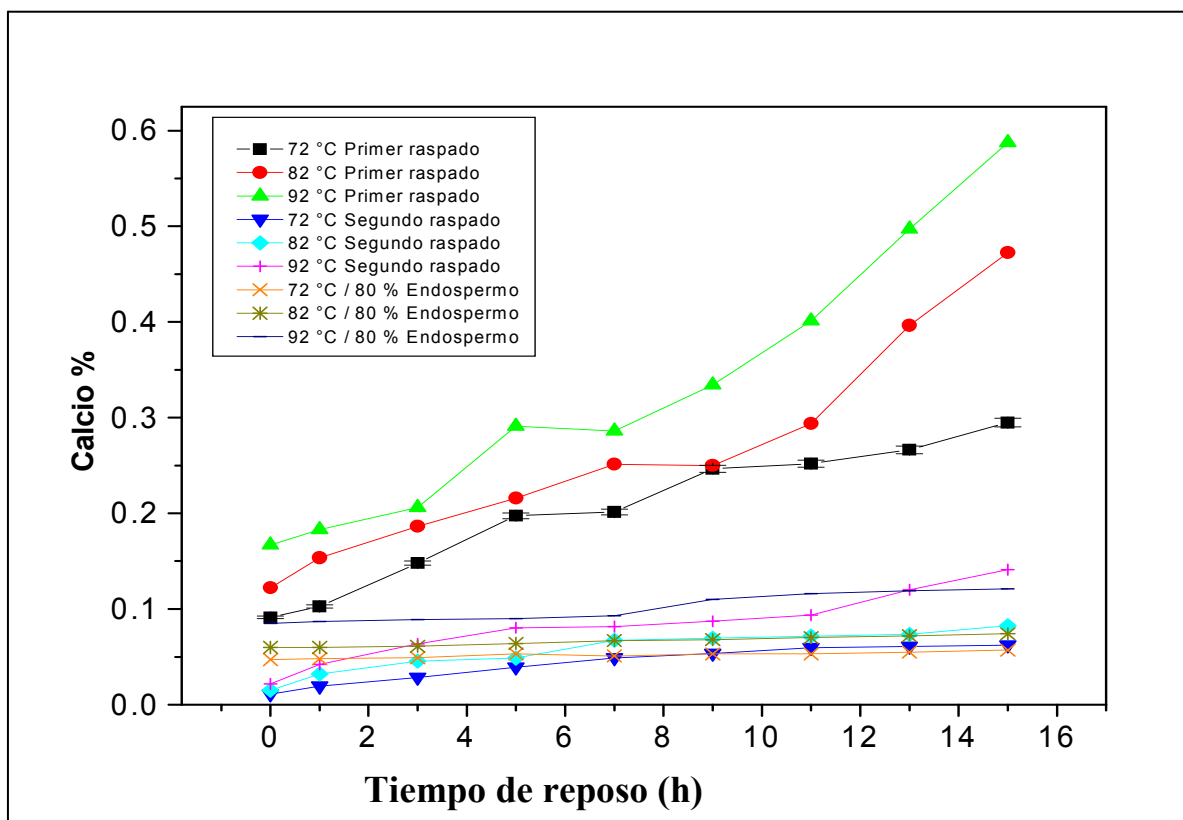


Figura 11: Concentración de calcio raspados de endospermo durante la nixtamalización.

La concentración de calcio en el endospermo se obtuvo desde la hora cero de reposo hasta las 15 horas.

En la figura 11 se muestra el contenido de calcio residual para el primer raspado, segundo raspado y endospermo restante. Podemos apreciar que hay una clara dependencia de fijación de calcio con respecto a la temperatura y en todas las capas la mayor concentración corresponde en muestras obtenidas a 92 °C y la menor a 72 °C.

También observamos que la fijación de calcio es mayor en la capa mas externa del endospermo, después en la segunda capa, y en el endospermo restante fue menor para todas las temperaturas. Esto se debe a que el primer y segundo raspado son la parte más externa del endospermo que ha sido expuesta con mayor tiempo en el licor de cocción o nejayote y la difusión al endospermo harinoso fue más tardía. Cabe resaltar que las primeras capas del endospermo están además continuas con la capa de aleurona que fija una importante cantidad de calcio por sus características químicas, esto significa que en la primera capa se fija una buena cantidad de calcio que corresponde a la capa de aleurona.

En el segundo raspado (20 %) y en el restante 80 % no hay cambios significativos en la fijación de calcio en el Endospermo debido a que tiende a presentar un comportamiento casi lineal con excepción del segundo raspado a 92 °C, esto significa que no se justifican utilizar tiempos largos de reposo en el proceso de nixtamalización debido a que se presentaran concentraciones de calcio constantes en las capas mas internas del endospermo para esta variedad QPM-H368C.

CONCLUSIONES

El estudio de fijación de calcio en las estructuras del grano de maíz durante la nixtamalización permitió conocer de manera general como ocurre el mecanismo de difusión de calcio en el maíz a diferentes condiciones de proceso de fijación.

- El contenido de calcio residual en el grano total obtenido por espectrofotometría de absorción atómica, mostró una marcada dependencia con la temperatura. A temperaturas más altas la concentración de calcio que se fija es mayor. En cuanto a la tendencia representativa de calcio residual en función del tiempo de reposo es la misma para las temperaturas de 72, 82 y 92 °C, sin embargo el desplazamiento de los picos máximos al aumentar la temperatura de cocción se desplazan a menores tiempos de reposo.
- Se realizó un análisis de fijación de calcio residual en pericarpio. Se puede concluir que esta estructura tiene una marcada habilidad de fijar calcio, pero a su vez éste se pierde por efecto del tiempo de reposo. Su tendencia presenta también un máximo a las 5 h a temperatura de 92 °C, a 82 °C de 7 h y a 72 °C de 9 h. La fijación de calcio en el germen se presenta primero que en el endospermo (Gutiérrez *et al.*, 2006) debido a que el espesor del pericarpio que rodea al germen es menor que el que cubre al endospermo y no es simultáneo como se había mostrado en la literatura (Fernández-Muñoz *et al.*, 2004).
- Algunas estructuras como el pericarpio y el germen presentan un máximo y posteriormente un descenso en la fijación de calcio, que es debido a la pérdida de materia seca durante el proceso, es decir estas estructuras van degradándose y perdiéndose, fracciones de ellas se depositan en el nejayote o licor de cocción, llevándose con ello calcio que se había depositado.

- La difusión de calcio en las estructuras internas como germen y endospermo está asociada con los cambios fisicoquímicos en la estructura más externa o pericarpio debidos a los efectos de la alta temperatura, prolongados tiempos de reposo y lavados excesivos.
- Desde el punto de vista nutrimental la concentración de calcio fijado en el grano es muy importante, debido a las funciones en que este mineral participa en el organismo humano por eso es importante encontrar un equilibrio entre las condiciones de proceso para tratar de mantener el mayor porcentaje de calcio en las estructuras del maíz.

RECOMENDACIONES

De igual manera, de acuerdo a lo estudiado en este trabajo, se tienen las siguientes recomendaciones:

- Dado que la relación el calcio-fósforo, debe ser 1:1, para que se presente una buena biodisponibilidad de calcio al organismo humano, debe cuidarse que el calcio tenga una concentración igual o mayor que el fósforo en harinas de maíz nixtamalizados, por eso se recomienda un análisis de espectrofotometría de absorción atómica para conocer la concentración de fósforo residual y uno de resonancia magnética nuclear para conocer el estado del fósforo en harinas de maíz nixtamalizadas obtenidas a diferentes condiciones de proceso.
- También se recomienda un análisis de microscopia electrónica de barrido de bajo vacío en pericarpio para conocer los cambios de estructura en el pericarpio que son los responsables de la difusión de calcio a las estructuras internas, como son el germen y endospermo.

ANEXO

Híbridos y variedades en México

El maíz híbrido es la primera generación de una cruce entre líneas autofecundadas. Esto es antes de que el maíz pueda ser cultivado, anteriormente se han debido de producir un alto numero de polinizaciones (5 a 7) entre las poblaciones de plantas cultivadas por el hombre.

Líneas autofecundadas

Una línea auto fecundada, se produce mediante la autofecundación de la misma planta, esto es, los estigmas de la planta deben polinizarse aplicando a mano el polen colectado de las propias espigas. Como el maíz sufre normalmente la fecundación cruzada, debe controlarse la polinización en cada generación, esto requiere generalmente de 5 a 7 generaciones. Cada línea tiene una combinación diferente de genes. Una línea obtenida por autofecundación es una línea pura, que desciende por autofecundación de una planta capaz de reproducirse idénticamente a si misma. Por lo tanto, dentro de una misma línea, cada planta será exactamente igual a las otras, esto es líneas vigorosas de aspecto uniforme (López, 1995).

La planta original autofecundada se denomina en general S_0 la progenie obtenida por la autofecundación de esta planta se denomina S_1 (primera generación autofecundada). La segunda generación autofecundada se denomina S_2 y así sucesivamente.

Las mazorcas de las plantas que se van a autofecundar se cubren con bolsas de papel parafinado, uno a dos días antes que aparezcan los estigmas.

Cuando ya han emergido los estigmas y la espiga esta derramando el polen, se levanta ligeramente la bolsa de papel que se le coloco a la mazorca y se corta la punta de la mazorca unos 2.5 cm, cubriendo de nuevo con la misma bolsa, esto se realiza para que al día siguiente los estigmas de la mazorca hayan crecido de manera uniforme unos 2.5 a 3.5 cm y se pueda llevar a cabo una buena polinización (Gill y Vear, 1965).

Híbridos y variedades en México

En México existe una gran cantidad de variedades regionales, variedades mejoradas e híbridos de maíz, propias de las principales regiones de país, según las condiciones ecológicas y la forma de cultivo, sea para temporal o de riego. Hasta el año 1996, se habían liberado un total de 168 maíces mejorados a nivel nacional de los cuales el 50.6 % son híbridos, 39.9 % son variedades y el 15.5 % restante son variedades sintéticas. De ese total, 35 maíces mejorados se han generado para regiones de valles altos; 52 para condiciones del tipo bajío o intermedias, 44 para trópico seco y 37 para trópico húmedo.

De los 85 híbridos, el 60 % son resultado de cruza dobles, 18.8 % de cruza triples, y el 17.7 % de 4 cruza simple y 3.5 % son híbridos varietales.

Actualmente se encuentran disponibles en el mercado 115 maíces mejorados y 53 han dejado de multiplicarse debido a que han sido superados en rendimiento, características agronómicas, capacidad de producción de sus progenitores y por su resistencia a plagas enfermedades y alto rendimiento por semillas mejoradas posteriormente (Robinson, 1991).

En algunos híbridos que se distribuyen comercialmente existe un diferencial negativo hasta 40 % con respecto a la semilla de origen del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), esto indica una gran pérdida de potencial de rendimiento del grano (Espinosa, 1990).

El INIFAP ha usado la siguiente nomenclatura para darle nombre a sus maíces mejorados.

Todos los nombres inician con una letra, que puede ser:

- V = Variedad
- H = Híbrido
- VS = Variedad Sintética
- HV = Híbrido Varietal

De las más de 160 variedades mejoradas obtenidas, algunas pueden considerarse como “ases” o “elites” por su aceptación y demanda. Algunos de estos materiales son: H-311, H-507, H-220, H-422, H-433, H-135, HV-313, M-335, etc, lo que llegan a tener esas semillas, hace que la demanda de estos maíces supere frecuentemente a la oferta, ya que prácticamente por si solas se promueven a pesar del poco esfuerzo de algunas instituciones por

comercializarlas. Un ejemplo es el híbrido H-311 del que se han llegado a vender aproximadamente 300 toneladas, pero se cree que este maíz puede tener un mercado superior a las 2000 toneladas con base en su excelente comportamiento, ya que es altamente redituable y productivo en relación a semillas (Duran, 1987).

El problema actual no es la existencia de genotipos de buen rendimiento, sino corregir el proceso que limita ofrecer semilla de alta calidad, así como el aumento de la producción de maíz, para disminuir gradualmente los niveles de importación de este cereal.

Los híbridos QPM's son un tipo de maíz, cuyo progenitor es el maíz opaco-2 de endospermo duro.

A menudo se proponen soluciones para mejorar la dieta, tales como el enriquecimiento de los alimentos básicos, la combinación de leguminosas o la creación de nuevas fuentes de proteínas. Sin embargo no es fácil cambiar los hábitos de las sociedades debido a la disposición de los alimentos en zonas marginadas donde existe hambre y desnutrición, así que las actividades de investigación y desarrollo deben ir a la par a fin de aumentar la aceptación de productos de consumo básico para las zonas mas desprotegidas., así surge la necesidad de producir híbridos de maíz con alta calidad proteica (QPM). El maíz de endospermo duro, es un maíz no apto para la nixtamalización debido a la dureza de su endospermo, sin embargo el QPM si es apto, pero hay pocos estudios realizados que comprueban su calidad nixtamalera.

Mertz *et al.* (1964) obtuvo semilla de maíz con el gen opaco-2 y comenzó un programa de investigación para modificar el endospermo del opaco-2 y producir endospermo suave. La cruce original con opaco-2 de la mejor adaptación, utilizó una cruce inicial reversiva con el macho y el heterocigoto F_1 como hembra. Se sembró la semilla de esta primera cruce reversiva y se polinizaron las plantas individuales con una mezcla de polen de la variedad 253 de grano blanco de linaje adaptado recurrente. Se hicieron cruces experimentales numeradas con polen donde se llevaron a esas mismas plantas individuales al probador opaco-2. Posteriormente se hicieron selecciones de hembras doble heterocigoto ($+/F_1 +/o2$); se basaron en el examen de las mazorcas de cruce reversa y se seleccionaron los individuos de cruce recesiva en base a los que mostraron segregación de un grano normal (grano harinoso) en la cruce

reversiva polinizada por el progenitor recurrente y la mazorca de prueba a donde se llevó el polen. Este sistema acelerado de cruza reversivas continuas con un ciclo de siembra.

Comenzando con la segunda siembra de cruce reversiva, la mitad del material se eliminó sembrando únicamente los granos normales obtenidos de las mazorcas segregantes de la cruce reversiva. Estas fueron una mezcla de $(+ / F_1, + / +)$ y $(+ / F_1, + / o2)$ luego se presentó un ciclo de la segunda cruce reversiva.

Las autofecundaciones y cruces experimentales seguidas del análisis de laboratorio, aseguraron el genotipo deseado, ya sea $(F_1 / F_1, o2 / o2)$ o $(+ / +, o2 / o2)$ dependiendo de las pruebas, a selección y la alta calidad proteica correspondiente. Las mazorcas autofecundadas que finalmente se seleccionaron deben probarse en el laboratorio antes de que cada mazorca se incluya en la población opaca-harinosa $(F_1 / F_1, o2 / o2)$ o la población opaca $(+ / +, o2 / o2)$.

La principal ventaja de este esquema es el control del locus harinoso con ciertas propiedades organolépticas del gen homocigoto F_1 , que hace a este maíz más deseable al consumidor y con características o propiedades nixtamaleras.

El híbrido resultante QPM es significativamente más pequeño que los granos convencionales utilizados para nixtamalizar, sin embargo son más tolerantes al maltrato y sobre cocción y tiende a reducir pérdidas de materia durante el tratamiento térmico alcalino debido a que el pericarpio presenta mayor espesor que el grano convencional; para los QPM's sus espesores se encuentran arriba de 87μ y para granos convencionales de $60-80 \mu$, además de que también presenta mayor porcentaje de pericarpio por arriba del 6 % del grano total, lo que los hace ser granos que mantiene una importante cantidad de fibra dietética necesaria para la buena digestión del organismo humano después del agresivo proceso térmico de nixtamalización (Serna-Saldivar *et al.*, 1992).

Pero además las variedades QPM presentan una textura de endospermo semi-suave por lo que requiere tiempos cortos de cocción durante la nixtamalización y produce productos con alta aceptabilidad y excelente sabor, rollabilidad y color (Serna-Saldivar *et al.*, 1990).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. 17th Ed. Official methods 965.17 Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, M. D.
- Alloanese, A.A., Lorenze, E.J.; Edelson, A.H., Tarlaw, A Wein, E.H., Carroll, L. (1986). Effects of dietary calcium: phosphorus ratios on utilization of calcium dietary calcium for bone syntesis in women 20-75 years of age, *Journal of Nutrition*. 28(7): 34.
- Amézquita, L. F. de J. (2000). *Fundamentos de espectrofotometría aplicada a la instrumentación química*. Ed. UAG. Pp .13-140.
- AACC. (2000). American Association of Cereal Chemists. *Approved Methods of AACC*, 10th Ed. The Association: St. Paul, M. N. USA.
- Arambula-Villa, G. (1994). Evaluación de un proceso continuo de extrusión para obtención de harinas instantáneas de maíz para la elaboración de tortillas. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán Sin. México
- Badui, D. S. (1999) *Química de los Alimentos*. Ed. Alambra. México, D. F. Pp.70-96
- Bedolla, S. y Rooney, L.W. (1984). Characteristics of U.S. and Mexican instantant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods*. World 29(11):732-736
- Bello, P. L. A.; Osorio, D. P.; Amaga, A. E.; Núñez, S. C. y Paredes-López, O. (2002). Chemical, physicochemical and rheological properties of masa and nixtamalized corn flour. *Agrociencia* 36:319-326.
- Bender Arnold. (1994) *Diccionario de nutrición y tecnología de los alimentos*. Ed. Acribia. España.
- Biliaderis, C. G.; Page, C. M.; Maurice, T. J. y Juliano, B. O. (1986). Thermal characterization of rice starches: A polymeric approach to phase transition of granular starch. *Journal of Agriculture and Food Chem.* 34: 6-14.
- Biliaderis, C. G. (1990). Thermal analysis of food carbohydrates, En: *Thermal Analysis of Food*. Elsevier applied Sci. London. Pp. 169-220.
- Biliaderis, C. G. (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian Journal of physiology and Pharmacology*. 69: 60-78.
- Braham, J.E y Bressani, R. (1966). Utilización del maíz tratado con cal. *Nutrición, Bramatología y Toxicología*. 5: 14
- Bressani, R. y Scrimshaw, N. S. (1958). Effect of lime treatment on in-vitro availability of essential amino acids and solubility of protein fractions in corn. *Journal Agric. Food Chem.* 6:770-774.
- Bressani, R.; Benavides, B.; Acevedo, E. y Ortiz, M. A. (1990). Changes in selected nutrient contents and in protein quality of common and quality-protein maize during rural tortilla preparation. *Cereal Chem.* 67: 515-518.

- Bressani, R.; Turcios, J. C.; Reyes, L. C. y Mérida, R. S. (2001). Caracterización física y Química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América Central. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 51(3):309-313.
- Cámara nacional del maíz industrializado 2005.
- Castañeda, P. R. (1990). *El cultivo de maíz*. Ed. AGT. México, D. F. Pp. 32-89.
- Conasupo (1985). *El maíz y la tortilla en la historia de México*. El Maíz industrializado. Ed. Conasupo. México. P. 4-5.
- Del Valle, F.R. (1972). Aspectos de comercialización del maíz QPM. En: *Mejoramiento nutricional del maíz*. Brezan, R, Bhaham, J. E y Behar, M. Ed. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Guatemala. Pp. 15-18.
- Desrosier, Norman. (1996) *Elementos de tecnología de los alimentos*. Ed. Continental. México, D.F.
- Duran, C.A (1987). *Reaprovechamiento de efluyentes de la industria de maíz*. UNAM, México, pp 10-13.
- Espinosa, C.A. (1990). *Tecnología de la producción de semillas de maíz, En México en: 1er Simposium Nacional del Maíz. El maíz en la década de los 90's Ayuntamiento de Zapopan*. Jalisco, México, 257-259.
- FAO. (1993 ^a). *Cambios físicos y químicos durante la elaboración. El maíz en la nutrición humana. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Roma, Italia. 5: 27-31.
- FAO. (1993 ^b). "El maíz en la alimentación humana". Colección: Alimentación y nutrición. Roma Italia. (ISB 92-5-303013-5). 25: 63-91
- Fennema, O. R. (2000). *Química de los alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza España. Pp. 34-52.
- Fernández-Muñoz, J. L.; Rodríguez, M. E.; Pless, R. C.; Martínez, L. I. y Baños, L. (2002). Changes in nixtamalized corn flour dependent on post cooking steeping time. *Cereal Chem.* 79: 162-166.
- Fernández-Muñoz, J. L.; Rojas-Molina, I.; González-Dávalos, M. L.; Leal M.; Valtierra, M. E.; Martín-Martínez, E. y Rodríguez, M. E. (2004). Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chem.* 81: 65-69.
- Figueroa, C. J. de D.; Acero, G. M. G.; Vasco, M N. L.; Lozano, G. A.; Flores, A. L. M. y González-Hernández, J. (2001) Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal. *Archivos latinoamericanos de nutrición*. 51(3): 293-299.
- Figueroa, C. J. de D.; Acero, G. M. G.; Vasco, M. N. L.; Lozano, G. A. y Flores, A. L. M. (2003). Nutritional quality of nixtamal tortillas fortified with vitamins and soy proteins. *Journal of Food Sciences and Nutrition*. 54(3): 189-200.
- Fisher H. (1991). *Análisis moderno de los alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Gill N.T., y Vear K.C. (1965). *Botánica Agrícola*. Ed. Acribia, Zaragoza España.
- Giral, B. A (1994). *Comercialización de un desarrollo tecnológico*. CINVESTAV, México, D.F.

- Gómez, M. H.; Mc Donough, M. C.; Rooney, L. W. y Waniska, R. D. (1989). Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *Journal Food Sci.* 54(2): 330-336.
- Gómez, M. H.; Waniska, R. D. y Rooney, L. W. (1991). Corn starch Characterization of nixtamalized Corn Flour. *Cereal Chem.* 68: 578-582.
- González, R.; Reguera, E.; Figueroa, J. M.; y Sánchez-Sinencio, F. (2004)^a. On the nature of the Ca binding to the hull of nixtamalized corn grains. *Food Sci. and Technology.* Elsevier 10:1016-1020.
- González, R.; Reguera, E.; Mendoza, L.; Figueroa, J. M. y Sánchez-Sinencio, F. (2004)^b. Physicochemical changes in the Hull of corn grains during their alkaline cooking. *Food Chem.* 52: 3831-3837.
- Gutiérrez. E. (2006). Cambios físicos en pericarpio de maíz durante la nixtamalización y su influencia en la cinética de difusión de calcio. *Tesis de maestría en Ciencias Químicas.* UNAM.
- Hosney, R.C. (1991). *Principios de ciencia y tecnología de los cereales.* Ed. Acibia. Zaragoza, España. Pp.32-76.
- Hurtado-Castañeda, D.M.; Fernández, J.; Gutiérrez, E.; Rojas-Molina, I.; Fernández- Muñoz, J. L.; y Rodríguez, M. E. (2005). The diffusion of calcium ion into the organic layers studied by a differential photoacoustic system. *Journal Physique.* IV: 1251-1255
- Illescas, R. (1943). *La teoría química de la formación del nixtamal.* Rev. Sociedad Mexicana de la Historia Natural. 4:129-148.
- Katz, S. H.; Hediger, M. L. y Valleroy, L. A. (1974). *Traditional maize processing techniques in the new world.* *Sci.* 184: 765-773.
- Kent, M (1971). *Tecnología de los cereales.* Ed. Acribia. Zaragoza España.
- Kies, C. (1985) *Nutritional Bioavailability of Calcium.* *America Chemical Society.* Washington, D.C.
- Klaus, J. L. y Karel, K. (1991). *Handbook of Cereal Sci. and Technology.* 23(2): 321-325.
- Lange, R. H. M. y Hill, G. D. (1987). *Plantas de interés Agrícola.* Botánica, Ed. Acribia. Zaragoza España. Pp.120-143.
- Lobo, O. R. (1997). *Principios de transferencia de masa.* Ed. UAM-I. México, D.F. Universidad Autónoma Metropolitana. Pp.163-218.
- López T.M. (1995). *Fitomejoramiento.* Ed. Trillas, México
- Martínez, B. F, Figueroa, J.D.C, Gonzalez-Hernandes, J, Sánchez-Sinencio, F, Martínez. J and Ruiz, M. T. (1993). An extruder and continuous process to make corn masa, instant masa flours for the preparation of tortillas and derivatives. Patente en trámite USA.
- Martínez, R.; Mendoza, S.; Reguera, E.; Ortiz, P. y Martínez, J. de la L. (2001). Kinetic approach to nixtamalization of corn pericarp. *Cereal Chem.* Inc.78: 107-112.
- Marin-Sánchez, A. y Gerrero-Velázquez, L. F. (1991) La nixtamalización del maíz en Miconsa Tlalnepantla. *Tesis Profesional.* Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Mertz, E. T.; Bates, L. S. y Nelson, O. E. (1964) Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science.* 145: 279-280.

- Montgomery, D. C. (2003). *Diseño y análisis de experimentos*. Ed. Limusa Willey. México, D.F. Pp. 126-164.
- (NMX-FF-034-1-SCFI-2002). *Harina de maíz nixtamalizado*. Norma Mexicana. Secretaría de fomento Industrial. Dirección de Normas.
- Nacional Financiera, S.A (1982) *Característica de la industria de la harina de maíz nixtamalizado* Cap. 1 En: Industria alimentaria-La industria de la harina de maíz p. 11-21. Ed. Nacional Financiera, S.A. México, D.F.
- Paredes- López, O. y Sarharopulos-Paredes, M. E. (1982). Scanning electron microscopy of limed corn kernels for tortilla marking. *Journal Food Technology*. 17: 687-692.
- Paredes-López, O. y Saharopulos-Paredes, M. E. (1983). Maize- A review of tortilla production technology. *Bakers Digest* .57: 16-25.
- Paredes-López, O.; Guzmán Maldonado, H. y Serna- Saldívar, S. (2000). *Los alimentos mágicos de las culturas indígenas de México*. El caso de la tortilla. El Colegio de Sinaloa. Sinaloa, México. Pp. 107-123.
- Poneros, A. G y Erdman, J. w. (1998). Bioavailability of calcium from Tofu, Tortillas, Nonfat Dry Milk and Mozzarella Chesse in Rats: Effect of Supplemental Ascorbic Acid. *J. Food Sci.* 53 : 208-201
- Reyes, C. P. (1990). *El maíz y su cultivo*. (Eds) .AGT. Ed. México, D.F. Pp 15-18.
- Ranhotra, G.S. (1986). Grain Products as a Source of Dietary Calcium. *Cereal Foods World*, 31(8): 535-536.
- Rojas, R. T. (1997). “*Las diversas maneras de cultivar maíz*”. Ed. Raíces. México. *Arqueología Mexicana*. 5(25): 33-49.
- Rooney, L. W. y Almeida-Domínguez. (1995). Productos de maíz nixtamalizado y calidad de maíz. Seminario sobre tecnología de la tortilla. Asociación Americana de Soya. México. D.F. Pp.25-34.
- Robinson, D. (1991). *Utilización del maíz Opaco-2 en productos alimenticios*, En: *El maíz de alta calidad proteínica. Compendio de las ponencias presentadas en el Simposio Internacional CIMMY/Purdue*, Ed. Limusa, México, 297-303.
- Rubio, M (1993). *La industria de la harina y la tortilla. Su modernización*. En: *la industria del maíz. Maíz Industrializado Conasupo y Grupo Maseca*. Ed. Grupo Azabache. México, D.F. P.p. 102-135.
- Sahai, D.S.; Surjewan, I.; Mua, J. P.; Buendía, M. O.; Rowe, M. y Jackson, D. S. (2000). Dry matter loss during nixtamalization of white corn hybrid impact of processing parameters. *Cereal Chem.* 77: 254-258.
- Sahai, D.S. Buendía, M.O. y Jackson, D.C. (2001). Analytical techniques for understanding nixtamalized corn flour. Particle size and functionality relationship in masa flour sample. *Cereal Chem.* 78: 14-18.
- Sefa-Dedeh, S.; Cornelius, B.; Sakyi-Dawson, E. y Ohene, E. (2003). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*. 86:317-324.
- Serna-Saldívar, S. O.; Knabe, D.A.; Rooney, L. W.; Tanksley, T. D. y Sproule, A. M. (1988). Nutritional value of sorghum and maize tortilla. *Journal Cereal Sci.* 7:83-94.

- Serna-Saldivar, S. O.; Gómez, M. H. and Rooney, L. W. (1990). Technology, chemistry and nutritional value of alkaline-cooked corn products. *Cereal Sci.* 10: 243-307.
- Serna-Saldivar, S. O.; Gómez, M. H.; Islas-Rubio, A. R.; Bockholt, A. J. y Rooney, L. W. (1992). The alkaline processing properties of quality protein maize. *En: Quality protein maize.* E. T. Mertz, Ed. *American Association of Cereal Chem.* St. Paul, MN. Pp 273-294.
- Serna- Saldívar, S.O.; Gómez, M. H.; Almeida- Domínguez, H. D.; Islas-Rubio, A. y Rooney, L. W. (1993). A method to evaluate the lime-cooking properties of corn (*zea mays*). *Cereal Chem.* 70:603-610
- Serna-Saldivar S. O. (1996). *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales.* Ed. AGT. México. Pp. 37-42
- Skoog, A. D. y Learly, J. J. (1995). *Análisis Instrumental.* Ed. Mc Graw-Hill. México, D.F. Pp. 227-295.
- Trejo-González, A.; Feria- Morales, A. y Wild- Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla production. Modifications of proteins Food, nutritional, and pharmacological aspects. Pp. 245-263 *En: Advances in Chemistry.* R.E. Freney and J.R. Whitaker, (eds). Acs: Washington, D.C.
- Vasal, S. K. (2001). "High quality protein corn". *En: Specialty Corns.* Ed CRC Press. Boca Raton,FL. USA. Pp: 85-129.
- Vaqueiro, C. M. and reyes, P. (1986). *Process for producing nixtamalized corn flour.* U.S Patent No.4, 594, 260.
- Vargas-Lopez, J.M. (1992). Desarrollo de procedimientos para la utilización de amaranto en la producción de harinas instantáneas. *Tesis de Doctorado en ciencias,* U. Irapuato, CINVESTAV-IPN, Irapuato, Gto. México.
- Watson, S. A. y Ramstad, P. E. (1987). Corn Chemistry and Technology. *Cereal Chem.* Inc. St Paul, Minnesota, U.S.A. Pp. 21-123.
- White, P. J. y Johnson, L. A. (2003). "Description, development, structure and composition of the corn kernel". Chapter 3. *En: Corn Chemistry and Technology.* 2 Ed. *American Association of Cereal Chem.* Inc. Minnesota, USA. Pp. 69-78.
- Zazueta, C.; Ramos, G.; Fernández-Muñoz, J. L.; Rodríguez, M. E.; Acevedo-Hernández, G. y Pless, R.n C. (2002). A radioisotopic study of the entry of calcium ion into the maize kernels during nixtamalization. *Cereal Chem.* 79:500-503.