



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos
Programa de Maestría en Ciencias y Tecnología de Alimentos

Especialidad en Almacenamiento y Procesamiento de Granos

**Evaluación de Cambios Fisicoquímicos que Sufre el Almidón, en el
Proceso de Elaboración de Tortillas, Utilizando Harina Nixtamalizada
por Extrusión de Maíz de Alta Calidad Proteica**

TESIS

Que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Isaías González Vera



Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
SIMBOLOGÍA.....	xvii
RESUMEN	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	5
General.....	5
Específicos.....	5
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
Generalidades Sobre el Maíz.....	6
Importancia.....	6
Producción nacional.....	8
Maíz de calidad proteica.....	8
Características agronómicas del MCP.....	15
Estructura y Composición Química del Grano de Maíz.....	15
Pericarpio.....	16
Capa de aleurona.....	20
Endospermo.....	20
Germen.....	21
Pedicelo.....	21
Valor nutricional y composición química.....	22
Carbohidratos.....	22
Cambios Fisicoquímicos Estructurales en el Almidón.....	25
Solubilidad.....	25
Birrefringencia.....	25
Absorción de agua.....	27
Gelatinización.....	27
Retrogradación.....	28
Dextrinización.....	29
Formación de almidón resistente.....	31
Proteínas.....	32
Lípidos.....	33
Vitaminas y Minerales.....	35
Proceso de Extrusión.....	35
Componentes básicos del extrusor de un solo tornillo.....	37
Mecanismo de alimentación.....	37
Tornillo.....	37
Cañón o barril del extrusor.....	37
Dado o boquilla.....	40
Dispositivos adicionales.....	40
Funcionamiento básico del extrusor de un solo tornillo.....	40

TABLA DE CONTENIDO (Cont...)

	Página
Cambios químicos en los materiales extrudidos.....	42
Procesos de Nixtamalización para la Elaboración de Tortillas de Maíz.....	43
Método tradicional.....	43
Método industrial.....	45
Elaboración de harina nixtamalizada por extrusión.....	47
Cambios en el Almidón Durante la Nixtamalización del Maíz.....	50
Método Tradicional.....	50
Método Industrial.....	55
Método por Extrusión.....	56
MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
Descripción General del Trabajo.....	58
Materia Prima.....	59
Caracterización química del maíz.....	59
Proceso de Extrusión.....	59
Molienda del maíz.....	59
Acondicionamiento.....	61
Extrusión.....	61
Obtención de las Harinas Nixtamalizadas.....	63
Secado de los extrudidos.....	63
Molienda.....	63
Caracterización de la Harina Nixtamalizada.....	63
Contenido de humedad.....	63
Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	65
Índice de tamaño de partícula (ITP).....	65
Índice de absorción de agua (IAA).....	66
Índice de material soluble (IMS).....	66
Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS).....	66
Densidad aparente (Dap).....	67
Determinación de pH.....	67
Color.....	68
Contenido de almidón total.....	68
Contenido de amilosa aparente.....	68
Microscopía óptica.....	69
Pérdida de birrefringencia.....	69
Temperatura de gelatinización.....	70
Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	70
Calorimetría de barrido diferencial (CBD).....	70
Viscosidad amilográfica.....	71
Difracción de rayos-x.....	71
Contenido de almidón resistente.....	72

TABLA DE CONTENIDO (Cont...)

	Página
Elaboración de la Masa.....	73
Contenido de humedad.....	73
Elaboración de las Tortillas.....	74
Evaluación de las Tortillas.....	77
Características físicas.....	77
Propiedades texturales.....	77
Firmeza y módulo de rigidez.....	77
Rollabilidad.....	78
Obtención de la tortilla molida.....	78
Diseño Experimental y Análisis Estadístico.....	78
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
Composición Proximal de la Materia Prima.....	80
Caracterización de las Harinas.....	82
Contenido de humedad.....	82
Distribución del tamaño de partícula.....	85
Densidad aparente.....	90
Determinación de pH.....	91
Color.....	92
Luminosidad (CL).....	92
Tendencia al Color Amarillo (Cb).....	95
Capacidad de absorción de agua subjetiva.....	96
Índice de absorción de agua.....	99
Índice de material soluble.....	103
Contenido de almidón.....	104
Contenido de amilosa aparente.....	107
Microscopía óptica.....	111
Microscopía electrónica de barrido.....	115
Temperatura de gelatinización.....	118
Calorimetría de barrido diferencial.....	121
Viscosidad amilográfica.....	127
Difracción de rayos-x.....	133
Contenido de almidón resistente.....	138
Determinaciones físicas de las tortillas.....	141
Rollabilidad.....	145
Firmeza.....	148
Módulo de rigidez.....	151
Correlaciones entre determinaciones Fisicoquímicas realizadas a los productos del proceso de elaboración de tortillas utilizando HMNE.....	152
Implicaciones del Presente Trabajo.....	155
CONCLUSIONES.....	158
RECOMENDACIONES.....	160
BIBLIOGRAFÍA.....	161

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Datos estadísticos de la superficie sembrada, rendimiento y producción de maíz en los estados de la Republica Mexicana....	9
2	Características físicas y químicas de híbridos de maíz común y QPM.....	13
3	Propiedades de las fracciones del almidón.....	26
4	Aminoácidos contenidos en maíz blanco dentado y un MCP.....	34
5	Contenido de minerales en el MCP.....	36
6	Composición proximal del maíz (MCP) y harina comercial.....	81
7	Análisis de varianza, valor F, de color en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	83
8	Valores de la distribución de tamaño de partícula (DTP) del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	86
9	Análisis de varianza, valor F, de la DAP y pH del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	87
10	Valores de densidad aparente y pH del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	89
11	Análisis de varianza, valor F, del color en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	93
12	Valores de luminosidad (L) y tendencia al color amarillo (b) en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	94
13	Análisis de varianza, valor F, de la capacidad de absorción de agua subjetiva en la HMNE y HCOM.....	97

LISTA DE TABLAS (Cont...)

Tabla		Página
14	Análisis de varianza, valor F, del IAA e IMS del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	100
15	Índice de absorción de agua del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	101
16	Contenido de almidón en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas..	105
17	Análisis de varianza, valor F, del contenido de amilosa en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	108
18	Análisis de varianza, valor F, de la temperatura inicial y final de gelatinización en el maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.....	119
19	Valores de la temperatura de gelatinización en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial obtenidas con la placa Kofler.....	120
20	Propiedades térmicas de los productos del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	122
21	Valores de temperatura de gelatinización obtenidos con el analizador de viscosidad rápido en los productos analizados del proceso para la elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	128
22	Valores de viscosidad máxima, obtenidos con el viscoamilógrafo rápido de los productos del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	130
23	Valores de porcentaje de cristalinidad relativa en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	136
24	Análisis de varianza, valor F, del contenido de almidón resistente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	139

LISTA DE TABLAS (Cont...)

Tabla		Página
25	Análisis de varianza, valor F, de las propiedades físicas de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	142
26	Valores de las propiedades físicas de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	144
27	Análisis de varianza, valor F, de la firmeza y módulo de rigidez de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	146
28	Correlaciones simples (r) entre determinaciones realizadas a los productos del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada por extrusión.....	154

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Principales estados productores de maíz, en el 2003.....	10
2	Desarrollo de viscosidad en híbridos de maíz molido (H-34, H30, QPM y QPMa).....	14
3	Partes constituyentes del grano de maíz.....	17
4	Sección transversal del grano de maíz.....	18
5	Sección longitudinal del grano de maíz.....	19
6	Modelo propuesto para la amilopectina con racimos de cadena definidos en términos de glucosas residuales en cadenas individuales (DP) y tamaño del racimo en Ångstroms. Las regiones cristalinas y amorfas son representadas por las áreas (1 y 2).....	24
7	Modelo propuesto para de la degradación del almidón durante el proceso de extrusión: Fuerza de corte → Calor → Humedad.....	30
8	Componentes básicos del extrusor de un solo tornillo.....	38
9	Proceso industrial para la obtención de harinas nixtamalizadas de maíz.....	46
10	Proceso de extrusión para la obtención de harinas nixtamalizadas de maíz.....	49
11	Modelo estructural de la masa: distribución de macrocomponentes en la masa de maíz nixtamalizada.....	52
12	Limpieza y preparación del grano de maíz de calidad proteica.....	60
13	Proceso de extrusión utilizando maíz molido integral.....	62
14	Producción de la harina de maíz (MCP) nixtamalizada por extrusión (HMNE).....	64

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura		Página
15	Producción de masa y tortilla elaborada de forma experimental con harina de maíz nixtamalizada por extrusión y comercial (MASECA).....	75
16	Producción de masa y tortilla elaborada de forma comercial con harina de maíz nixtamalizada por extrusión y comercial (MASECA).....	76
17	Contenido de humedad en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	84
18	Capacidad de absorción de agua subjetiva de las harinas nixtamalizadas para la elaboración de tortillas de maíz.....	98
19	Contenido de amilosa aparente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	109
20	Microfotografía de pérdida de birrefringencia en muestras de harina de maíz: A y A', maíz molido; B y B', harina de maíz nixtamalizada extrudida; C y C', harina de maíz nixtamalizada comercial. A-C, vistas con luz normal; A'-C', luz polarizada con una magnificación de 40x.....	112
21	Microfotografía de pérdida de birrefringencia en muestras de tortillas de harina de maíz nixtamalizada por extrusión; D y D', tortilla de harina de maíz nixtamalizada comercial; E y E'. D y E, vistas con luz normal; D' y E', luz polarizada con una magnificación de 40x.....	114
22	Microfotografía electrónica de barrido (MEB) del MM (A-1,2), HMNE (B-1,2) y HCOM (C-1,2). TE= Trozo de Endospermo, AGA= Agregados de Gránulos de Almidón; GA, GAL, GAP, GAG= Gránulo de Almidón, Libre, Parcialmente gelatinizado y Gelatinizado.....	116
23	MEB de la THMNE (D-1,2) y THCOM (E-1,2). EAA= Estructura de Almidón Amorfa, GA = Gránulo de Almidón.....	117

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura		Página
24	Termogramas obtenidos de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	125
25	Viscosidades amilográficas de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	129
26	Difractogramas de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	134
27	Contenido de almidón resistente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.....	140
28	Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la rollabilidad de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	147
29	Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la firmeza de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	149
30	Efecto del tiempo de almacenamiento sobre el módulo de rigidez de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
AACC	American Association of Cereal Chemists
ANDEVA	Análisis de Varianza
Am	Altura de mazorca
Ap	Altura de planta
AR	Almidón Resistente
CAAS	Capacidad de Absorción Subjetiva de Agua
Cb+	Tendencia al color amarillo
CIMMYT	Centro de Investigación del Mejoramiento de Maíz y Trigo
CL	Color Luminosidad
CVC	Catálogo de Variedad Certificada
Dap	Densidad aparente
DMS	Diferencia Mínima Significativa
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DT	Diámetro de la Tortilla
DTP	Distribución del Tamaño de Partícula
ET	Espesor de la Tortilla
E.U.A	Estados Unidos de América
FAO	Food Agriculture Organization
FCT	Factor de Compresión y Tensión
Fig.	Figura
FNo M	Factor Número de Malla
GA, GAL, GAP, GAG.	Gránulo de Almidón, Libre, Parcialmente Gelatinizado y Gelatinizado
GOD-POD	Glucosa oxidasa/peroxidasa
H	Humedad
HCOM	Harina de Maíz Nixtamalizada Comercial
HMNE	Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión
HTST	Temperaturas altas en tiempos cortos
HUH	Humedad de la Harina
HUMA	Humedad en Masa

LISTA DE ABREVIATURAS (cont...)

Abreviatura	Significado
IAA	Índice de Absorción de Agua
IMS	Índice de Material Soluble
INEGI	Instituto Nacional de Geografía e Informática
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
ITP	Índice de Tamaño de Partícula
MCP	Maíz de Calidad Proteica
MHCOM	Masa de Harina de Maíz Nixtamalizada Comercial
MHMNE	Masa de Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión
MTM	Millones de Toneladas Métricas
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma oficial Mexicana
pH	Potencial de hidrógeno
PG	Peso del Gel
PMbs	Peso de la muestra en base seca
PT	Peso de la Tortilla
QPM	Quality Protein Maize
QPMa	Quality Protein Maize (con alto contenido de aceite)
RFDI	Residuos de Fibra Dietaria Insoluble
ROL	Rollabilidad
rpm	Revoluciones por minuto
SAGAR	Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
THCOM	Tortilla de Harina Comercial
THMNE	Tortilla de Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión
V	Variedad
VT	Velocidad del Tornillo
Z1T,Z2T,Z3T,Z4T	Número de zonas del extrusor de un solo tornillo

SIMBOLOGÍA

Abreviatura	Significado
Å	Amstrongs
cm ³	Centímetros cúbicos
cP	Centipoice
D	Diámetro (cm)
d	Distancia interplanar
ΔH	Entalpía de gelatinización (J/g)
g	Gramos
h	Hora
Ha	Hectáreas
kg	Kilogramos
kPa	Kilopascales
kW	Kilowatts
λ	Longitud de onda
L	Litros
M	Molar
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
mg	Miligramos
μm	Micrones o micrómetros
mL	Mililitros
MT	Millones de Toneladas
nm	Nanómetros
N	Normal
η	Número de longitudes de onda
Pa	Pascales
Sen	Seno del ángulo
Ton	Toneladas
Tp	Temperatura de pico de gelatinización " <i>at peak</i> " (°C)
To	Temperatura de inicio de gelatinización " <i>onset</i> " (°C)
W	Watts
θ	Ángulo de difracción
Ø	Base del grupo reductor en la cadena de amilopectina
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje

RESUMEN

Uno de los productos que tiene gran demanda debido a su facilidad y versatilidad en la preparación de productos nixtamalizados, es la harina nixtamalizada. De la cual, en el 2003, se destinó aproximadamente el 20 % de la producción total de maíz en México. Uno de los procesos alternativos que se está investigando para eficientar la nixtamalización del maíz es la extrusión. El maíz de calidad proteica (MCP-V537C), representa una buena alternativa para la generación de productos alimenticios de buena calidad nutricional, ya que dentro de sus características nutricionales, su proteína contiene el doble de lisina y triptofano que un maíz común. Por ser el almidón el principal constituyente del maíz, se le atribuyen cambios fisicoquímicos importantes que influyen de manera directa en las propiedades funcionales del producto final (tortilla), hasta ahora los estudios de los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón, han sido enfocados hacia la nixtamalización tradicional y harinas nixtamalizadas industriales. En presente trabajo el objetivo fue evaluar los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón, en las etapas del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada extrudida, utilizando maíz de calidad proteica (V-537C), y compararlos con harina nixtamalizada comercial. El MCP se molió (MM) a un tamaño de partícula de 0.5 mm, se le adicionó cal en una concentración de 0.3% p/p, y se dejó reposar por 12 h a 25°C. Posteriormente esta mezcla fue extrudida en un extrusor de tornillo a una razón de compresión nominal 1:1, velocidad del tornillo de 112 rpm, velocidad de alimentación de 45 rpm y la apertura del dado de salida de 3 mm. Las condiciones de proceso fueron las encontradas en un estudio de optimización previo cuya temperatura de extrusión fue de 135 °C y la humedad de acondicionamiento de 27.7%. El extrudido fue secado (30-40 °C/2h) y posteriormente molido, obteniendo así la harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE). De esta harina se elaboró masa y posteriormente tortillas (THMNE y TCOM). Para evaluar los cambios fisicoquímicos del almidón durante el proceso, se tomaron muestras del MM, HMNE y THMNE. Además, se almacenaron lotes de tortillas a temperatura ambiente, y se realizaron muestreos a las 2, 24 y 48 h, para evaluar sus características texturales (rollabilidad y firmeza).

A las muestras obtenidas de los productos del proceso se les determinó contenido de amilosa aparente, almidón resistente, difracción de rayos-x, viscosidad amilográfica, capacidad de absorción subjetiva de agua, ÍAA e ÍMS, microscopía óptica y electrónica, y entalpías de gelatinización por calorimetría de barrido diferencial. La molienda del grano propició daño mecánico a los gránulos de almidón fragmentándolos en piezas de diferentes tamaños, generando una gelatinización parcial en aquellos gránulos fragmentados, esta modificación en los gránulos coincidió con un alto valor de IMS obtenido en esta etapa. La cocción por extrusión provocó una mayor gelatinización parcial que la etapa de molienda, y en algunos casos sobregelatinizó el almidón de la HMNE, ambos efectos modificarán la forma granular del almidón, generando nuevas formas geométricas y asociaciones granulares. Estas formas y asociaciones geométricas fueron diferentes a las que presentó la HCOM. La capacidad de hinchamiento (viscosidad) y la ΔH de gelatinización fueron menores a las que presentó la HCOM. En esta etapa también cambió la cristalinidad de los gránulos de almidón, lo que se reflejó en la disminución del porcentaje de cristalinidad relativa. La cocción de la tortilla fue la que propició las mayores modificaciones a los gránulos de almidón, lo que fue evidente por la escasa presencia de gránulos íntegros, la generación de aglomerados que muestran la fusión de los gránulos de almidón, el porcentaje más bajo de cristalinidad relativa, el bajo pico de viscosidad, incrementó del porcentaje de almidón resistente con respecto a la HMNE, y disminución en la T_i , T_p y ΔH de gelatinización. En esta etapa dichos cambios mostraron una tendencia similar en ambas tortillas (THMNE y THCOM). Las modificaciones que sufrió el almidón en la HMNE parecen incrementar el proceso de retrogradación, tal como lo mostraron las propiedades texturales realizadas (firmeza y módulo de rigidez) durante el almacenamiento, ya que fueron mayores en la THMNE que en la THCOM. Ambas propiedades tuvieron un mayor efecto en la THMNE a las 24 h de almacenamiento, ya que se incrementaron drásticamente. Sin embargo, es importante señalar que las THMNE frescas (2 h), muestran una firmeza similar a las que presentan las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización, de acuerdo con la literatura consultada. De acuerdo

con los análisis fisicoquímicos realizados, el almidón en la harina nixtamalizada por extrusión sufrió cambios más severos, que los observados en la harina elaborada comercialmente.

Palabras clave: almidón, maíz de calidad proteica, harina nixtamalizada, extrusión.

INTRODUCCIÓN

El cereal fundamental en la alimentación de los antiguos mexicanos fue el maíz, quienes por esta razón lo consideraron como la materia de su propia carne; el cultivo intensivo de este cereal permitió el desarrollo y florecimiento de todas las civilizaciones precolombinas (Solís, 1998). Actualmente sigue jugando un papel fundamental como materia prima para la elaboración de una gran variedad de productos alimenticios. De acuerdo a la Cámara Nacional del Maíz (2003) se estima que de los 23.9 Millones de Toneladas Métricas (MTM) que se produjeron en el 2003, se destinaron de 3 a 5 MTM para la producción de harina nixtamalizada, lo que representa aproximadamente el 20 % de la producción total de maíz.

De acuerdo con Vasal (1974), los productos nixtamalizados aportan del 50 al 70% de las calorías y la mitad de las proteínas en gran parte de la población mexicana. Sin embargo, al igual que la gran mayoría de los cereales el maíz es deficiente en ciertos aminoácidos esenciales como la lisina y el triptofano (Rosenberg y col., 1960). Es por ello que, uno de los grandes retos actuales es el desarrollo de alimentos con buena calidad nutricional y que al mismo tiempo sean aceptados por el consumidor, lo que representa una buena oportunidad para la utilización de maíces con un mayor valor nutricional. Uno de estos maíces es el de la variedad 537C, conocido como maíz de calidad proteica (MCP), el cual fue desarrollado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en conjunto con el Centro de Investigación de Mejoramiento en Maíz y Trigo (CIMMYT) (Gómez-Noel y col., 2003), cuya característica principal es que la proteína contiene casi el doble de lisina y triptofano que un maíz normal, esto como consecuencia de una reducción de la proporción de zeína que mejora el balance de aminoácidos (Villegas, 2000).

El proceso alimenticio más empleado al que se somete el maíz en México es la cocción alcalina conocida como nixtamalización (Martínez-Herrera y

Lachance, 1979) y el producto que tiene una mayor demanda nacional es la tortilla de maíz, tal como lo muestra el consumo *per cápita*, el cual es de alrededor de 129 kg anuales.

Sin duda, uno de los logros más importantes a nivel industrial en el país fue la fabricación de harinas nixtamalizadas instantáneas, las cuales tienen como base el proceso tradicional sistematizado a gran escala (Bello y col., 2002). Esto como resultado de los nuevos hábitos alimenticios que hacen cada vez más necesario consumir productos con una menor labor de preparación para el consumidor, así como una mayor vida de anaquel. Es por ello que la harina nixtamalizada de maíz ha cobrado gran importancia para la elaboración de tortillas, debido a las ventajas que presenta sobre el proceso tradicional de nixtamalización. Dentro de estas ventajas podemos encontrar un mayor tiempo de conservación, reducción de la pérdida de sólidos durante la nixtamalización y se pueden procesar mayores volúmenes de producto (Baez, 1990). Sin embargo, aun que el proceso industrial de nixtamalización parece consolidado, se sigue investigando en procesos alternativos que disminuyan los tiempos de cocción, el consumo de agua (residuos efluentes "nejayote") y el consumo de energía en forma de calor. Uno de estos procesos alternativos para nixtamalizar es la extrusión. Este proceso consiste en someter a la materia prima a una temperatura alta en corto tiempo, donde el almidón es gelatinizado parcialmente o gelatinizado, las proteínas son desnaturalizadas y los extrudidos son texturizados y reestructurados (Wang y col., 1999).

Por otra parte, el almidón es el constituyente principal en los cereales (60-70% en peso), y en el caso del maíz no es la excepción ya que contiene aproximadamente el 70% en base seca en el endospermo. En la masa nixtamalizada, los gránulos de almidón y sus constituyentes moleculares forman una red de polímeros solubles dispersos en una fase continua de agua, soportados estructuralmente por gránulos parcialmente gelatinizados y gránulos de almidón libres, fibra soluble e insoluble y piezas de endospermo (Gómez y col., 1987). Estudios realizados a este componente (Pflugfelder y col., 1988; Campas-

Baypoli, 1997; Enríquez-Ramos, 2004) durante cada una de las fases del procesamiento de tortillas mediante el método tradicional de nixtamalización, se encontraron cambios fisicoquímicos importantes que influyen de manera directa en las propiedades funcionales (textura, color, sabor y vida de anaquel) del producto final (Gómez y col., 1989; García y Silva, 1992). Algunos de los cambios de este polisacárido que influyen en estas propiedades, son la reasociación de las moléculas de amilosa y amilopectina, la gelatinización y retrogradación, los cuales afectan de diferente forma las características de calidad de la tortilla, dependiendo del grado de modificación molecular.

Diversos estudios (Durán-Dominguez, 1978; Bazua y col., 1979; Bedolla, 1983; Gómez y Aguilera, 1983; Martínez, 1988; Mensah-Agyapong y Horner, 1992; Martínez-Bustos y col., 1996; Arámbula y col., 1999; Galicia-García, 2005) se han realizado con respecto a la elaboración de harinas nixtamalizadas por extrusión utilizando maíz blanco normal y MCP, la mayoría de éstos sólo están encaminados a la búsqueda y/o verificación de determinadas condiciones de proceso (aspectos nutricionales, texturales, variables de proceso) necesarias que permitan generar un producto similar al que se puede obtener con la harina nixtamalizada industrial. Ninguno demuestra estar relacionado directamente con las modificaciones que sufre el almidón en concreto, aunado a esto el MCP es un cereal de amplias perspectivas para una mejoría en la alimentación humana lo que hace necesario su estudio por los nuevos métodos de procesamiento (extrusión). Es por ello que resulta de interés generar información que nos permita entender con más claridad como influye este proceso tecnológico alternativo, sobre los cambios generados en el almidón, ya que como se discutió anteriormente estos intervienen de manera significativa sobre las propiedades funcionales del producto final (tortilla).

Además, tomando en consideración que es un proceso escasamente explotado industrialmente, los resultados que se generen puedan ser tomados en cuenta para tratar de mejorar a dicho proceso en un futuro. Bajo esta perspectiva

se decidió realizar esta investigación la cual consiste en evaluar los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón en el proceso de elaboración de tortillas, utilizando harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

OBJETIVOS

General

Evaluar los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón, en cada una de las etapas del proceso de elaboración de tortillas, utilizando harina nixtamalizada por extrusión de Maíz de Alta Calidad Proteica.

Específicos

1. Caracterizar física, química y reologicamente, la harina nixtamalizada obtenida por extrusión y compararla con una harina comercial.
2. Evaluar y monitorear los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón, en el maíz molido integral, harina nixtamalizada por extrusión y tortillas, y compararlos con una harina nixtamalizada comercial.
3. Evaluar las características texturales de la tortilla obtenida con harina nixtamalizada por extrusión.
4. Evaluar la relación entre las determinaciones fisicoquímicas realizadas a los productos del proceso de elaboración de tortillas con HMNE.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Generalidades Sobre el Maíz

Importancia

Hace 5000 años nuestros antepasados consumaron la hazaña de domesticar el maíz, y hace 3000 crearon el nixtamal incorporando cal al proceso, hecho que seguramente ocurrió de manera accidental (Solís, 1998). Las costumbres, ciencias y cultos de los pueblos están íntimamente ligados a los productos agrícolas que por excelencia consume su población. El maíz ha sido moneda, alimento y tradición para el pueblo de México, durante siglos la historia nacional y las condiciones de vida de los mexicanos han estado asociados estrechamente a este cultivo (Tedaldi, 1985).

Hoy en día el maíz sigue manteniendo una importancia estratégica en la producción agrícola nacional. La superficie que se destina para su producción anual es de alrededor de 8 millones de hectáreas, esto es un 40% de la superficie agrícola total. Por ser el cultivo de mayor tradición social y cultural, mantiene ocupada a cerca de una quinta parte de la población económicamente activa y a más de una tercera parte de los agricultores existentes en el país. Debido a su amplio desarrollo y trayectoria de múltiples encadenamientos entre industrias que procesan el maíz para uso alimentario y no directamente alimentario como: alimentos balanceados, dextrinas y dextrosas (INEGI, 1992).

El sector industrial de este grano es relevante en términos generales, esta clasificado en tres grandes rubros de acuerdo a su consumo: el primero, lo comprende la masa-tortilla (66 %), y la harina nixtamalizada (21%), que son los productos que absorben la mayor proporción del maíz industrializado y son

prioritarios para la alimentación nacional; el segundo, está formado por diversos derivados (11.7 %) (Almidón, fécula, glucosa, dextrina, entre otros, sumando 16 en total), que principalmente se utilizan como insumos en la industria textil, química, farmacéutica, papelera, cervecera, y alimenticia. Y por último diversos productos alimenticios (1.3 %) de poco valor nutritivo como lo son las hojuelas (corn flakes), y frituras de maíz (SARH, 1982). Como se puede observar el principal destino del maíz en México es para consumo, se estima un consumo *percapita* de 209 kg/año, y el principal producto que de éste se consume es la tortilla, con un promedio de 10 tortillas/día. De acuerdo con Serna-Saldivar y col. (1990), los productos nixtamalizados son una fuente importante de energía, proteína, fibra dietaria y calcio para las personas que dependen de éstos como alimento principal.

Durante siglos el maíz ha sido adaptado y/o acondicionado para la producción de tortillas, ante esta situación es necesario resaltar los atributos de la calidad de la tortilla, que poseen los maíces nacionales, así mismo es necesario conocer las cualidades de maíces criollos que tienen características muy particulares para la fabricación de diferentes productos alimenticios y que atienden a nichos de mercado específicos. Las oportunidades de mercado para producir alimentos a partir de maíz nixtamalizado son muy grandes, considerando que además de la demanda nacional hay un gran potencial de mexicanos que radica en los EUA (Bancomex, lo define como mercado de la añoranza). Según Ramirez-Wong y col. (1993), el consumo de tortillas en la unión americana se ha incrementado considerablemente, así como la expansión y crecimiento de la comida mexicana en todo el mundo, que deja de ser una comida exótica la cual es considerada como una de las cinco más importantes del mundo (Marcel, 1997).

Producción nacional

El cultivo de maíz actualmente sigue ocupando el primer lugar en la producción agrícola del país. Sin embargo, en los últimos años la producción se ha visto disminuida. En el 2002 se cultivaron 8.3 millones de hectáreas, en tanto que para el 2003, esta producción se vio disminuida ya que se sembraron 5.57 millones de hectáreas (INEGI, 2004). Los estados que tienen una mayor participación en cuanto a la superficie sembrada (Tabla 1), son los estados de Chiapas, Estado de México, Puebla y Oaxaca.

En la Fig. 1, se pueden observar los principales estados productores de maíz, destacando a los estados de Jalisco, Sinaloa y el Estado de México los cuales acaparan el 40 % de toda la producción nacional. Siendo el Estado de México una entidad donde se cultivan una gran variedad de maíces criollos. De los casi 24 MTM de maíz que requiere el país para su abastecimiento nacional, 19.5 MTM son producidas en el país y alrededor de 4 MTM tienen que ser importados de otros países para abastecer el mercado nacional.

Según la Cámara Nacional del Maíz (2003) estima que de los 23.9 Millones de Toneladas Métricas (MTM) que se produjeron en ese mismo año, se destinaron de 3 a 5 MTM para la producción de harina nixtamalizada esto representa aproximadamente el 20% de la producción total de maíz; de acuerdo con Serna-Saldivar (1996), se tiene un consumo anual aparente de harina nixtamalizada de maíz de aproximadamente 37 kg o el equivalente a 58 kg de tortillas, no tomando en cuenta otros productos elaborados a partir de la masa fresca.

Maíz de calidad proteica

La búsqueda de genotipos de maíz con alta calidad nutricional condujo a la identificación del gen mutante opaco o2o2, expresado en su versión

Tabla 1. Datos estadísticos de la superficie sembrada, rendimiento y producción de maíz en los estados de la República Mexicana.

Estado de la República	Superficie Sembrada (ha)	Rendimiento (Ton/ha)	Producción (Ton)
Aguascalientes	32	0.75	58684
Baja California	1680	3.04	4209
Baja California Sur	2993	5.70	30202
Campeche	126	4.85	189815
Coahuila	35679	1.01	32108
Colima	11650	2.55	29723
Chiapas	659086	2.07	1363613
Chihuahua	36385	1.20	35213
Distrito Federal	6621	1.44	9492
Durango	213057	2.00	402644
Guanajuato	173237	2.41	1261338
Guerrero	274193	2.56	1209164
Hidalgo	265382	2.43	604208
Jalisco	328096	4.90	3122596
Estado de México	511093	3.42	1923410
Michoacán	266431	3.25	1442715
Morelos	31745	2.68	84902
Nayarit	18343	2.30	184961
Nuevo León	53762	1.00	52898
Oaxaca	443971	1.48	713743
Puebla	500980	1.98	863243
Querétaro	109421	2.79	285928
Quintanarró	94933	0.69	58127
San Luis Potosí	169047	0.88	188859
Sinaloa	12335	1.20	2741316
Sonora	38374	5.85	229058
Tabasco	96019	1.68	145921
Tamaulipas	112247	0.75	290145
Tlaxcala	111625	3.04	265991
Veracruz	515963	5.70	1095484
Yucatán	123154	4.85	123481
Zacatecas	352806	1.01	522779

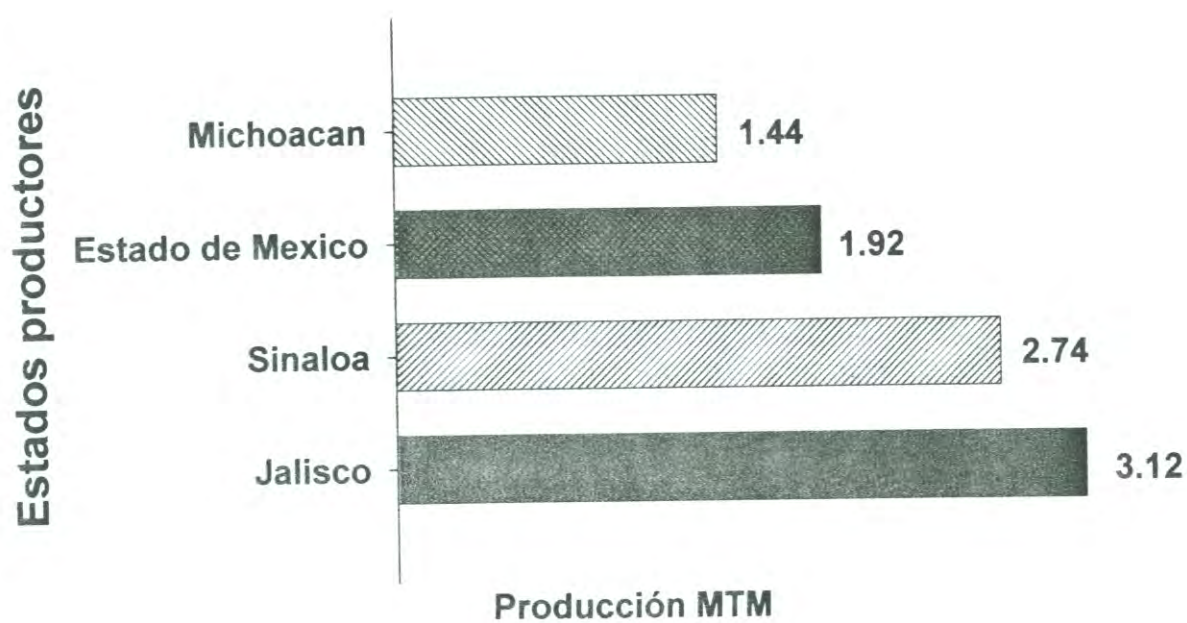


Figura 1. Principales estados productores de maíz, en el año 2003.

INEGI (2003).

homocigótica recesiva con mayor contenido de lisina y triptofano, este gen condujo a la creación del maíz opaco-2 (Mertz y col., 1964). Sin embargo, este grano pese a tener alta calidad nutritiva presentó gran cantidad de defectos tales como: poco peso, poca densidad, era opaco y harinoso, apariencia que a los agricultores y consumidores no gustaba. Aunado a esto se observó que al cultivarlo era muy susceptible al ataque de enfermedades e insectos, tanto en el campo como en el almacenamiento (Investigación y desarrollo, 1999). Durante la década de los 60 y 70's, en diversos países se realizaron estudios para introducir este carácter a determinados maíces. En México, fue en el año de 1970 cuando llegó al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) el doctor Surinder K. Vasal y en coordinación con la doctora Evangelina Villegas iniciaron la investigación para desarrollar el maíz QPM. Dicha investigación los hizo acreedores al premio mundial de la alimentación en el año 2000. Siendo su mayor aporte, el desarrollo de un mejoramiento convencional de los genes del maíz (Tierramerica, 2000). En dicho trabajo se hicieron modificaciones genéticas al maíz opaco-2 mediante cruces, otorgando al endospermo un fenotipo normal y vítreo, manteniendo altos niveles de lisina y triptofano en la proteína. Los granos de QPM contienen células densamente agrupadas con relativamente pequeños espacios de aire alrededor de los gránulos de almidón, lo que les confiere un incremento en la dureza del grano (National Research Council, 1988).

El desarrollo de germoplasma de maíz QPM con endospermo de textura vítrea, ha pasado por diversas fases incluyendo el desarrollo de bancos de germoplasma; donadores de genes, poblaciones de QPM y recientemente híbridos con alto contenido de aceite (Villegas y col., 1990). El maíz QPM ha sido evaluado eficientemente en la elaboración de tortillas y botanas por el proceso tradicional de nixtamalización (Serna-Saldivar y col., 1992). Así como también en la producción de productos expandidos por extrusión (Martínez-Bustos y col., 1996).

García (1994), caracterizó cuatro híbridos de maíz: H-30 y H-34 y de alta calidad de proteína, QPM y QPMa (este último con alto contenido de aceite), sus propiedades físicas y químicas son mostradas en la Tabla 2. Se encontró que el contenido de humedad fue similar entre los granos analizados. La cantidad de cenizas fue mayor para el híbrido H-30 y menor para el QPM, en tanto que el contenido de proteína y peso específico fue mayor en los maíces QPM, siendo este último parámetro influenciado por la forma y tamaño del grano. El tamaño de los nuevos híbridos QPM fue incrementado a través del mejoramiento genético (Bjarnson y Vasal, 1992). Los granos QPM analizados se situaron en un rango de peso de 1000 granos entre 242 a 299 g y los híbridos de maíz normal de 249 a 255 g; los valores reportados se encuentran dentro de los rangos establecidos para este tipo de maíces (Serna-Saldivar y col., 1992). En el mismo estudio se analizaron las características viscosas de los maíces molidos (Fig. 2).

El comportamiento de la viscosidad varió para cada tipo de grano, y se le atribuyó a las características genéticas particulares de cada grano. Los híbridos de maíz normal desarrollaron mayor viscosidad, el híbrido H-34 generó un mayor pico de viscosidad en relación al híbrido H-30 en una proporción del 23% durante el ciclo de calentamiento. Mientras que los híbridos de QPM desarrollaron valores menores de viscosidad máxima en relación a los híbridos de maíces normales, en una relación del 45 % (diferencia entre el pico de H-30 y el de QPM). En este mismo estudio también se observó que los cuatro híbridos presentaron un inicio de temperatura de gelatinización en tiempos y temperatura similares (4-4.6 min y 65-70 °C). Las diferencias en viscosidad pueden ser atribuidas, a que los maíces QPM contienen células compactas alrededor de los gránulos de almidón, con relativamente pequeños espacios de aire (National Research Council, 1988), lo que representa una mayor dificultad para la penetración de agua y consecuentemente se requiere de una mayor temperatura y tiempo para su gelatinización (García, 1994).

Tabla 2. Características físicas y químicas de híbridos de maíz común y QPM.

Híbridos	Humedad (%)	Cenizas ¹ (%)	Proteína ¹ Cruda (%)	Peso Especifico (Kg/L)	Peso de 1000 granos
H-34	10.80	1.35	10.2	74.40	249
H-30	10.55	1.50	10.1	70.25	255
QPM	10.50	1.41	10.4	79.15	299
QPMa	10.20	1.32	10.5	74.50	242

¹ Valores reportados en base seca.

García (1994).

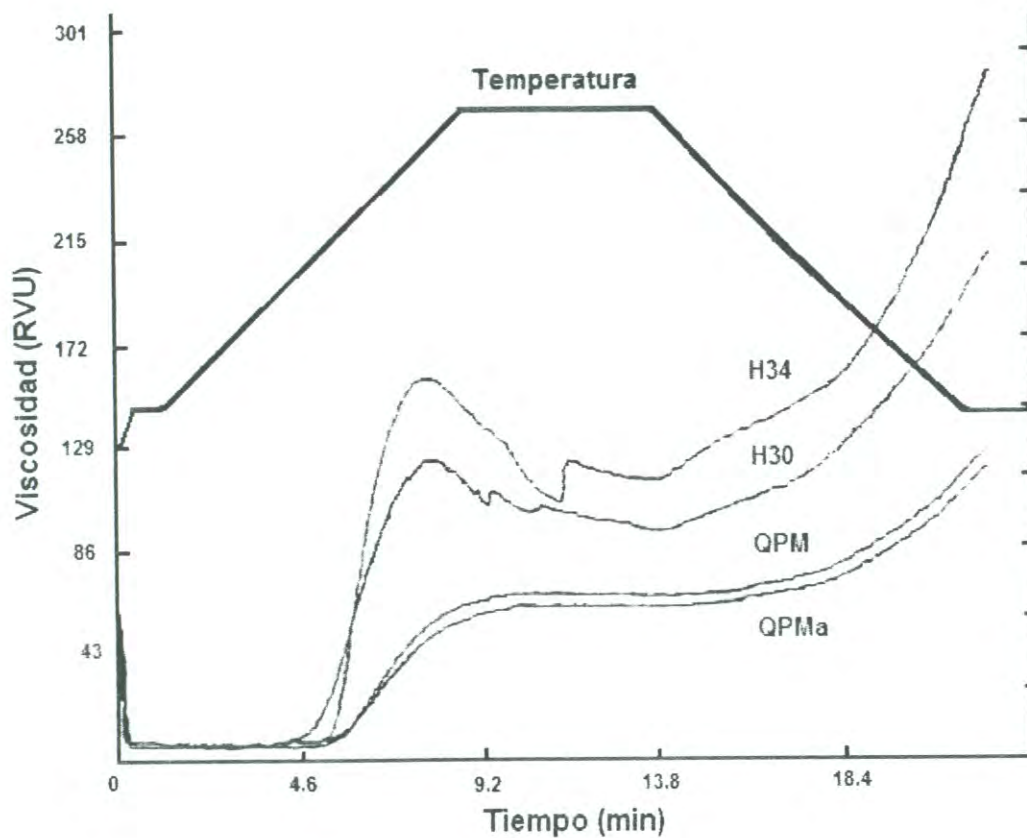


Figura 2. Desarrollo de viscosidad en híbridos de maíz molido (H-34,H-30, QPM y QPMa).

García (1994).

Características agronómicas del MCP (QPM)

A partir de 1996, el CIMMYT comenzó a utilizar este material para la floración de híbridos y variedades obteniendo así líneas sobresalientes, como es el caso de la variedad (V) 537C. El MCP (V-537C) es una variedad de polinización libre, obtenida a través de selección recurrente, mediante la recombinación genética de 10 familias sobresalientes de la población 63, en la localidad de Poza Rica Ver., durante el verano de 1987, se encuentra inscrita en el catálogo de variedades factibles de certificación (CVC) con el número de registro 13322-MAÍZ-565-200900/C (INIFAP, 2001). Esta variedad presenta en el ciclo de temporal una altura de planta (Ap) de 222 cm y de mazorca (Am) de 110 cm, una relación Am/Ap de 0.47 lo que nos indica que presenta tolerancia al acame, presenta floración a 57 días y 90 a 100 días a madurez fisiológica. Para el ciclo otoño-invierno, la altura de la planta y mazorca se reduce a 183 cm (Ap) y 86 cm (Am), su ciclo se propaga a 72 días a floración y 110 días a madurez fisiológica. Posee una longitud del pedúnculo y de la mazorca de 12 y 15.3 cm, respectivamente, la forma de la mazorca es cilíndrica con un diámetro de 5.5 cm con 14 hileras y un número de 33 granos por hilera. La textura del grano es semidentada, la coloración tanto del grano como del endospermo es blanca y el número de semillas por 100 g es de 277. La cobertura de la mazorca está entre el 85 al 90%, el aspecto de la mazorca es bueno así como su sanidad. Bajo condiciones de riego en el ciclo Otoño-Invierno se tiene reportado un rendimiento experimental de 6.43 y 6.01 (Ton/Ha) y para el ciclo primavera-verano de 5.36 y 5.44 Ton/Ha (INIFAP, 2001).

Estructura y Composición Química del Grano de Maíz

La planta de maíz (*Zea mays*) está clasificada como una planta monocotiledónea que pertenece a la familia de las gramíneas, familia que se caracteriza por tener sistemas fibrosos en las raíces, hojas alternas, venas

paralelas en las hojas y tallos con nudos sólidos (Matz, 1969), y de acuerdo a las características físicas del grano, se ha clasificado como dentado, cristalino, dulce, harinoso, reventador y ceroso. El grano de maíz botánicamente es una cariósipide, baya de semilla seca donde la cáscara de la fruta está fusionada a la semilla formando un solo grano, el cual se une al olote a través del pedicelo, en el pedicelo se encuentran los conductos internos que transportan los productos de la fotosíntesis al grano durante su desarrollo sobre la inflorescencia femenina (mazorca). Esta estructura puede estar formada por 300 ó hasta 1000 granos, dependiendo del número de hileras, el diámetro y la longitud del olote. El peso de cada grano puede variar desde 19 hasta 40 g/100 granos. Todos los cereales están compuestos de cuatro partes principales y el maíz no es la excepción, el endospermo que representa en promedio el 82.3%, el germen el 11.5%, el pericarpio el 5.3 % y el pedicelo el 0.8 % del grano (García, 1994). Cada una de estas partes estructurales se encuentran conformadas por estructuras más complejas (Figs. 3, 4 y 5).

Pericarpio

El pericarpio está compuesto de un conjunto de capas externas que rodean el grano y representan el 5.5 % del total del grano. Es la cubierta o cáscara de la semilla, constituida por una capa externa de células que es la epidermis protegida por una capa cerosa llamada cutícula. La parte que sigue es el mesocarpio que constituye la porción más grande de pericarpio, formada por una capa de células alargadas y estrechamente adheridas, con numerosas cavidades, que facilitan la absorción de agua. La última porción del pericarpio, está compuesta por células cilíndricas unidas fuertemente a la capa de aleurona, capa celular que rodea completamente al grano de maíz incluyendo al endospermo y al germen, su función es impartir propiedades semipermeables al grano de maíz (Paredes-López y Saharópulos, 1983; Watson y Ramstad, 1987; Hosenev, 1991; Jackson y Shandera, 1995).

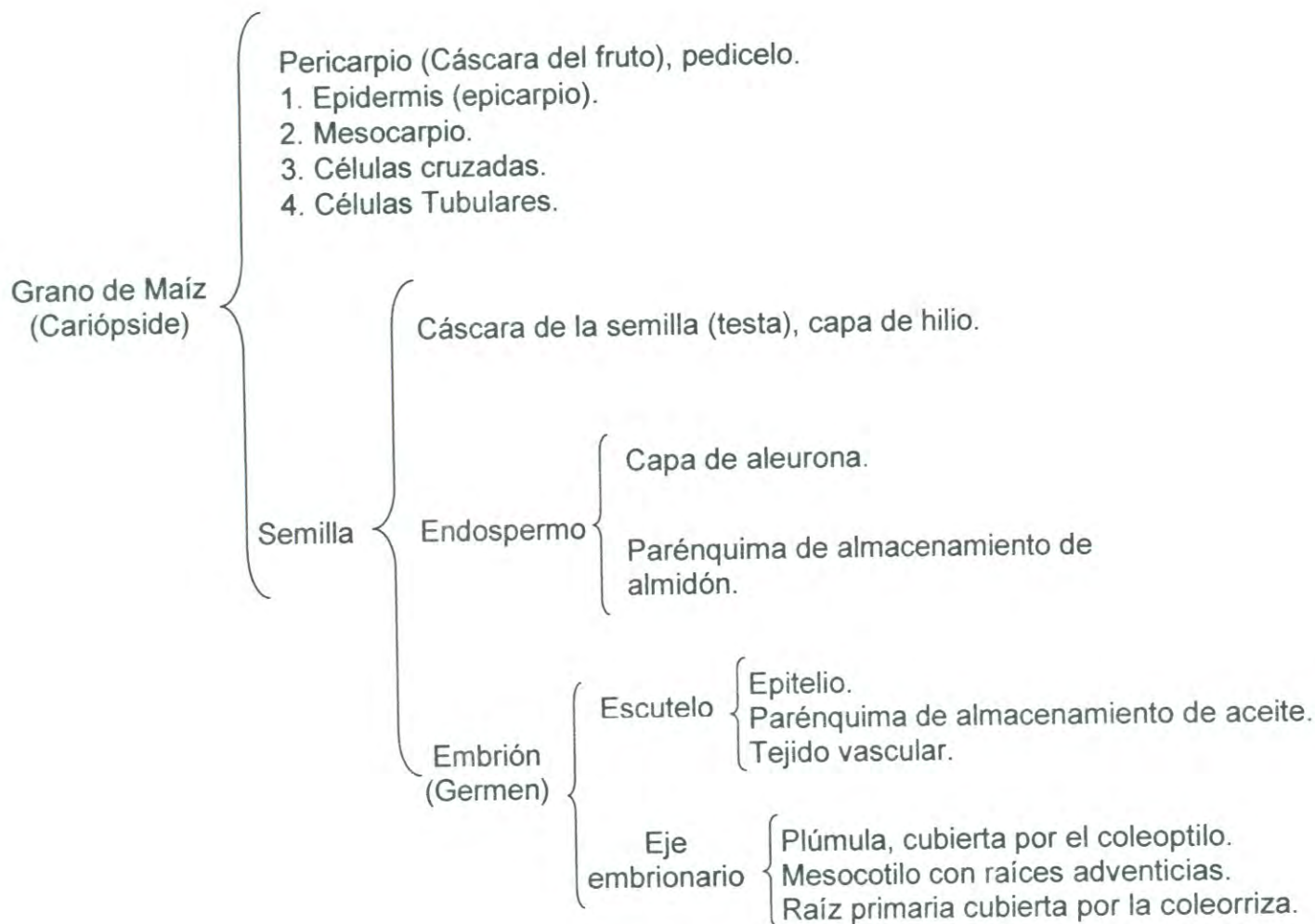


Figura 3. Partes constituyentes del grano de maíz.

Wolf y col. (1952).

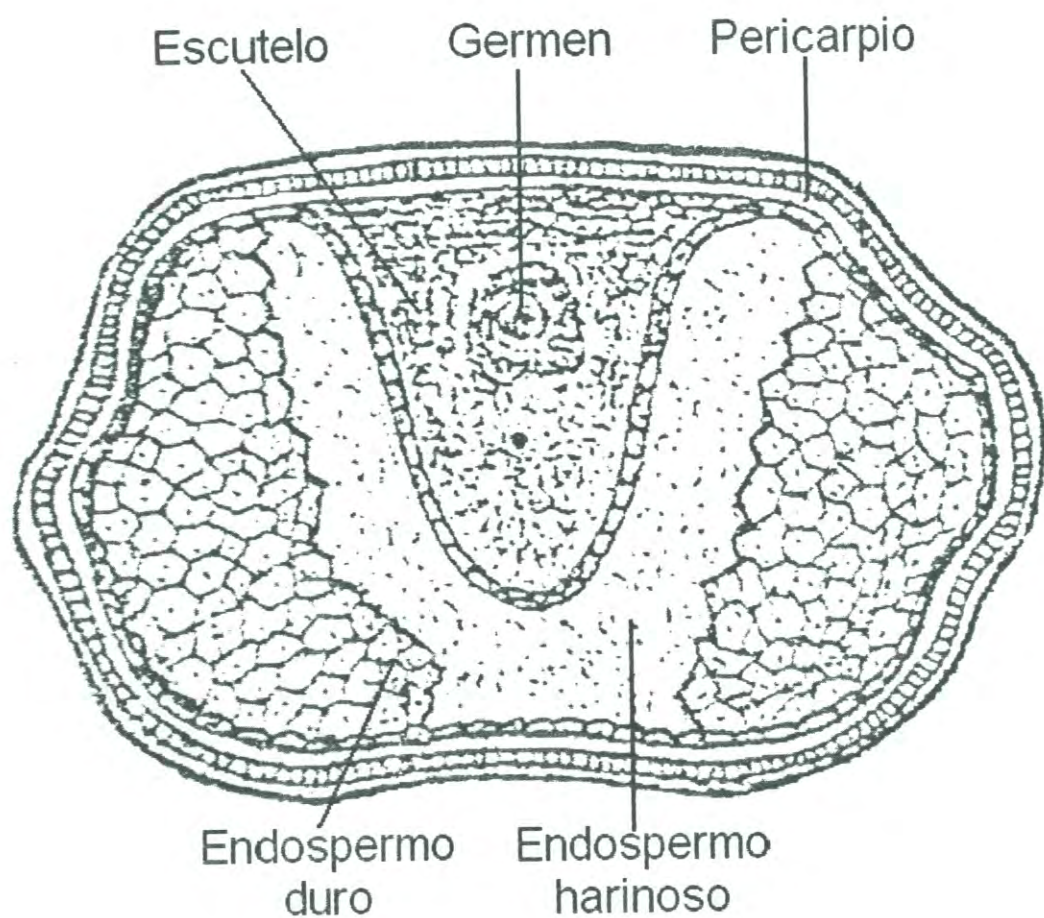


Figura 4. Sección transversal del grano de maíz.

Hoseney (1991).

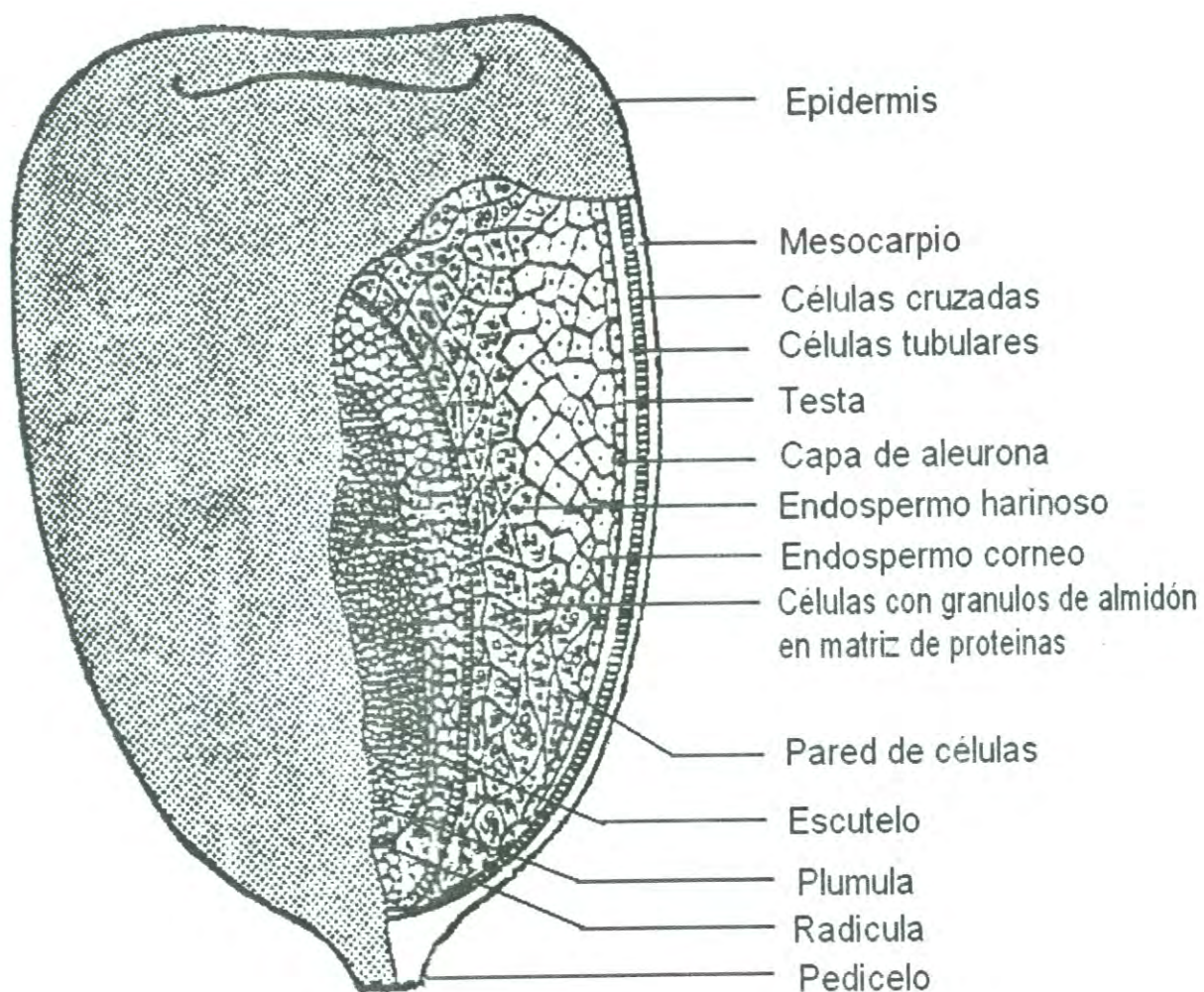


Figura 5. Sección longitudinal del grano de maíz.

Hoseney (1991).

La cubierta de la semilla está unida firmemente a las células tubulares por su lado exterior y a la epidermis nuclear por el interior. El color de algunos depende en parte de la existencia de pigmentos en estas capas celulares (Hoseney, 1991).

Capa de aleurona

La capa de aleurona por lo general tiene el espesor de una célula, rodea el grano por completo, es la capa exterior del endospermo, sus células tienen paredes gruesas, su forma es esencialmente cúbica y carecen de almidón, el grosor medio de las células es de 50 μm , la capa de aleurona es relativamente rica en cenizas, proteína y fósforo (Hoseney, 1991). La capa de aleurona juega un papel muy importante durante la germinación, ya que sintetiza las enzimas indispensables para desdoblar a los compuestos del endospermo (Serna-Saldivar, 1996).

Endospermo

Watson y Ramstad (1987), reportan la presencia de dos regiones diferentes en el endospermo: endospermo harinoso y endospermo córneo, siendo las proporciones variables en función del tipo de maíz, el grano de QPM posee una mayor cantidad de endospermo córneo. El endospermo harinoso presenta una apariencia opaca y quebradiza, los gránulos de almidón son de forma esférica, las células son grandes con paredes celulares muy delgadas, reducido porcentaje de glutelina, y presenta matrices proteicas delgadas e incompletas en algunos lugares de la periferia de los gránulos de almidón. En el endospermo córneo las células cercanas a la capa de aleurona son muy pequeñas, empaquetadas en una pared celular densa y alto porcentaje de glutelina. Los gránulos de almidón son de forma poliédrica, los cuales se mantienen unidos unos a los otros a través de matrices proteicas densas que envuelven a los gránulos de almidón, su apariencia translúcida es debido a que los

espacios intergranulares están cubiertos por cuerpos de zeína. El endospermo de maíz contiene el 75 % del total de las proteínas que se encuentran en el grano entero, que son principalmente proteínas insolubles a las que se les atribuye la dureza del endospermo. Existen cuerpos proteicos (cuerpos de zeína) que se encuentran embebidos en una proteína soluble y que en conjunto, dan lugar a la matriz proteica que liga a los gránulos de almidón (Wolf y col., 1952; Bedolla y Rooney, 1984; Jackson y Shandera, 1995).

Germen

El germen representa el 11.5 % del peso del grano (Hoseney, 1991), en algunos MCP este fue incrementado de acuerdo a las características genéticas buscadas en el nuevo híbrido. En esta estructura se localiza el 83 % de los lípidos, el 70 % de los azúcares y el 26 % de las proteínas del grano. La mayoría de las proteínas del germen son albúminas o globulinas y probablemente componentes del sistema enzimático de la célula. El germen encierra el eje embrionario y al escutelo (cotiledón) que ocupa el 90 % del germen y almacena los nutrientes que son utilizados para la germinación, y un eje embrionario formado por la plúmula o vástago, y la raíz primaria envuelta por la coleoriza (Watson y Ramstad, 1987).

Pedicelo

Es la estructura donde el grano se une con el olote, y se puede perder fácilmente durante el desgranado (Paredes-López y Saharópulos, 1983). Está compuesto por células en forma de estrella, arregladas en una estructura esponjosa bien adaptadas para una rápida absorción de humedad. Entre la punta y la base del germen hay un tejido negro conocido como capa hilar, que aparentemente funciona como un mecanismo de sellado cuando el grano llega a su madurez fisiológica (Watson y Ramstad, 1987; González, 1995).

Valor nutricional y composición química

El maíz como la mayoría de los cereales es una fuente muy importante de energía, esto debido a que el componente principal en todos ellos es el almidón (60-70 % en base seca). Sin embargo es una fuente proteica de baja calidad, y también es deficiente en niacina, vitamina del complejo B que previene la pelagra y que es sintetizada a partir del triptofano. Aún así Giral (1994), menciona que este cereal aporta el 38.8 % de las proteínas y el 59 % de la energía dentro de la canasta básica del consumo alimentario de la población mexicana.

Los principales componentes químicos del grano son: almidón, proteínas y lípidos, conteniendo también cantidades menores de fibra cruda, azúcares, minerales y otras sustancias orgánicas como son vitaminas (Watson y Ramstad, 1987).

Carbohidratos. La arquitectura cristalina de los gránulos de almidón es generalmente similar en todas las plantas (Jenkins y col., 1993). Su tamaño en el maíz es de 15 nm de forma esférica y poliédrica (Lineback, 1984). El gránulo de almidón se describe físicamente como un material semicristalino, formado por una región cristalina de un elevado orden molecular, y por un región amorfa con poco orden molecular. La región cristalina es más resistente al ataque químico o enzimático que la región amorfa. En la región cristalina hay mayor cantidad de amilopectina, y en la región amorfa hay mayor cantidad de amilosa (Greenwood, 1979). El contenido de almidón en el maíz varía en proporción inversa con el contenido de proteína en el endospermo (Freedman, 1973). Este componente es un polímero biológico semicristalino de alto peso molecular formado en la planta por la condensación progresiva de unidades de glucosa, cuya función es la de reserva energética natural. Está constituido por dos tipos de moléculas: un polímero lineal que es la amilosa y un polímero ramificado que es la amilopectina, las que se diferencian en peso molecular y estructura química. Generalmente se encuentran en las siguientes proporciones: 24 a 27 % de

amilosa y de 73 a 76% de amilopectina dentro del gránulo de almidón (Schoch y Elder, 1955). En ambas moléculas, la glucosa es la molécula básica constituyente. El promedio de distancia en que se extiende cada molécula a lo largo de la cadenas es de alrededor de 21 Å de forma repetitiva y es donde se genera el torcimiento para la formación de la doble hélice la cual es generalmente utilizada para representar la estructura cristalina nativa del almidón y la amilosa retrogradada (Zobel, 1988). La amilosa es un polímero lineal constituido de 250 a 2000 unidades de glucosa unidas mediante enlaces α (1-4) (Schoch y Elder, 1955). Dicho polímero lineal tiene cierta tendencia a orientarse paralelamente asociándose mediante puentes de hidrógeno unidos a los átomos de carbono; resultando una superficie hidrofóbica en el centro de la doble hélice y proporcionando una estructura cristalina (Harper, 1991). Se ha observado que bajo condiciones de temperatura (63 °C) en el centro de la hélice se pueden alojar moléculas formando complejos (Zobel, 1988). En solución acuosa, la amilosa se asocia rápidamente para formar un precipitado insoluble resultando en una red tridimensional y la afinidad por el agua decrece aumentando el tamaño del agregado y por lo tanto se forma un precipitado llamándose almidón retrogradado y al fenómeno retrogradación (Lehninger, 1985).

La amilopectina (Fig. 6) es otro componente del almidón y es un polímero ramificado formado de unidades de glucosa unidas por enlaces α (1-4) y en los puntos de ramificación por α (1-6). Cada ramificación contiene de 15 a 25 unidades de glucosa. La fuerza interna en la estructura del almidón depende del grado de asociación y el arreglo de las cadenas de sus dos componentes que influyen directamente en el comportamiento de éste en solución. La amilopectina se divide estructuralmente en tres tipos de cadenas; la cadena A, la cual esta unida al remanente de la molécula con enlaces simples (1,6), la cadena B esta unida a través de enlaces (1,6) pero puede tener una o más cadenas A y/o B sobre grupos hidroxilo primarios; la cadena única C, tiene la base del grupo reductor (Ø). Además como resultado de la estructura tridimensional, el almidón

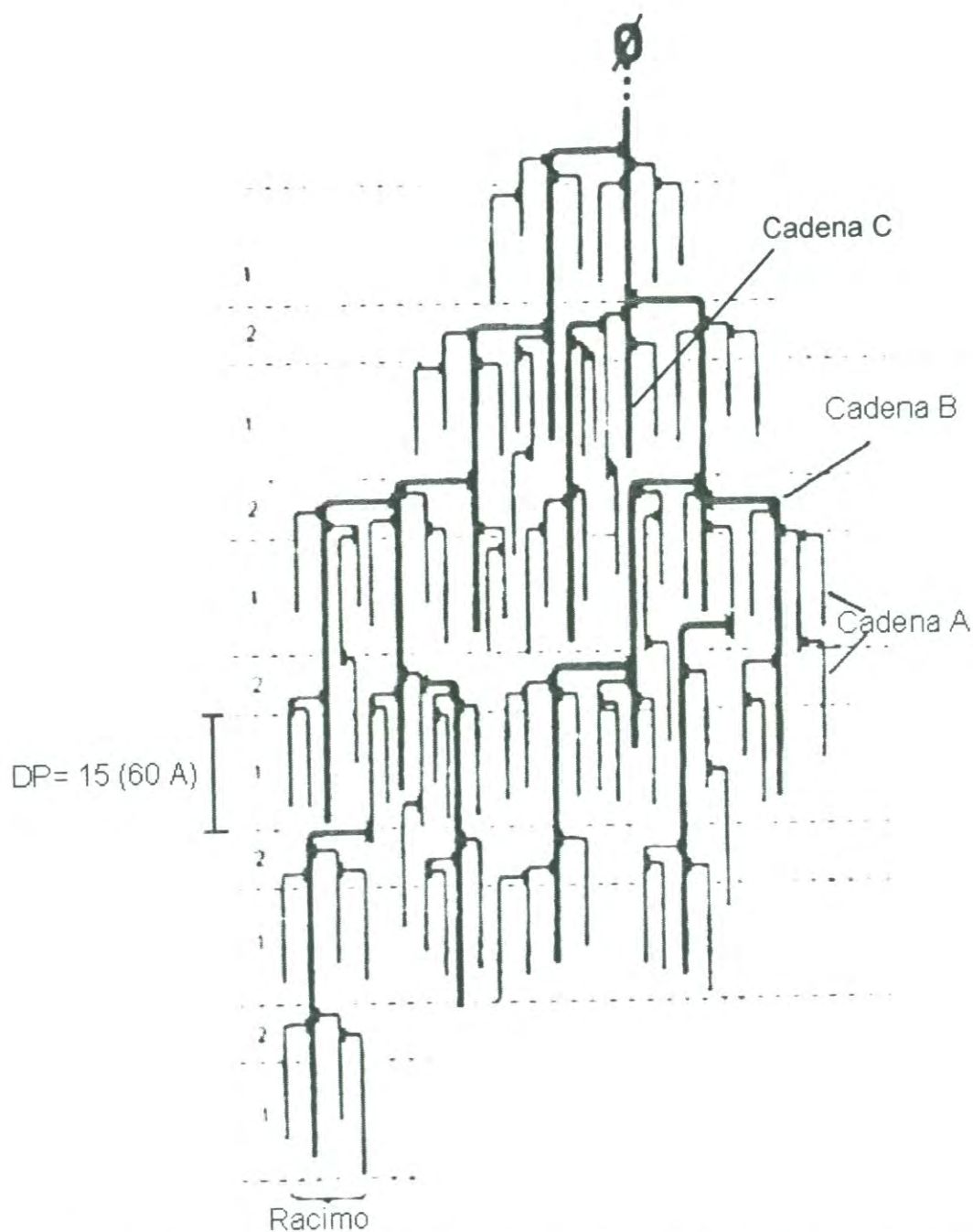


Figura 6. Modelo propuesto para la amilopectina con racimos de cadena definidos en términos de glucosas residuales en cadenas individuales (DP) y tamaño del racimo en Ångstroms. Las regiones cristalinas y amorfas son representadas por las áreas (1 y 2).

Suzuki y col. (1986).

es insoluble en agua fría, a pesar de que la molécula de almidón contiene numerosos grupos hidroxilo los cuáles son hidrofílicos (Leach, 1965). Cuando el almidón se encuentra en suspensión acuosa, o bien por acción de algunas sustancias químicas, procesos mecánicos y/o enzimáticos, esta red puede desintegrarse si ocurre un rompimiento en los puentes de hidrógeno. Tal fenómeno aumenta la hidratación y comienza el hinchamiento de los gránulos de almidón, que es irreversible. En la Tabla 3 se muestran las propiedades principales de los dos polímeros constituyentes del almidón.

Cambios fisicoquímicos estructurales en el almidón. La amilosa y amilopectina le confieren diferentes propiedades en su conjunto al gránulo de almidón y generalmente se consideran para determinar la aplicación de los productos obtenidos a partir de éste, las propiedades más importantes son:

Solubilidad. Los gránulos de almidón contienen cantidades significantes de agua (aproximadamente 10-12 %). Alrededor del 70 % del agua enlazada está accesible como un solvente para la D-glucosa (Brown y French, 1977). La cantidad y distribución del agua dentro de los gránulos de almidón son de importancia en las propiedades físicas y reacciones químicas. Los gránulos de almidón, dispersados en exceso de agua, muestran un limitado grado de hinchamiento reversible, y la reacción es irreversible (Katz y Derksen, 1932; Schierbaum y col., 1962).

Birrefringencia. Un cuerpo presenta birrefringencia cuando refracta la luz polarizada. El almidón refleja doblemente la luz debido a la orientación molecular de las cadenas en las regiones amorfas y no cristalinas en si (Zobel, 1988). análisis de rayos-x a bajo ángulo muestran que el gránulo de almidón está formado de regiones amorfas y cristalinas (Jenkins, 1993). La parte amorfa del gránulo está formada esencialmente por amilosa, mientras que la región cristalina está formada por cúmulos paralelos de cadenas cortas (50-60 Å) en la amilopectina, la cual así mismo, presenta regiones amorfas y regiones altamente

Tabla 3. Propiedades de las fracciones del almidón.

Características	Amilosa	Amilopectia
Estructura molecular	Esencialmente lineal	Ramificado
Enlaces	α -1,4	α -1,4 y α -1,6
Solución diluida	Inestable	Estable
Geles	Firme, irreversible	Suave, reversible
Formación de complejos	Favorable	No favorable
Color con yodo	Azul	Rojo- púrpura
Peso molecular	Típicamente > 0.5 millones	50-500 millones
Películas	Fuerte	Débil
Digestibilidad, β -amilasa	100%	60%
Grado de polimerización	1500-6000	3×10^5 - 3×10^6

Thomas y Atwell (1997).

cristalinas. Las regiones amorfas están asociadas a los puntos ramales de la amilopectina mientras que la región cristalina se debe a los planos formados por los cúmulos y las cadenas lineales de la amilosa en la molécula de la amilopectina (Rodríguez y col., 2001).

La birrefringencia infiere que las moléculas están alineadas en un orden, pero no necesariamente indica cristalinidad (Hoseney y col., 1983). Existen materiales que son birrefringentes sin ser cristalinos y viceversa, por ejemplo; los maíces con elevado contenido de amilosa muestran poca cristalinidad y birrefringencia a comparación de los maíces céreo y normal (Greenwood, 1979).

Absorción de agua. El almidón absorbe agua hasta alcanzar el equilibrio con el medio circundante y el proceso es reversible cuando el agua es fría, en presencia de agua caliente la absorción es función de la elasticidad y fuerza que presenta la amilopectina en unión con la amilosa siendo por consiguiente una absorción limitada, es decir; si dichos enlaces son hidrolizados el proceso es irreversible, cuando el gránulo no es fragmentado podrá recobrar su forma y humedad inicial siendo reversible cuando la temperatura del agua es inferior a la temperatura de gelatinización (Robles, 1986).

Gelatinización. Es el colapso (rompimiento) del orden molecular dentro del gránulo de almidón manifestado en cambios irreversibles en propiedades como: el hinchamiento de los gránulos, fusión de la cristalinidad nativa, pérdida de birrefringencia, y solubilización del almidón (lixiviación de los polisacáridos). El punto (temperatura) de inicio de la gelatinización y la intensidad con la que se lleva a cabo depende de la concentración del almidón, del tipo de almidón y la heterogeneidad de los gránulos (Stauffer, 2000). Este fenómeno ocurre a una temperatura menor cuando los gránulos son de diámetros pequeños por lo que existe un intervalo de temperatura de gelatinización de aproximadamente 10 °C. La viscosidad se incrementa hasta llegar a un máximo y después disminuye no obstante, se continúe incrementando la temperatura (Hamaker y Griffing, 1993). El proceso de gelatinización comprende una cinética de primer orden y depende

en gran medida de la energía (temperatura) aplicada, éste implica cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del almidón, así como también en la difusividad del agua y calor, viscosidad, comportamiento reológico y susceptibilidad a la digestión enzimática (Riva y col., 1991).

Cuando una suspensión de almidón se somete a un calentamiento en presencia de agua; en las primeras etapas, los gránulos se irán hinchando por la absorción de agua, pero conservarán aún sus propiedades de birrefringencia. Posteriormente, se llegará a una temperatura en la que los gránulos se hincharán más rápidamente hasta llegar a un punto en el que algunos presentarán un hinchamiento irreversible; si se continúa con el calentamiento, se observará que durante un estrecho intervalo de temperaturas, la población completa de gránulos se convertirá en un gel (Stauffer, 2000). Entre más pequeños sean los gránulos, se gelatinizarán a una menor temperatura. Conforme se calienta la suspensión de gránulos de almidón, existe un incremento de la viscosidad y solubilidad del mismo. El incremento de la viscosidad se debe a un aumento de tamaño de los gránulos ejerciéndose una presión entre ellos por la absorción del agua. Los gránulos de almidón de maíz son elásticos y fácilmente deformables, esto da a la pasta cocida una alta cohesividad y extensibilidad. Si la suspensión de gránulos se calienta a una temperatura superior a la de gelatinización, la viscosidad de la pasta seguirá incrementándose debido a que la cantidad de amilosa expulsada y el tamaño de los gránulos serán cada vez mayores. Sin embargo, este incremento en la viscosidad presenta un valor máximo (alrededor de los 100 °C), después de la cual la viscosidad comenzará a disminuir en forma gradual, aún cuando la temperatura de la pasta siga aumentando. Esta disminución de la viscosidad se debe a la desintegración de los gránulos hinchados (Seib, 1986, citado por Álvarez, 1996).

Retrogradación. Se puede definir como un proceso que ocurre cuando las moléculas previamente gelatinizadas de almidón comienzan a reasociarse en una estructura ordenada formando un gel rígido a partir de una suspensión de almidón

fría que previamente fue gelatinizado (Atwell y col., 1988). Dicho fenómeno ocurre debido a la formación de puentes de hidrógeno por la amilosa con puentes hidroxilo de moléculas adyacentes por lo que la misma amilosa va perdiendo la capacidad de hidratación con respecto a su estado inicial. La unión por puentes de hidrógeno se incrementa hasta alcanzar un tamaño determinado que provoca una precipitación como cristales de almidón. Un almidón retrogradado es más difícil que se solubilice, presenta baja afinidad por los iones y no es fácilmente hidrolizado por enzimas. La retrogradación es más significativa en la fracción de amilosa que en la de amilopectina debido a que su estructura lineal permite una mayor cohesión entre gránulos de almidón (Harper, 1991). En forma física, este fenómeno se presenta cuando una suspensión de almidón gelatinizado es sometida a un calentamiento y después a un enfriamiento, dando lugar a un gel rígido (Greenwood, 1979).

Dextrinización. Muchos alimentos, como botanas y cereales expandidos son preparados por extrusión (condiciones de elevada fuerza de corte mecánica y bajas condiciones de humedad). La dextrinización es definida como la hidrólisis parcial del almidón resultado de la precipitación en solución acuosa de alcohol (Whistler y Daniel, 1984). Para comparar las propiedades fisicoquímicas del almidón de maíz crudo, gelatinizado, dextrinizado, y muestras extrudidas, Gómez y Aguilera (1984), mostraron que las muestras extrudidas de maíz pueden ser visualizadas como materiales mixtos de gelatinización y dextrinización.

El efecto que ocurre durante el proceso de extrusión, es la modificación estructural de los gránulos de almidón ocasionados por las variables de extrusión (temperatura, humedad, velocidad del tornillo de extrusión, etcétera). Un esquema del modelo propuesto de los cambios estructurales que se llevan a cabo al extrudir almidón de maíz se presenta en la Fig. 7, este modelo suma la existencia de tres estados puros: crudo, gelatinizado y dextrinizado, ocurriendo en la práctica durante la degradación del almidón en secuencia continua. Posibles estados intermedios pueden incluirse en un modelo más complejo esto es: gránulos

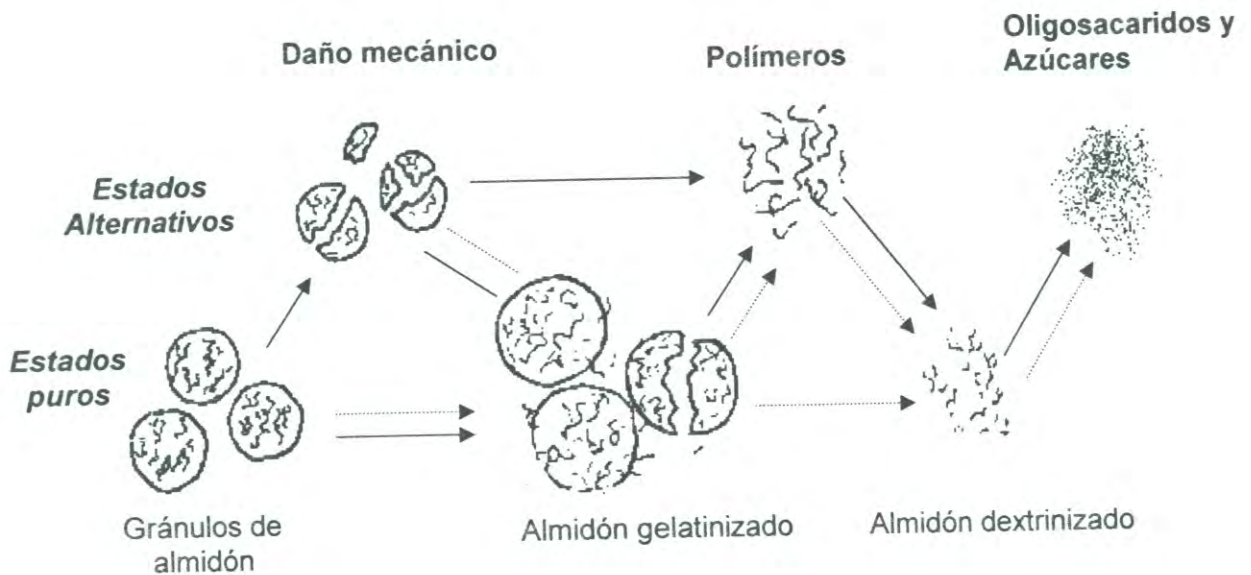


Figura 7. Modelo propuesto para de la degradación del almidón durante el proceso de extrusión: Fuerza de corte → Calor → Humedad.

Gómez y Aguilera (1984).

dañados mecánicamente, polímeros libres, oligosacáridos y azúcares (Gomez y Aguilera, 1984).

La acción de la fuerza de corte generada por el tornillo del extrusor a bajas temperaturas puede únicamente descomponer la microestructura. Sin embargo la dextrinización puede ocurrir aun a temperaturas debajo de los 150 °C y contenidos de humedad de alrededor del 12 % como lo prueban análisis térmicos diferenciales para almidón de maíz (Takahashi y col., 1982). Otras investigaciones correlacionan la gelatinización del almidón como una función del tiempo de residencia, temperatura, fuerza de corte y contenido de humedad en la muestra para el proceso de extrusión (Harper, 1981).

Formación de almidón resistente. En diferentes procesamientos térmicos de alimentos donde el almidón es un componente abundante (Ejem. pastas, cereales expandidos, tortilla, pan, entre otros) se ha encontrado la formación de un almidón de baja hidrólisis en el tracto gastrointestinal del hombre. A este componente se le ha asociado con bajas respuestas glicémicas y que además puede tener algunos efectos fisiológicos parecidos a la fibra dietaria (Englyst y Macfarlane, 1986). Saura-Calixto y col. (1993), mencionan que factores como el grado de molienda, ciclos de calentamiento-enfriamiento, secado y la proporción de amilosa-amilopectina influyen en la formación de este componente.

El almidón resistente (AR) es definido por la EURESTA (Proyectos de investigación europeos sobre almidón resistente) como la suma de almidón y productos de almidón degradados no absorbidos en el intestino delgado saludables al ser humano (Asp, 1992). La formación de AR se ha relacionado con la asociación de las cadenas de amilosa durante el enfriamiento del almidón gelatinizado. Estas estructuras comprenden fragmentos de cadenas cortas con un grado de polimerización de aproximadamente 60 (Silgeström y col., 1989). Los residuos del AR exhiben una transición endotérmica a 155 °C por

CBD, debido aparentemente a la fusión de la amilosa retrogradada (Sievert y Pomeranz, 1990).

El AR es fermentado por bacterias en el intestino grueso produciendo cadenas cortas de ácidos grasos, con una alta proporción de butirato. Los alimentos que promueven la producción de butirato están asociados con la disminución de enfermedades cancerígenas del intestino (MacIntyre y col., 1993; Cumings y MacFarlane, 1992; Englyst y Cummings, 1987; Scheppach y col., 1988 citados por Lionel-Noah y col. 1998). A partir del almidón de maíz con alto contenido de amilosa se pueden aislar cantidades importantes de AR (Kevin, 1995).

La clasificación interna del AR es propuesta por Englyst y col. (1986); ésta se basa en la naturaleza del almidón y su desarrollo en el alimento. AR1 corresponde a el almidón fisicoquímicamente inaccesible, atrapado en una matriz celular, como en las semillas leguminosas. AR2 gránulos de almidón nativo, como almidón de papa o plátano, cuya cristalinidad lo hace menos susceptible a la hidrólisis. AR3, almidón retrogradado, el cual puede formarse en el procesamiento de alimentos almacenados a temperatura ambiente (Lionel-Noah y col., 1998).

Proteínas. Las proteínas constituyen aproximadamente 6-10% del grano y se localizan principalmente en el endospermo y el germen. De acuerdo a su solubilidad se clasifican en: albúminas (solubles en agua), globulinas (solubles en soluciones salinas), prolaminas o zeinas (solubles en etanol al 70-80 %) y glutelinas (solubles en hidróxido de sodio) (Kent, 1978). Cuantitativamente las proteínas que predominan en el maíz son las prolaminas y glutelinas (80-90 %) y, aunque por su solubilidad cabría esperar una menor digestibilidad, su localización preferente en el endospermo del grano (proteína de reserva) tiende hacerlas más accesibles a la hidrólisis enzimática (Wiseman e Inberr 1990). Las prolaminas están concentradas en el endospermo y las globulinas y albúminas en el germen

lo cual explica las diferencias en la composición de aminoácidos entre las proteínas del endospermo y germen (González, 1996). El endospermo de maíz contiene el 75 % del total de las proteínas que se encuentran en el grano entero que son principalmente proteínas insolubles a las que se les atribuye la dureza del endospermo (Watson y Ramstad, 1987).

El MCP muestra una calidad proteica superior debido a que tiene el doble de lisina y triptofano, los cuales son aminoácidos esenciales. En la Tabla 4, se muestran los aminoácidos contenidos en el híbrido de MCP en comparación con un maíz blanco normal. Los mutantes con alta lisina tienen niveles reducidos de la fracción zeína y altos niveles de albúminas, globulinas y glutelinas (Misra y col., 1975).

Lípidos. El contenido de lípidos varía ampliamente dependiendo de la proporción de germen presente en el grano y su contenido de aceite. El MCP presenta alta cantidad de extracto etéreo en comparación con un maíz dentado normal. Esto es debido a que el tamaño del germen fue incrementado para los híbridos MCP y la porción de endospermo fue reducida (Martínez y col., 1996).

En general el grano contiene 4.5 % de lípidos y de este total el 85 % están presentes en el germen, el cual es la fuente comercial del aceite de maíz. Estos lípidos se encuentran principalmente como triglicéridos y constituyendo fosfolípidos (1.5 %), esteroides, tocoferoles (0.16 a 0.42 mg/g) y carotenoides (12 %) (Watson y Ramstad, 1987).

El principal ácido graso presente en el maíz dentado es el ácido linoleico (50 %), le siguen los ácidos oleico (35 %), palmítico (13 %), esteárico (4 %) y el linolénico (3 %). El contenido de fosfolípidos es de 1.5 % de los cuales el 60 % es lecitina y el resto en su mayoría es cefalina. Los esteroides se encuentran en una concentración baja y los principales son el campesterol (8 a 12 %), estigmasterol y β -sistosterol. El tocoferol se encuentra en una proporción de 160 a 420 ppm.

Tabla 4. Aminoácidos contenidos en maíz blanco dentado y un MCP.

Aminoácido (g de Lisina/16 g de N)	Maíz Blanco Dentado	MCP
Alanina	8.2	6.8
Arginina	4.2	7.5
Acido aspártico	6.2	7.8
Cisteina	1.4	2.3
Acido glutámico	19.4	17.7
Glicina	3.7	5.5
Histidina	3.3	4.7
Isoleucina	3.6	3.6
Leucina	13.4	9.6
Lisina	2.7	4.3
Metionina	2.2	2.3
Fenilalanina	5.4	4.7
Prolina	7.8	8.3
Serina	5.3	5.5
Treonina	3.8	4.5
Triptofano	0.56	1.01
Tirosina	3.3	4.1
Valina	5.0	5.7

Ortega y col. (1986).

El contenido de carotenoides es de aproximadamente 74 ppm de xantofilas y 1.6 ppm de carotenoides; siendo los carotenoides el principal pigmento del aceite de maíz (Watson y Ramstad, 1987).

Vitaminas y Minerales. El maíz contiene dos vitaminas liposolubles A y E y una gran parte de hidrosolubles. El contenido de vitamina A es genéticamente variable, generalmente en un promedio de 2.5 mg/kg de peso seco. Las vitaminas hidrosolubles tiamina (B₁) y piridoxina se encuentran presentes en cantidades considerables, 3.8 y 5.3 mg/kg de peso seco, respectivamente. La niacina se localiza en elevadas concentraciones (28 mg/kg de materia seca), aunque ésta se halla enlazada, de tal forma que se encuentra indisponible para los animales monogástricos. Sin embargo, el tratamiento alcalino la hace disponible (Watson y Ramstad, 1987).

La mayor parte de los minerales se encuentran concentrados en el germen, representando el 78 % total del grano. En la Tabla 5, se muestra la composición mineral de un híbrido QPM. El elemento inorgánico más abundante es el fósforo, el cual se halla presente en 0.08 % del grano seco. Otros elementos constituyentes son el potasio (0.37 % del grano seco) y el azufre (en forma orgánica como componente de aminoácidos azufrados). Además, el maíz es una fuente importante de calcio y selenio (Watson y Ramstad, 1987).

Proceso de Extrusión

Este proceso se ha venido empleando desde finales del siglo XIX en el procesamiento de alimentos para consumo humano y animal, debido en parte a su versatilidad tecnológica, la cual es capaz de producir de manera económica, una amplia gama de productos (Enríquez, 1984). La extrusión en alimentos es definida como un proceso continuo donde se combina el corte mecánico, la presión y el calor, para generar modificaciones estructurales en materiales húmedos, que contienen en su mayor parte almidón (pregelatinización) y proteína

Tabla 5. Contenido de minerales en el MCP.

Minerales	Cantidad
Calcio ¹	15
Fósforo ¹	325
Magnesio ¹	126
Fierro ²	41.2
Zinc ²	43.4
Cobre ²	13
% de Cenizas total	1.78

¹ Miligramos por 100 g

² Miligramos por kilogramo

Serna-Saldivar y col. (1991).

(desnaturalización), obteniéndose un producto plastificado y reestructurados con nuevas formas y texturas. Sumado a esto, el extrusor es considerado un reactor de tornillo ya que se generan una infinidad de transformaciones físicas, químicas y bioquímicas en el material extrudido; al mismo tiempo se llevan a cabo procesos de transporte, mezclado, orientación y formado del material a presión y temperatura controladas (Harper, 1989).

Componentes básicos del extrusor de un solo tornillo

Mecanismo de alimentación. Este consta de una tolva y un tornillo (aspas) de alimentación donde se deposita la materia prima. El objetivo de esta parte del extrusor es dosificar el material que entra a procesamiento manteniendo un flujo constante para obtener un producto homogéneo.

Tornillo. En este componente se distinguen como características principales: diámetro del tornillo, profundidad entre la base del tornillo y el interior del cañón. Dependiendo del efecto y/o objetivo que deseamos tener sobre el material a extrudir el tipo de tornillo a utilizar va a ser diferente. Los factores relacionados con el diseño de la rosca en el tornillo que dictaminan la cantidad de esfuerzo mecánico generado son: a) La distancia entre álabes de la rosca; entre más distantes menos esfuerzo mecánico; b) la profundidad de los álabes; entre más profundos, menos esfuerzo mecánico; c) distancia entre el álabes y la pared interna del cañón; una distancia menor restringe el flujo negativo, por lo tanto incrementará la presión dentro del cañón; d) presencia de pernos y canales perpendiculares a los álabes que incrementan el tiempo de retención y fricción (Serna-Saldivar, 1996).

Cañón o barril del extrusor. Cilindro (Fig. 8) donde se realiza el mezclado, corte, compresión e incremento de temperatura del producto que se está procesando. El material impulsado por el rotor (tornillo) tiende a deslizarse a

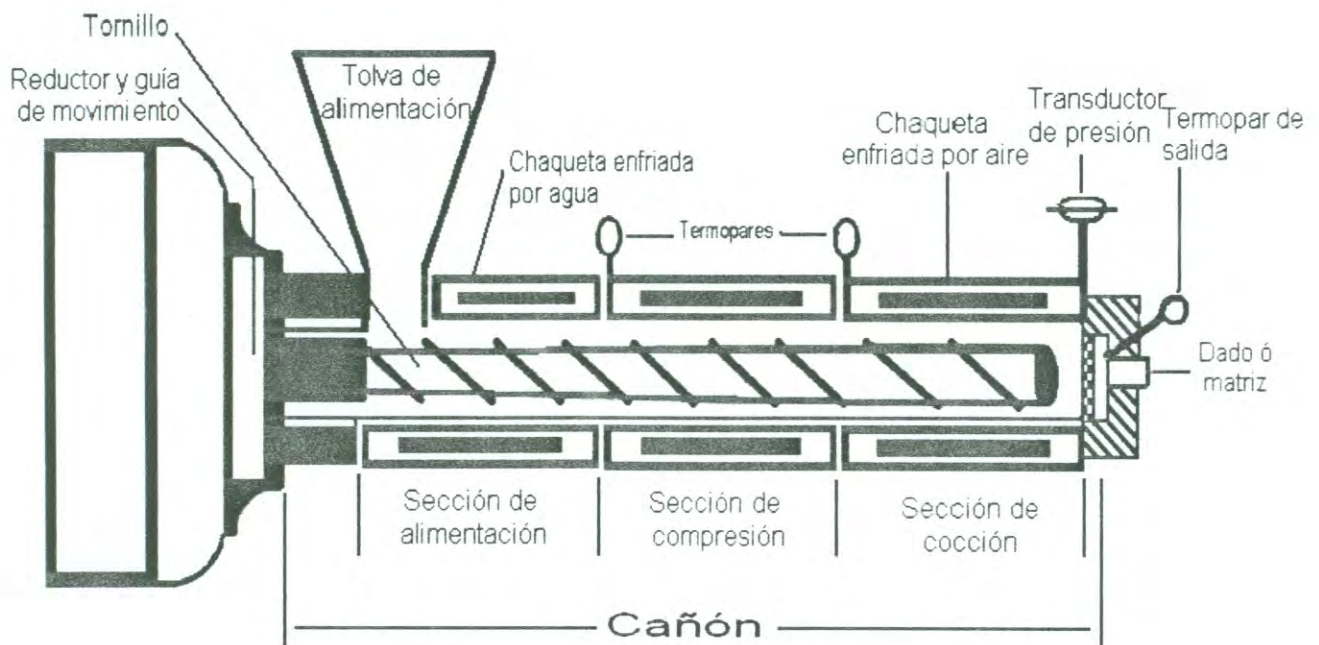


Figura 8. Componentes básicos del extrusor de un solo tornillo.
Mian (2000).

través del cañón, para regular ese deslizamiento se le agregan obstrucciones al cañón, que pueden ser ranuras con bordes filosos, pernos, etcetera. Al chocar el producto en proceso contra los pernos o bordes (canales) del cañón se aumenta el tiempo de residencia y se produce la fricción que eleva la temperatura y la presión hasta un valor predeterminado (Acosta, 1984). A lo largo del cilindro Harper (1981) distingue tres secciones: la sección de alimentación, la sección de compresión y la sección de alta presión que se describe a continuación.

Sección de alimentación. Está caracterizada por pasos de la hélice o álabes profundos, los cuales fácilmente aceptan los ingredientes crudos y los transportan hacia la salida del extrusor. Durante el transporte, los materiales son transformados en una masa continua, el aire es expelido y los espacios vacíos son eliminados, haciendo que los alabes se llenen completamente.

Sección de compresión. Los ingredientes húmedos son convertidos en una masa termoplástica por la gelatinización del almidón y la hidratación de la proteína. La zona de compresión es usualmente caracterizada por una disminución en la altura de los álabes, las cuales reducen el área de sección transversal del tornillo para el flujo. Esto incrementa la relación de esfuerzo cortante y la energía mecánica suministrada al alimento, lo cual resulta en un aumento en la temperatura.

Sección de alta presión. También llamada de cocimiento, que es donde el flujo, la presión, compresión y velocidad de corte son altos. Esta zona se caracteriza por tener una altura mucho menor de los álabes que en la zona de compresión. La masa termoplástica se transforma en una masa plástica prácticamente un líquido. Como resultado de la conversión de la energía térmica, la acción del corte en esta zona homogeneiza y adiciona más calor a la mezcla. Esta zona es la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogenizarlo y hacerlo pasar a través del dado o boquilla a presión constante.

Al final se encuentra la boquilla o dado, que tiene como función principal dar la forma y el tamaño deseado al producto extrudido. Por otro lado Gragen y Wang (1997), distinguen internamente 4 zonas funcionales dentro del cilindro. La primera zona es conocida como la zona de alimentación, en la cual es introducido el material al extrusor. La segunda es la zona tribológica en la cual el material se encuentra en forma de polvo y no es continuo. La tercera se conoce como la zona de transición ubicada entre la zona tribológica y la reológica. La cuarta y última zona, es en donde el material alimentado tiende a gelatinizarse o fundirse y éste puede ser definido como un fluido.

Dado o boquilla. Componente que moldea el producto final, y de forma indirecta restringe el paso del flujo lo que genera un incremento en la presión en la zona de cocción, puede tener formas variadas (circulares, cuadradas, rectangulares, entre otras) dependiendo de la forma requerida.

Dispositivos adicionales. En esta sección se incluyen tamizadores, tambores recubridores o aplicadores de saborizantes, sistemas de aspersion, secadores, máquinas expansoras de comprimidos integrados a hornos, freidores y sistemas de envasado y embalaje (Serna-Saldivar, 1996).

Funcionamiento básico del extrusor de un solo tornillo

Todo proceso de extrusión incluye la premezcla de ingredientes, los cuales son alimentados por medio de un sistema, horizontal o vertical, generalmente integrado a un sistema de premezcla, o preacondicionador. Es muy importante que el sistema de alimentación dispense correcta y constantemente la cantidad de material al que haya sido ajustado. El material alimentado, una vez dentro de la boca del extrusor, fluye a través del tornillo(s) que gira(n) dentro del cañón. El cañón está generalmente provisto de varias secciones capaces de ser calentadas o enfriadas con vapor, bandas eléctricas, agua, aire y/o refrigerantes. La pared interna del cañón puede ser lisa, rayada en forma de espiral. La parte

fundamental del extrusor es el tornillo(s), el cual tiene la función de hacer fluir el material de alimentación y sobre todo de propiciar los cambios deseados mediante el esfuerzo mecánico y la fricción. Casi todos los extrusores tienen diferentes tipos de tornillo con diferente diseño mecánico para distintas aplicaciones. También existen tornillos con piezas intercambiables, las cuales se ordenan de acuerdo con la aplicación y gusto del operador (Ananthan y col., 1996; Serna-Saldivar, 1996).

El flujo del material a través del extrusor depende principalmente de la relación de alimentación, revoluciones por minuto a que opera el tornillo, diseño de la rosca y diámetro de salida en el dado o matriz presentes en la salida del extrusor. El sistema de dado o matriz tiene como función primordial formar el material plástico o cocido que corre a través del extrusor. Existen dados sencillos, múltiples y compuestos con distintas configuraciones. Generalmente, entre menor o más restringido es el dado, mayor es la presión interna. Finalmente, el material formado que fluye del extrusor, es cortado por medio de un sistema de navajas simples o múltiples, las cuales giran a ciertas revoluciones a varios milímetros de la salida del dado. El tamaño del producto cortado está dictaminado por la tasa de alimentación, las revoluciones por minuto del tornillo y principalmente por la velocidad y número de cuchillas del sistema cortador (Serna-Saldivar, 1996).

Algunos atributos por los cuales la extrusión es muy utilizada, son los siguientes: a) Su versatilidad, al combinar los ingredientes y las condiciones de operación del extrusor es posible procesar una amplia variedad de productos. Los factores que contribuyen a la versatilidad encontramos principalmente los diseños del extrusor, las variables de operación y la variedad de materias primas a procesar. b) Costos reducidos, debido a los requerimientos de espacio por unidad de producción, este procesamiento disminuye los gastos de operación. c) Elevada productividad, al presentarse como un sistema de procesamiento continuo su capacidad de producción se incrementa, a diferencia de los procesamientos por lotes. d) Productos de alta calidad microbiológica y

nutricional, al emplear temperaturas altas en periodos cortos de tiempo (HTST), se minimiza el peligro microbiológico, así como también la degradación de algunos nutrientes (dependiendo de las condiciones de extrusión) y se mejora la digestibilidad (por la pregelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas). e) Se pueden obtener diferentes formas y figuras del producto al utilizar distintos dados. f) Eficiencia energética, al tener un sistema que opera a humedades relativas bajas, permite que la energía requerida para la cocción del alimento sea mínima. g) Ausencia de material de desecho, al no generar productos contaminantes se reducen los costos de operación para el tratamiento de efluentes contaminantes (Galicia-García, 2005).

Cambios químicos en los materiales extrudidos

Debido al tratamiento térmico que se lleva a cabo en corto tiempo, así como también a la fuerza de corte, se afectan algunos componentes químicos de los productos extrudidos. Entre ellos está el causado a las proteínas, según Camire y col. (1991), a una temperatura elevada y con un incremento gradual en el contenido de humedad en la harina a extrudir, ocurre una mayor degradación en el contenido de lisina, ya que bajo esas condiciones se favorece la reacción entre el grupo ϵ -amino de la lisina y el grupo carbonilo de los azúcares reductores o con los compuestos fenólicos, haciendo indisponible dicho aminoácido. En este mismo estudio se observó una disminución en el contenido de lípidos, el cual puede ser debido a las reacciones de formación de complejos de los triglicéridos con los diferentes componentes del gránulo de almidón, dadas las presiones y temperaturas de procesamiento.

En otro estudio realizado para observar el efecto de las variables de extrusión en el contenido de lisina disponible en productos expandidos de maíz de calidad proteica, González-Vera (2002) observó que las mejores condiciones para extrudir este cereal sin una pérdida significativa de lisina disponible es en condiciones de humedad y temperatura bajas (19 %, 175 °C, respectivamente),

por lo cual incrementos progresivos de estas dos variables de extrusión, se observa una tendencia en la disminución de este componente químico.

Por otra parte, un estudio realizado en productos extrudidos para alimentos balanceados en donde se reporta un detrimento del nivel de proteína, esto fue posiblemente debido a las modificaciones que sufren dichas proteínas, dadas las altas temperaturas de procesamiento en el extrusor y por ende la reacción de Maillard (González, 1996).

Otro grupo de componente químicos que sufren degradación durante el proceso de extrusión lo conforman las vitaminas, entre las que destacan las A, D, E, B₁ (tiamina), B₃ (ácido pantoténico), B₆ (piridoxina), B₁₂ (cianocobalamina), ácido fólico y vitamina H (Kwok y col., 1998).

Estudios realizados en maíz mencionan que durante la extrusión, se propician cambios estructurales importantes en los gránulos de almidón, ya que la mayoría de éstos se encuentran regidos generalmente por las condiciones de extrusión utilizadas, como la temperatura del cañón, la velocidad del tornillo, el diámetro de la matriz y el contenido de humedad de la materia prima (Anderson y col., 1969; Mercier y Feillet, 1975). El más importante es una gelatinización parcial o completa del almidón en el producto final. Al calentarse los gránulos con una cantidad de agua adecuada se presenta el fenómeno de gelatinización.

Procesos de Nixtamalización para la Elaboración de Tortillas de Maíz

Método tradicional

Este método consiste en un cocimiento alcalino del grano de maíz en agua (relación 3:1 agua:maíz) a la temperatura de ebullición por 30 ó 40 minutos,

adicionando cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de 1 a 2 % con base al peso del grano, previamente a la cocción del grano. Después de esta etapa el maíz se deja reposar por un periodo de 12 a 18 horas para una penetración más homogénea del agua, el grano cocido con la cal en agua es denominado nixtamal y el líquido (residuo alcalino) rico en sólidos, nejayote. Después el nixtamal es lavado para remover los fragmentos de pericarpio desprendidos del grano y el exceso de cal para posteriormente ser molido en un molino de piedras para la obtención de la masa que es acondicionada con agua a una consistencia apropiada. La cantidad de humedad en la masa es controlada en forma empírica remojando la masa, considerando que es un parámetro importante para la elaboración de la tortilla para una calidad aceptable. El moldeado o troteado se efectúa preparando téztales de masa de 35 g y palmeándolas en las manos hasta conseguir la forma delgada y redonda de las tortillas de 2 a 3 mm de espesor y 15 a 20 cm de diámetro.

En regiones del sur del país el moldeado se realiza con el mismo tipo de téztales de masa para después presionarlas entre dos materiales (polietileno, hule, tela de algodón, entre otros.) y golpearlas con la parte inferior de la palma hasta obtener la forma circular y espesor adecuado. La mejora a este método consiste en emplear moldeadoras mecánicas que consisten de dos placas rectangulares o redondas sujetas por una unión articulada en uno de los lados o dos puntos del perímetro y una palanca o dispositivo para unir a las placas (madera, metal o plástico) para poder moldear la masa hasta obtener el diámetro y espesor deseado para la tortilla. Existen variantes en las cuales la producción de tortillas moldeadas se efectúa también por medios semiautomáticos y en los cuales se emplean rodillos paralelos para rolar la masa en medio de ellos en forma manual (Martínez, 1979).

Posteriormente los discos moldeados son calentados en un comal de barro o arcilla a 180-210 °C durante 2 minutos por ambos lados. Durante dicho procesamiento se menciona que las pérdidas de materia seca en el maíz

representa del 6 al 15 % (Figueroa y col., 1994). Estas pérdidas se incrementan con el tiempo de cocimiento, concentraciones altas de cal y durante el reposo fragmentos de pericarpio, almidón, proteína, germen soluble y cal constituyen la mayor proporción de materia seca en el agua de cocimiento (Martínez-Bustos, 1996).

Método industrial

En México las harinas instantáneas de maíz nixtamalizado han cobrado gran popularidad debido a que disminuyen labores intensivas y tediosas del proceso tradicional. Se obtiene un producto homogéneo, se acortan los tiempos de procesamiento, se disminuye la pérdida de sólidos, existe un mejor control higiénico durante su elaboración, se reduce la actividad de agua, se retarda la rancidez de los lípidos, se pueden procesar grandes volúmenes, manteniendo sus características y permitiendo que pueda ser almacenada durante largos períodos de tiempo. Esta harina puede ser mezclada con la masa fresca cuando la consistencia de ésta no es la apropiada para la preparación de las tortillas (Gómez y col., 1987).

La producción de harina nixtamalizada a nivel industrial (Fig. 9) se basa en el método tradicional de nixtamalización. Este proceso incluye básicamente las etapas de recepción, selección, limpieza y almacenamiento del maíz. Posteriormente el grano es puesto en agua con cal a punto de ebullición para obtener el nixtamal, el cual se va obteniendo en lotes continuos. Tras su cocción y macerado, el maíz tratado en agua con cal es lavado con agua a presión para eliminar el pericarpio. Ya lavado el maíz es pasado a un proceso de pulverizado y/o triturado con molinos de martillos para formar una masa de bajo contenido de humedad, dicha masa se pasa a un secador ciclónico para eliminar el exceso de humedad y de esta forma obtener la harina. Dicha harina, formada por partículas

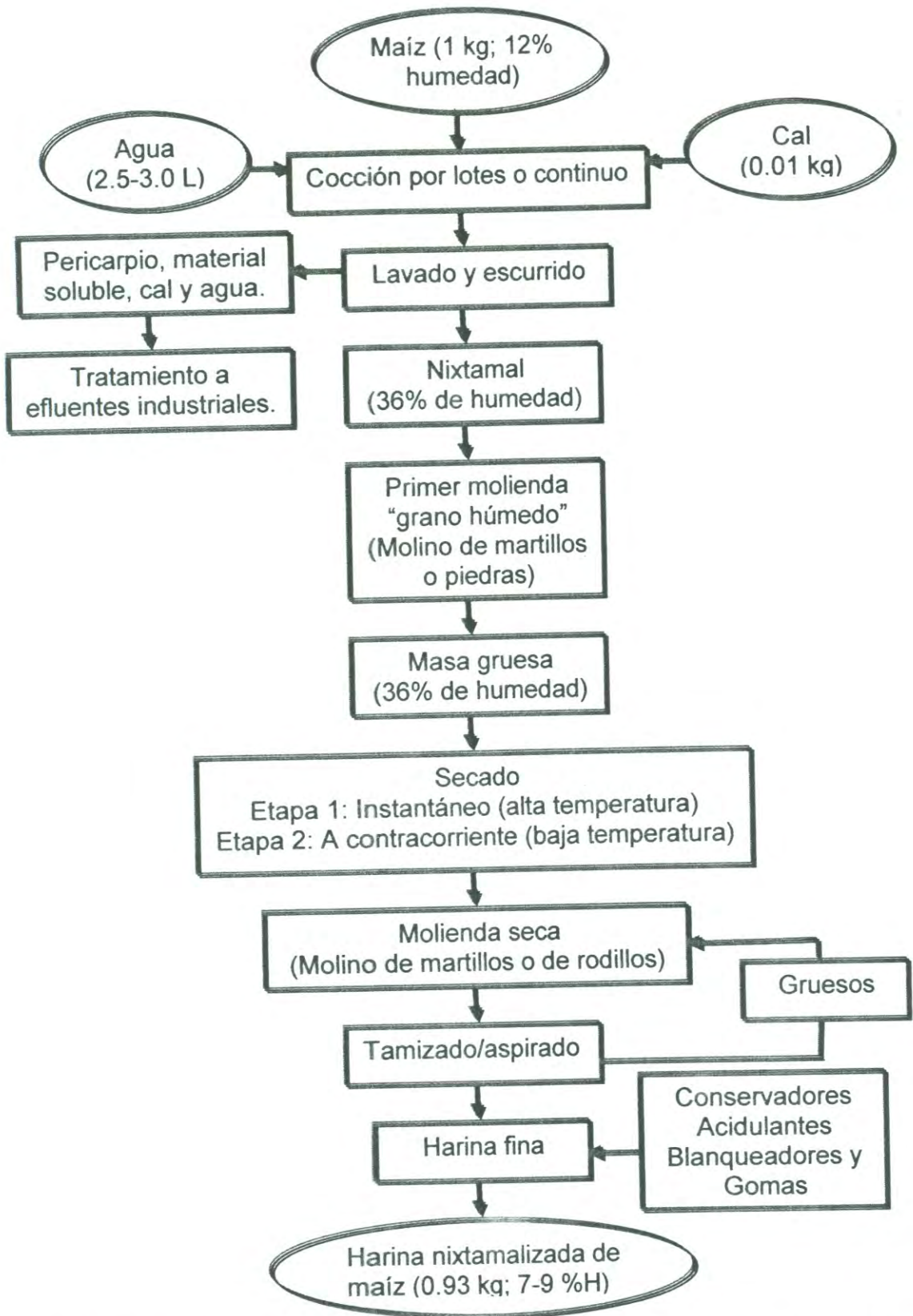


Figura 9. Proceso industrial para la obtención de harinas nixtamalizadas de maíz. Serna-Saldivar (1996).

de distintos tamaños, se pasa por un tamiz que separa las partículas gruesas de las finas. Las partículas gruesas que no pasaron por el tamiz son retornadas nuevamente al molino de martillos para ser trituradas nuevamente, y las partículas finas que constituyen el producto final, se envían a la sección de envasado, donde se envasa en bolsas de papel reforzado (Serna-Saldivar, 1996).

Esta harina es mezclada con agua para obtener una masa adecuada para la elaboración de tortillas y diversos productos nixtamalizados (según el tamaño de partícula de la harina obtenida). Los tiempos de cocimiento y reposo así como las temperaturas son críticas, en general son menores para la elaboración de harinas instantáneas nixtamalizadas en comparación con el proceso tradicional, esto es debido a que durante el proceso de secado se provoca una gelatinización adicional del almidón. En general la harina instantánea presenta un contenido de humedad de 10.2 a 12.1 % de humedad, de 9 a 10 % de proteína, 72 a 76 % de almidón, de 3 a 3.5 % de fibra cruda, de 1.60 a 1.65 % de cenizas, de 3.3 a 3.4 % de extracto libre de nitrógeno y un pH de 6.8 a 7.3 (Gómez y col., 1987).

Elaboración de harina nixtamalizada por extrusión

Diversas alternativas al método tradicional de nixtamalización han sido estudiados (García, 1997; Vaqueiro y Reyes, 1986; Hart, 1985; Sterner y Zone, 1984; Jonson y col., 1980; Molina y col., 1977). Uno de esos métodos alternativos es la extrusión, el cual diferentes estudios han comprobado su eficiencia en la producción de harina, masa y tortilla con características similares al proceso tradicional de nixtamalización (Galicia-García, 2005; Martínez-Bustos y col., 1996; Mensah-Agyapong y Horner, 1992; Irvin y col., 1991; Martínez, 1988; Bedolla, 1983; Bazua y col., 1979). La extrusión es un método tan eficiente que puede producir tortillas con la utilización del mínimo de agua, por lo que no contamina y

elimina los efluentes que son producidos tanto por el método tradicional e industrial.

Las variantes para producir harinas nixtamalizadas por extrusión son muy diversas y difiere de autor en autor, ya que es un método que no ha podido estandarizarse totalmente. Sin embargo, la técnica empleada es la misma para cada autor. Esto es, la nixtamalización de la harina se realiza de forma directa mediante la cocción del material durante la extrusión. La elaboración de harina nixtamalizada por extrusión difiere de los métodos comerciales convencionales (tradicional e industrial) tal como lo muestra el diagrama de flujo en la Fig. 10. Por lo que de ante mano se puede suponer que los cambios que sufren los componentes del grano de maíz, en este caso el almidón son diferentes a los ocurridos en los métodos comerciales convencionales.

En general, el primer paso para elaborar la harina nixtamalizada por extrusión y tortillas consiste en moler de forma integral el grano de maíz, posteriormente el grano molido es mezclado con cal y agua en concentraciones y porcentajes determinados por el investigador (ejem. 0.15-0.25 % p/p y 25-30 %, respectivamente), todo esta mezcla se homogeniza y se deja reposar por alrededor de 12 h. La mezcla ya reposada se somete al proceso de extrusión cuyas condiciones de cocción y velocidad de flujo también son muy variables (ejem. 90 a 140 °C, 35 rpm), los pelets extrudidos se dejan reposar a temperatura ambiente para eliminar cierta cantidad de agua, o se pasan directamente a un secado en túnel por convección para llegar a un porcentaje de humedad del 6 a 8 %; por último los pelets secos se muelen para de esta forma obtener la harina nixtamalizada por extrusión. El siguiente paso es hidratar la masa (48-52 % H) con la cantidad de agua necesaria para hacer una masa de consistencia adecuada para hacer tortillas.

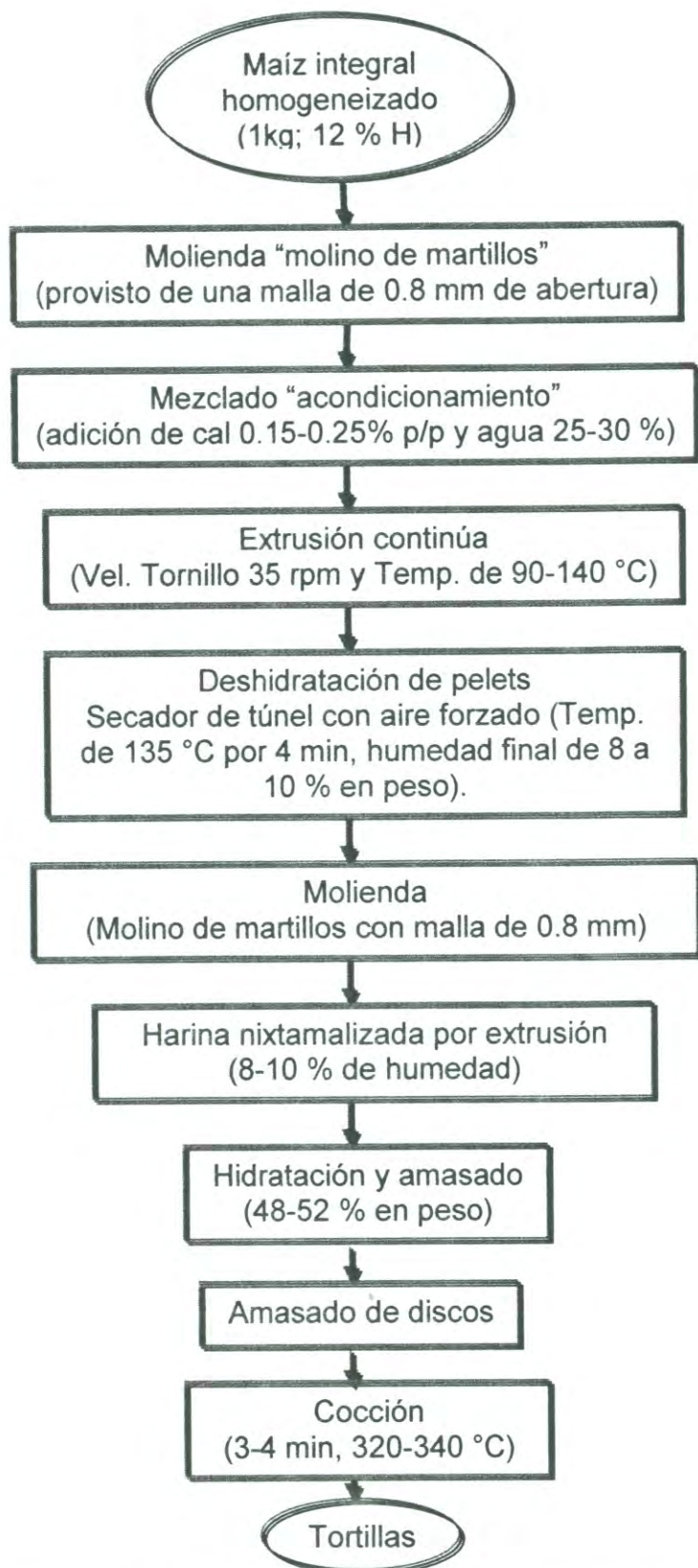


Figura 10. Proceso de extrusión para la obtención de harinas nixtamalizadas. Gómez y col. (1996).

Cambios en el Almidón Durante la Nixtamalización del Maíz

Las propiedades fisicoquímicas del almidón dependen de la interacción de diversos factores entre los cuales se puede incluir el tamaño del granulo, relación amilosa-amilopectina y la relación intercadenas (fracciones) dentro del granulo; y otros componentes menores como los lípidos y los grupos fosfato. Adicionalmente las condiciones físicas, químicas o enzimáticas utilizadas durante el procesamiento de alimentos modifican la organización nativa de los gránulos de almidón y sus constituyentes. Como resultado, las propiedades funcionales que provee el almidón a los alimentos son modificados. Tal funcionalidad esta basada en las propiedades fisicoquímicas resultado de la interacción de los gránulos del almidón con el agua bajo el efecto principal de las variables tiempo-temperatura (fusión, viscoelasticidad, estabilidad de los gránulos a el calor continuo y fuerza de corte, retrogradación). Muchas de estas características funcionales están asociadas con las propiedades texturales que el almidón provee a los sistemas alimenticios (Brockett y col., 1988; Knutson, 1990).

Método tradicional

Diversos métodos instrumentales han sido aplicados en el estudio de la estructura del almidón; dentro de los más utilizados se incluyen a la microscopia óptica y electrónica, la difracción de rayos x, análisis térmicos (CBD), la espectroscopia ^{13}C -NMR, viscosidad y la cromatografía de exclusión molecular (HPSEC) (Biliaderis, 1992).

El cambio estructural de los gránulos de almidón debido a la cocción alcalina, es la pérdida de birrefringencia (Pflugfelder y col., 1988; Gómez y col., 1989). Gómez y col. (1992), al evaluar la pérdida de birrefringencia en las diferentes etapas de elaboración de la tortilla de maíz, encontraron que la mayoría de los gránulos de almidón en las muestras nixtamalizadas presentaban una pérdida parcial o total de birrefringencia, mencionando que estos cambios pueden

ser debidos principalmente a la intensidad del calor que se aplica durante el proceso.

De acuerdo a Gómez y col. (1989), los cambios estructurales y químicos que ocurren durante la nixtamalización del grano maíz afectan las propiedades funcionales (textura, color, sabor y vida de anaquel) del producto final. Sahai y col. (1999), al valorar el grado de cocción durante la nixtamalización de maíz, comprobó que las propiedades fundamentales del almidón fueron alteradas al aumentar el tiempo de cocimiento durante la nixtamalización resultando en una masa pegajosa.

La masa es un sistema plástico único elaborado por cocimiento alcalino, de cereales molidos y humedecidos. Cambios en el almidón durante dicho procesamiento determinan las propiedades mecánicas de la masa y las propiedades funcionales del producto final (Trejo-González y col., 1982). La capacidad para formar una película por la masa, desarrollada a través de la nixtamalización, permite la formación de la tortilla durante el amasado, la retención de gas e inflado durante la cocción. La masa contiene 52-54 % de humedad, 12-25 % piezas pequeñas de endospermo y germen, 19-31 % de gránulos de almidón libres y otros fragmentos celulares, y 3-5 % lípidos libres y sólidos dispersos (Pflugfelder, 1988). La masa puede ser representada, desde un punto de vista físico estructural (Fig. 11), como una red de polímeros de almidón disperso/soluble, con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados en una fase continúa de agua soportando gránulos de almidón sin gelatinizar, pedazos de endospermo y lípidos (libres o formando complejos con la amilosa) (Gómez y col., 1990).

De acuerdo con Gómez y col. (1990), el cocimiento alcalino del maíz en agua causa una lixiviación parcial de la amilosa y el hinchamiento de los gránulos de almidón. Gran parte del almidón soluble en la masa se observó a los 65 y

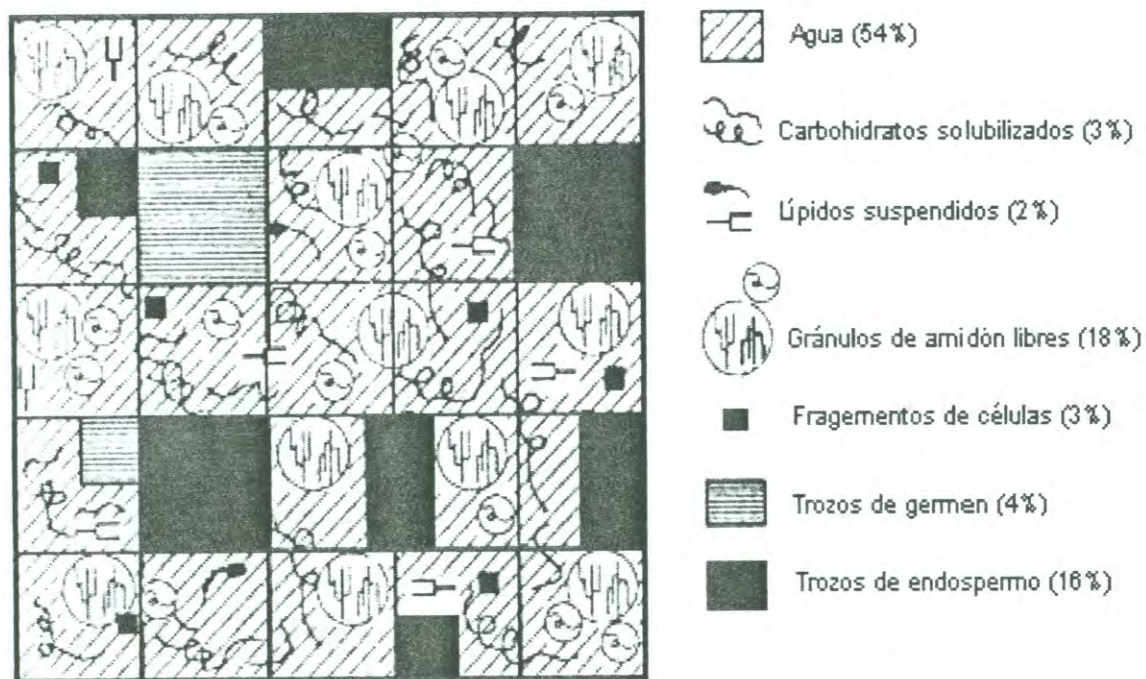


Figura 11. Modelo estructural de la masa: distribución de macrocomponentes en la masa de maíz nixtamalizada.

Gómez (1990).

80 °C de cocimiento del maíz. La lixiviación de la amilosa y el hinchamiento no es completo debido a la represión impuesta por las células del endospermo y el calor (< 100 °C - <35 % humedad) aplicados durante el tratamiento. No únicamente las restricciones físicas y las variables de procesamiento pueden inhibir la gelatinización, también la presencia de lípidos en el medio acuoso. En este mismo estudio por otra parte, se observó que el almidón solubilizado en masa decrece cuando el tiempo de cocción del maíz se incrementa. La reducción de la solubilidad del almidón en la masa puede ser el resultado de: una gelatinización parcial y retrogradación (durante la cocción, remojo, molienda y enfriamiento); recocimiento del almidón o la reorientación polimérica (desarrollo de cristalinidad del almidón durante el remojo). Gómez (1988), reporta que el cocimiento alcalino y el remojo del maíz causa una mayor ordenación en la difracción de rayos-x (patrón de almidón-A).

Varios autores (Ooesten, 1982; Rutenberg y Solarek, 1984; Jane, 1993) han investigado el efecto de los electrolitos en la gelatinización del almidón. Robles y col. (1988), mencionan que el proceso de nixtamalización retarda la gelatinización del almidón (estructura e hinchamiento de los gránulos) debido a la interacción que se presenta entre los cationes divalentes de calcio (2+) con la fracción de amilosa. Además reportan que una sobrecocción del nixtamal tiende a absorber más agua, esto debido a que se da un mayor grado de gelatinización en el almidón, por lo que al elaborar masa con este nixtamal se presentan propiedades de pegajosidad/adhesividad indeseable en la producción de tortillas, ya que ésta pierde flexibilidad (textura) de manera más rápida debido al fenómeno de retrogradación del almidón. El uso de Ca(OH)_2 al 2-5% durante la nixtamalización tradicional incrementa el pH los niveles de cadenas de glucosa, de amilosa y amilopectina. Este proceso ayuda a disminuir la retrogradación que se desarrolla en las tortillas frescas (Rooney y Suhendro, 1999).

Campas-Baypoli (1997), reporta diferentes cambios fisicoquímicos en el almidón durante la elaboración y almacenamiento de la tortilla de maíz elaborada

por el proceso tradicional de nixtamalización. Este autor investigó los cambios que sufre el almidón en cada una de las etapas de dicho procesamiento (maíz, nixtamal, masa y tortilla). Concluyendo que durante la etapa de cocimiento de la tortilla la gelatinización del almidón fue casi total, lo cual fue demostrado por los valores altos obtenidos en el índice de absorción de agua y el índice de material soluble, la pérdida total de la birrefringencia en los gránulos, pérdida de cristalinidad nativa, viscosidades generadas y la ausencia de pico en los termogramas. En tanto que durante el almacenamiento, el almidón resistente se incrementó, así como la firmeza de la tortilla. Todos los cambios presentados fueron atribuidos a la asociación molecular de los componentes del gránulo de almidón.

Por otra parte Enríquez-Ramos (2004), caracterizó el almidón extraído (AE) de la materia prima, productos intermedios y final del proceso tradicional de la nixtamalización de maíz. Este autor observó que los cambios que sufrió el AE durante dicho procesamiento fue principalmente el fenómeno de gelatinización y en menor grado la retrogradación. En cambio, durante el almacenamiento de las tortillas el AE sufrió el fenómeno de la retrogradación. Ambos fenómenos se detectaron por las diferentes análisis realizados. El mayor daño que sufrió el almidón durante el procesamiento fue durante la cocción de la tortilla debido a las altas temperaturas. En donde el almidón se encontró gelatinizado casi en su totalidad. Las determinaciones que mostraron cambios importantes en el almidón debido a la gelatinización fueron el viscoanálisis, el análisis microscópico y la calorimetría de barrido diferencial. En este mismo estudio se observó que no únicamente las altas temperaturas afectaron los cambios en el almidón, durante el almacenamiento de las tortillas a temperatura de refrigeración se observó que se modificaron las propiedades texturales de la tortilla, atribuyéndosele al proceso de cristalización, el cual incrementa su velocidad en estas condiciones.

De igual forma Fernandez y col. (1999), reporta cambios sustanciales en las propiedades del almidón y la tortilla durante las 24 h después de la cocción.

Estos cambios pueden ser debido a la retención de algunos cristales de almidón, lo que ocasiona que se formen núcleos que facilitan la asociación rápida de los componentes estructurales del almidón, los cuales afectando contrariamente a la textura de la tortilla. Yau y col. (1994), mencionan que la calidad de las tortillas están altamente asociadas con las propiedades fisicoquímicas del almidón de maíz.

Rendón-Villalobos y col. (2002), observaron al estudiar el efecto del tiempo de almacenamiento sobre la digestibilidad invitro y el contenido de almidón resistente en nixtamal, masa y tortilla, reportando altos valores de almidón resistente total en un rango de 2.1-2.6 % para nixtamal y masa, en tanto para la tortilla fue de 3.1-3.9 %. Estos valores sugieren que aparte del almidón resistente retrogradado hay una fracción ingelatinizable que parece contribuir con la indigestibilidad de estos productos.

Método industrial

Gómez y col. (1990), mencionan que durante las etapas del procesamiento en la elaboración de harinas nixtamalizadas, el cocimiento, el remojo y la molienda desprenden a los gránulos almidón del endospermo y causa una gelatinización parcial del almidón así como también una retrogradación limitada. El secado de este proceso, es la operación más crítica, el cual comúnmente se realiza en largos túneles de secado donde se hace circular flujo de aire caliente a contra corriente. Como algunas condiciones de procesamiento son diferentes al proceso tradicional de nixtamalización, la harina nixtamalizada rehidratada tiene diferentes propiedades reológicas que la masa fresca. La harina nixtamalizada es menos plástica y cohesiva. En este mismo estudio se observó que en el maíz bajo estas condiciones de procesamiento se propicia una insuficiente absorción de agua y debilitamiento del endospermo, restringiendo el hinchamiento de los gránulos del almidón, y la lixiviación limitada de la amilosa durante el paso inicial de calentamiento. El tiempo corto de remojo limita la redistribución del agua y la

reorganización de la estructura molecular del almidón comparado a lo ocurrido en la preparación de la masa fresca.

Gómez y col. (1991), reportan que el calentamiento y la sonicación incrementaron la solubilidad del almidón nativo del maíz, pero aun más se incremento en el almidón extraído de las tortillas elaboradas con la harina nixtamalizada.

Método por extrusión

En lo que respecta a la nixtamalización por el proceso de extrusión. Según Arámbula y col. (1998), el proceso de extrusión experimental produce tortillas con baja calidad sensorial comparada con el proceso tradicional. Esto no concuerda con lo mencionado por Martínez-Bustos y col. (1996), quien patentó un proceso de extrusión continuo, y un extrusor experimental de baja fuerza de corte con características específicas para hacer harina de maíz nixtamalizada instantánea adecuada para formar tortillas de buena calidad. Sin embargo, Arámbula (1994), menciona que el uso de este proceso genera cambios fisicoquímicos generales, así como reológicos, estructurales y texturales en la masa extrudida y las tortillas obtenidas, pudiendo ser comparables a las tortillas elaboradas por el proceso tradicional de nixtamalización.

Martínez-Bustos y col. (1996), menciona que el paso de la molienda (del grano y los pellets nixtamalizados extruídos) es muy importante, ya que influye de manera fundamental en el tamaño de partícula, el daño al almidón, la transferencia de calor, la difusión del agua y la cal durante la extrusión lo que puede influenciar de manera importante las características de la masa y las propiedades texturales de la tortilla. Tortillas de buena calidad son aquellas que presentan rollabilidad "taco", sin dañarse. Otro paso importante que menciona Arambúla y col. (1999), es el grado de gelatinización del almidón debido al procesamiento térmico durante la extrusión, ya que cambia la habilidad de la

harina nixtamalizada para absorber y retener agua. Esta habilidad es muy importante durante la rehidratación de la harina para así convertirse en masa, estos cambios estructurales están asociados con las propiedades texturales de la masa y la tortilla obtenidos.

De igual forma Martínez-Flores y col. (1998), observaron que ciertas características de la harina integral de maíz como son el tamaño de partícula, el almidón dañado por la molienda y la configuración del tornillo de extrusión pueden influenciar la calidad de la masa y las tortillas obtenidos por extrusión. La molienda daña los gránulos de almidón modificando su estructura y convirtiendo las zonas cristalinas en moléculas internas desordenadas. El almidón dañado y el calor excesivo generado por la extrusión resulta en una masa pegajosa, gomosa generando tortillas con características indeseables. Por lo que la calidad de la masa y tortillas extrudidas son muy sensitivas a las condiciones de extrusión utilizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción General del Trabajo

El trabajo experimental de la presente investigación se realizó en dos etapas. La primera consistió en la producción de harinas nixtamalizadas a través del proceso de extrusión; un lote de maíz de calidad proteica (MCP) se limpió y homogenizó para después pasar a través de un molino de cuchillas con un tamaño de malla de 0.5 mm. El maíz molido integral (MM) se acondicionó agregando agua y cal, se dejó en reposo para posteriormente ser extrudido. Los extrudidos obtenidos se secaron y fueron molidos en un molino de cuchillas a un tamaño de partícula que paso a través de una malla de 0.5 mm. Con la harina de maíz nixtamalizada por el proceso de extrusión se elaboró masa y tortillas para su análisis posterior.

La segunda etapa consistió en la evaluación del maíz molido, la harina nixtamaliza extrudida (HMNE), harina nixtamalizada comercial de la marca MASECA (HCOM), y las tortillas obtenidas de cada una de las dos harinas. Los análisis realizados a las harinas nixtamalizadas fueron los siguientes: densidad aparente, pH, distribución del tamaño de partícula, índice de tamaño de partícula, color, índice de material soluble, índice de absorción de agua, difracción de rayos x, viscosidad amilográfica, calorimetría de barrido diferencial, microscopía óptica, pérdida de birrefringencia, temperatura de gelatinización, microscopía electrónica de barrido, contenido de amilosa aparente, almidón total y almidón resistente. A la masa se le determinó la humedad, en tanto que a las tortillas elaboradas se les determinaron sus características físicas como: firmeza y rollabilidad a 2, 24 y 48 horas de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C). A las tortillas con fines de monitorear los cambios en el almidón se le realizaron los análisis de difracción de rayos x, viscosidad amilográfica, calorimetría de barrido diferencial, microscopía, pérdida de birrefringencia, temperatura de gelatinización, microscopía electrónica de barrido, contenido de amilosa aparente, almidón total y almidón resistente.

Materia Prima

Se utilizó un lote 10 kg de maíz de Alta Calidad Proteica (MCP V537C), proveniente del Departamento de Agricultura de la Universidad de Sonora, cosechado en el ciclo primavera-verano 2002. El grano se limpió en una zaranda vibratoria Clipper (Marca BLOUNT/Ferrell-ross, Modelo M2BC; Bluffon, In, USA). El grano limpio se identificó y colocó en sacos para posteriormente ser almacenado a temperatura de refrigeración 5 °C. Posteriormente el grano se homogeneizó utilizando un divisor de muestras (marca Boerner) para obtener el lote representativo (10 kg) (Fig. 12). Con fines de comparación se utilizó harina nixtamalizada comercial de la marca MASECA.

Caracterización química del maíz

El análisis proximal del maíz MCP V537C, así como a la harina comercial, se realizó siguiendo los métodos oficiales de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001). Las determinaciones realizadas fueron: humedad (Método 44-15); cenizas (Método 08-01); proteína (Método 46-13); lípidos (Método 30-26) y carbohidratos por diferencia.

Proceso de Extrusión

Molienda del maíz

El maíz limpio y homogeneizado se molió de manera integral (conservando su germen y pericarpio) en un molino de cuchillas (Marca Thomas-Wiley, Laboratory Mill, Model 4 Thomas Scientific USA), y se pasó a través de una malla de 0.5 mm de diametro. Los residuos de muestra que no pasaron a través del tamiz fueron nuevamente molidos obteniendo así el maíz molido integral (MM).

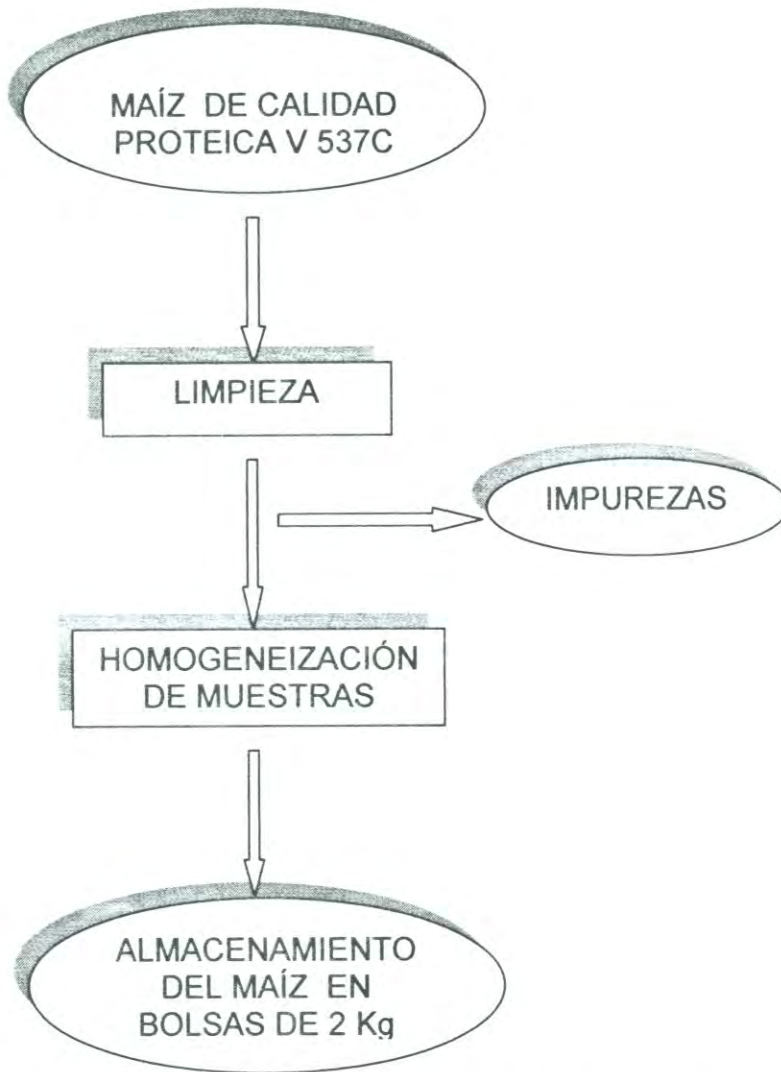


Figura 12. Limpieza y preparación del grano de maíz de calidad proteica.

Acondicionamiento

Al MM, se le adicionó cal (grado industrial “Marca Pimacal”) a un porcentaje de 0.3 % (p/p) y se mezcló con agua destilada por aspersion en una mezcladora industrial (Marca Horbat, Modelo AS200T, USA) a baja velocidad (600 rpm) por espacio de 20 min/kg de harina a acondicionar, hasta alcanzar una humedad de 27.7 %. Una vez acondicionada uniformemente la harina, se conservó en bolsas de polietileno por 12 h a temperatura ambiente (25 °C), para posteriormente extruirla (Fig. 13).

Extrusión

El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de un solo tornillo (Marca Brabender Instruments; Modelo E 19/25 D, Inc NJ USA), el modelo que presenta este extrusor es compacto. Las partes que componen al equipo son: el motor y los sistemas de engranaje, unidades de monitoreo (temperatura y presión), cañón de extrusión con tornillo y cabina de control. Las cuatro zonas del extrusor son calentadas eléctricamente en forma independiente, la primera zona es enfriada por recirculación de agua y las tres zonas restantes por aire a través de un compresor. La máxima temperatura que se alcanza en cada zona es de 450 °C. El diámetro del tornillo es de 19 mm; longitud al diámetro 25:1, una razón de compresión nominal 1:1 y una apertura del dado de 3 mm. Durante la prueba, los diferentes parámetros son medidos de manera continua en función del tiempo.

Las condiciones de operación del extrusor se ajustaron de acuerdo a un estudio de optimización de harinas nixtamalizadas extrudidas (Galicia-García, 2005), partiendo de maíz MCP variedad 537C, estas condiciones fueron las que dieron mejor color de harina, maquinabilidad de la masa y textura de la tortilla.

Para obtener los extrudidos, previamente se ajustaron las temperaturas de las cuatro zonas críticas de cocción del extrusor (Z1T=60, Z2T=60, Z3T=60 y Z4T=135 °C), así como la velocidad del tornillo (112 rpm) y de alimentación (45

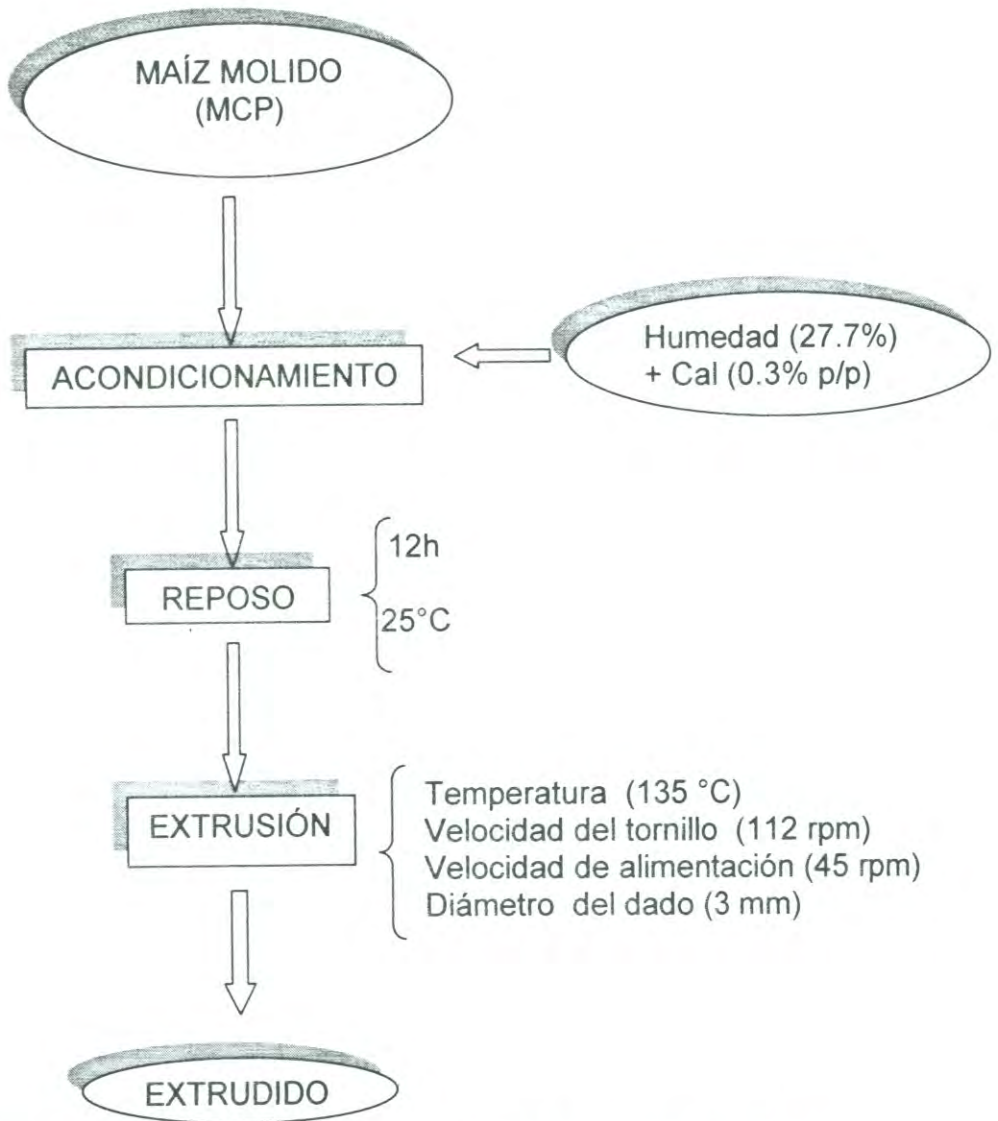


Figura 13. Proceso de extrusión utilizando maíz molido integral.

rpm). Muestras de 1kg de MM se acondicionaron al porcentaje de humedad establecido (27.7 %), se depositaron en la tolva de alimentación del extrusor para ser procesada. El extrudido que se obtuvo se seccionó en trozos y se colocó en charolas para enfriarlo a temperatura ambiente (25 °C), posteriormente se colocó en bolsas de polietileno para su almacenamiento.

Obtención de las Harinas Nixtamalizadas

Secado de los extrudidos

Los extrudidos fueron colocados y distribuidos a través de la superficie de una charola (41x41x1 cm). Las charolas fueron colocadas en un secador tipo túnel (sin marca) flujo a contracorriente, ajustándose el flujo de aire a 30-40 °C en un tiempo de 2 h. Una vez transcurrido el tiempo de secado, las muestras fueron enfriadas dentro del secador por espacio de 10 min. Los extrudidos secos fueron colectados e identificados en bolsas de polietileno para su posterior molienda.

Molienda

El extrudido fue molido en un molino de cuchillas (Marca Thomas-Wiley, Laboratory Mill, Model 4 Thomas Scientific. USA), con malla de 0.5 mm (Fig. 14). La harina nixtamalizada se almacenó en bolsas de polietileno para su análisis posterior.

Caracterización de la Harina Nixtamalizada

Contenido de humedad

Se realizó siguiendo el método 44-15 de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001).

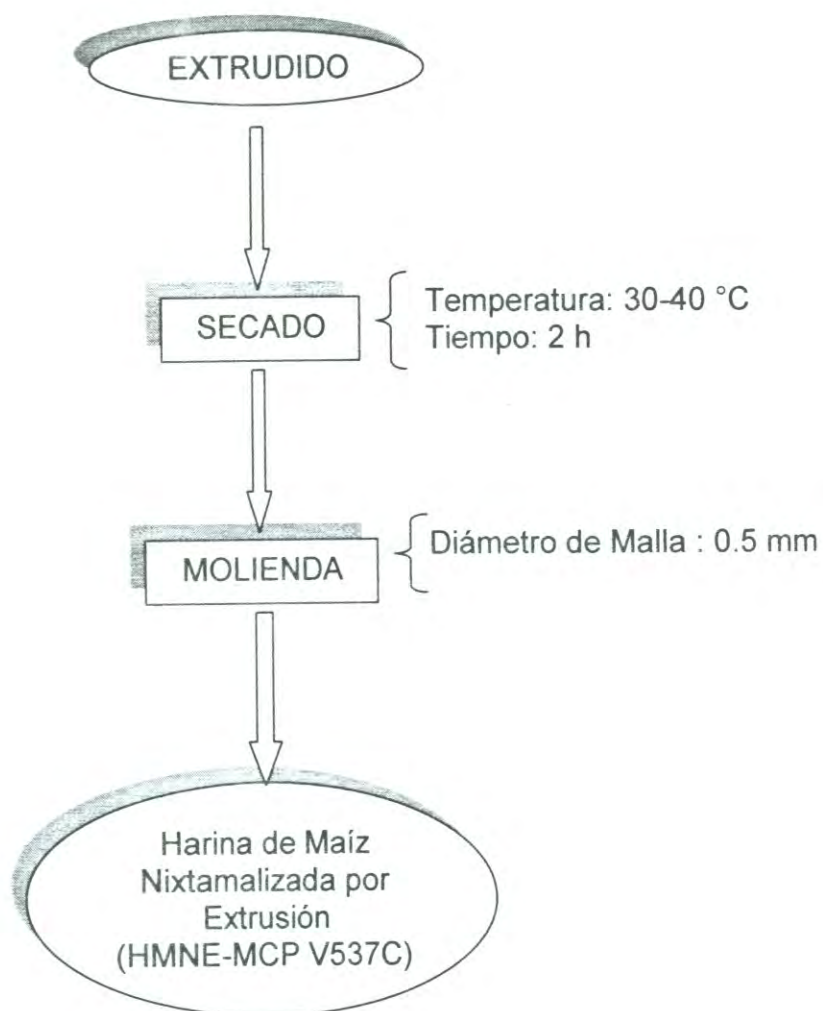


Figura 14. Producción de la harina de maíz (MCP) nixtamalizada por extrusión (HMNE).

Distribución del tamaño de partícula (DTP)

Una muestra de harina (50 g) se colocó en una pila de 5 mallas de la serie de tamices U.S. número 20 (841 μm), 40 (420 μm), 60 (250 μm), 80 (177 μm), 100 (149 μm) y fondo. Las mallas se colocaron en el equipo de rotación Rotachoc (Chopin, Francia). Después de someter a agitación durante 5 min, se separó la harina de las mallas con ayuda de una brocha y se pesaron las fracciones retenidas en las diferentes mallas. La distribución obtenida se reportó como el porcentaje de retención en cada malla en base a la muestra inicial de harina, como se indica a continuación:

$$\text{DTP (\%)} = \frac{\text{g retenidos en cada malla}}{\text{muestra inicial de harina}} \times 100 \quad (1)$$

Índice de tamaño de partícula (ITP)

El índice del tamaño de partícula fue obtenido de acuerdo a la metodología descrita por Bedolla y col. (1984), con algunas modificaciones, que consiste en la sumatoria total de cada uno de los productos del factor de malla por el % retenido, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{ITP} = \sum \left[(\text{Factor de \#Malla}_i) (\% \text{DTP}_i) + \dots + (\text{Factor de \#Malla}_n) (\% \text{DTP}_n) \right] \quad (2)$$

Donde: cada factor utilizado depende del número de la serie de tamices U.S (0.2, malla # 20; 0.4, malla # 40; 0.6 malla # 60; 0.8 malla # 80; 1.0 malla #100 y fondo) y el porcentaje de retención de cada malla es obtenido como se menciona en el análisis de distribución del tamaño de partícula.

Índice de absorción de agua (IAA)

El IAA se determinó utilizando el método de Anderson y col. (1969), modificado (la modificación consistió en la temperatura del agua adicionada, la cual paso 30 °C a temperatura ambiente) . En un tubo para centrifuga de 50 mL se agregó un gramo de muestra, luego se le adicionaron 15 mL de agua destilada a temperatura ambiente. La suspensión se agitó durante 30 min. seguida de una centrifugación a 5000 rpm durante media hora. El sobrenadante se colocó en un plato de aluminio previamente tarado y se evaporó en una estufa de convección a 105 °C (Marca Blue M/L Linderg, Modelo GO1305A, Ashville, N.C, USA). El peso del gel se registró como el del precipitado y el IAA se calculó con la siguiente ecuación:

$$IAA = \frac{(\text{peso del gel} - \text{peso de la muestra en base seca} - \text{peso del material solubilizado})}{\text{peso de la muestra en base seca}} \quad (3)$$

El IAA se expresó como: g de agua/g de muestra seca.

Índice de material soluble (IMS)

El IMS se determinó utilizando el método modificado por Anderson y col. (1969). Se calculó en base al peso del material soluble presente en el sobrenadante (utilizado para determinar IAA) y a la cantidad de muestra inicial. La determinación se realizó por triplicado. A través de la siguiente ecuación:

$$IMS = \frac{(\text{peso del material soluble en el sobrenadante})}{\text{peso seco de la muestra inicial}} \times 100 \quad (4)$$

Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS)

Esta prueba se determinó pesando 100 g de harina, posteriormente se adicionó agua de forma gradual, realizando un amasado manual suave hasta obtener una masa de buena consistencia. La cantidad de agua adicionada se registró como la capacidad de absorción de agua de la harina (Flores-Farias y col., 2002).

Densidad aparente (Dap)

Se determinó de la siguiente manera: Se colocó un embudo en un soporte universal y en la parte inferior un recipiente de hierro fundido con un diámetro interno de 29.84 mm, una altura de 49.70 mm y con una capacidad de 32 mL. Una vez vertida la harina cuidadosamente dentro del embudo se abrió la compuerta de paso y se dejó fluir libremente la harina. Con ayuda de una regla se rasó la harina excedente y se pesó el recipiente de volumen conocido. Para obtener la Dap de las harinas se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{peso de la harina}}{\text{volumen del recipiente}} \quad (5)$$

La densidad aparente se expresó en g/cm³. La determinación se realizó por triplicado.

Determinación de pH

El pH de las harina se midió de acuerdo al método 02-52 (AACC, 1995). Una suspensión con 10 g de harina y 100 mL de agua destilada (recientemente hervida), se agitó 15 segundos cada 5 minutos a velocidad alta hasta un total de 20 minutos. Al estar en agitación, en la muestra se sumergió un electrodo de un

potenciómetro (Marca Corning, Modelo GO1305A, Ashville, N.C, USA) para medir el pH. La determinación se realizó por triplicado.

Color

El color de las harinas se determinó en un colorímetro (Minolta Chromameter, modelo CR-210, Minolta LTD, Japón). Para la evaluación del color la muestra se colocó en cajas petri de dimensiones 3.5 (diámetro) x 1cm de altura y se midieron los parámetros correspondientes L (luminosidad, mayor 100, menor 0), a (+hacia rojo, -hacia verde), b (+hacia amarillo, - hacia azul). Se utilizó un mosaico blanco como referencia de valores L, a y b conocidos (L= 97.63, a= -0.78, b= 2.85).

Contenido de almidón total

Se empleó la técnica descrita por Goñi y col. (1997). Primeramente se pesaron por triplicado 50 mg de muestra en tubos de centrifuga de 50 ml. Posteriormente se adicionaron 3 ml de agua destilada y 3 ml de KOH 4 M, y se les colocaron cápsulas magnéticas para agitar vigorosamente por 30 min, a una temperatura de 25 °C. Luego, fueron adicionados 5 ml de HCl 2M y 3 ml de solución tampón de acetato sódico 0.4 M, ajustando el pH a 4.75. Posteriormente se adicionaron 60 µl de la suspensión de amilogucosidasa. Se mezcló e incubó a 60 °C durante 45 min, en un baño con agitación constante, enseguida se centrifugó por 15 min, a 3000 x G, y se recolectó el sobrenadante en matraces aforados, se repitió el centrifugado 2 veces con 10 ml de agua destilada y se aforó a un volumen de 100 ml. Por último se procedió a la determinación de la concentración de glucosa, por el método enzimático colorimétrico (absorbancia a 500 nm) GOD/POD (glucosa oxidasa/peróxidasa).

Contenido de amilosa aparente

Para realizar este análisis, se siguió la técnica descrita por Williams y col. (1970). Inicialmente se tomaron 20 mg de muestra en base seca en un tubo de 50 ml, a la cual se le adicionaron 10 ml de KOH 0.5 N; la suspensión se agitó durante 30 minutos (hasta lograr una dispersión casi total de la muestra). La muestra se transfirió a un matraz volumétrico de 100 ml y se aforó con agua destilada. Se tomó una alícuota de 10 ml y se transfirió a un matraz volumétrico de 50 ml. Se adicionaron 5 ml de HCl 0.1 N, 0.5 ml del reactivo B (reactivo de Yoduro) y se aforó con agua destilada. Se midió la absorbancia a los 5 min en un colorímetro (Marca spectronic 21) a 625 nm. Se realizó una curva estándar utilizando una solución madre de amilasa:amilopectina a una relación de 1:4. Los valores obtenidos fueron expresados en mg de amilosa.

Microscopía óptica

Se utilizó un microscopio compuesto (marca Karl Zeiss, modelo 39-25-60, Alemania). Los gránulos fueron observados con una magnificación de 40x. Se preparó una solución con la harina al 30 %, de dicha solución se tomó una gota y se distribuyó en un portaobjetos, observando los gránulos bajo luz normal para observar forma y tamaño, y bajo luz polarizada para observar la birrefringencia. Se utilizó una tinción con rojo congo para apreciar el daño que sufrió el almidón y/o el grado de gelatinización en cada etapa del proceso.

Pérdida de birrefringencia. La pérdida de birrefringencia de los gránulos de almidón, se detectó con la observación de la cruz de malta, la cual fue visible con el uso de luz polarizada del microscopio.

La temperatura de gelatinización se realizó según la técnica de Schoch y Maywald (1956), empleándose para ello un microscopio óptico (marca Karl Zeiss) unido a una placa de calentamiento (Kofler Hot Stage) sobre la cual se depositó una gota de suspensión de muestra al 10 %. Se registró la temperatura de gelatinización inicial, siendo aquella en la que el 10 % de los gránulos observados presentaron pérdida de birrefringencia, es decir cuando el gránulo no mostró la cruz de malta característica, y la temperatura de gelatinización final, donde ninguno de los gránulos observados presentó birrefringencia.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Este análisis fue realizado en un microscopio electrónico de barrido de la Marca Phillips XL30. Primeramente se pesaron 15 mg de muestra, y se colocaron en un vaso de precipitados adicionando 5 ml de agua destilada, se dispersó utilizando una cápsula magnética por espacio de 10 min. En agitación se tomó una gota y se realizó un frotis entre el portaobjetos y el cubreobjetos. Se dejó evaporar el solvente a temperatura ambiente y se introdujeron (muestra por muestra) a la cámara de bajo vacío del MEB. Las muestras se observaron a una magnificación de 100 y 20 μm , de varias fotos se seleccionaron las que mejor presentaban el perfil requerido.

Calorimetría de barrido diferencial (CBD)

El análisis calorimétrico se llevó a cabo con la técnica reportada por Campas-Baypoli (1997). Se utilizó un calorímetro de barrido diferencial (marca Perkin Elmer, modelo DSC-7, Norwalk, Connecticut, USA) con el fin de medir la entalpía de gelatinización (ΔH), y las temperaturas de fusión (T_p y T_o) de los gránulos para los productos obtenidos del proceso.

Para llevar a cabo esta determinación se utilizaron 3 mg de muestra, la cual se ajustó a una humedad del 200 %. Esta prueba se llevó a cabo a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en un intervalo de temperaturas de barrido de 30-100 °C.

Viscosidad amilográfica

Este análisis se llevó a cabo en un analizador de viscosidad rápido (marca Newport Scientific, modelo 3, Sydney, Australia), siguiendo la técnica descrita en el manual de operación del equipo. Se preparó una suspensión, en donde se agregaron 3 g de muestra en 25 mL de agua. La suspensión fue calentada a 50 °C durante 1 min, posteriormente se incrementó la temperatura a 95 °C en 8 min y se mantuvo a esta temperatura durante 5 minutos; por último se bajó la temperatura a 50 °C en un tiempo de 7.5 min, manteniéndose a esta temperatura durante 2 minutos. La velocidad de rotación inicial fue de 960 rpm durante 10 segundos, y el resto de la prueba se realizó a una velocidad de 160 rpm.

Difracción de rayos-x

Los patrones de difracción de las harinas obtenidas de cada etapa del proceso, fueron determinados en un difractómetro de rayos-x (Marca Philips), operando a 35 Kv (15 mA), empleando radiación de cobre (Cu) k-alfa a una longitud de onda de 1.5406 Å. Cada muestra fue colocada en recipientes especiales de vidrio para medir la difracción de rayos-x. Los difractogramas se obtuvieron en un rango de 5 a 40° sobre una escala 2 theta. Los resultados fueron reportados como valores de distancia d interplanar expresado en Å. Para calcular la distancia interplanar se utilizó la ecuación de la ley de Bragg:

$$n \times \lambda = 2d \text{ Sen}\theta$$

(6)

donde:

n = Número de longitudes de onda

λ = Longitud de onda

d = Distancia interplanar

El porcentaje de cristalinidad relativa fue determinado empleando la siguiente relación:

$$\% Cr = \frac{A_p}{A_t} \quad (7)$$

donde:

$\% Cr$ = Porcentaje de cristalinidad relativa

A_p = Área de los picos

A_t = Área total de la difracción (sin ruido)

Contenido de almidón resistente

Se empleó la metodología descrita por Goñi y col. (1996), la cual se fundamenta en determinar el contenido de almidón indigestible total (fracciones RS2, RS3, y parte de RS1) en muestras vegetales tal y como se ingieren. Inicialmente se realizó una hidrólisis proteica con pepsina a pH ácido para emular las condiciones estomacales, seguida de la hidrólisis del almidón digestible con α -amilasa pancreática, una vez eliminados los productos de esta hidrólisis por centrifugación, en los residuos permanecieron las fracciones indigestibles. Esta porción fue dispersada en medio alcalino e hidrolizada en su totalidad con amiloglucosidasa, para determinar así, la glucosa liberada.

Para realizar el análisis anterior, primeramente fueron pesados 100 mg de muestra en un tubo de centrifuga, se agregaron 10 ml de regulador de KCl-HCl pH 1.5 y 200 μ l de solución de pepsina (250 mg de enzima en 2.5 ml de regulador de KCl-HCl). Posteriormente dichos tubos fueron incubados en un baño de agua a

40 °C por 60 minutos con agitación constante, luego se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se adicionaron 9 ml de regulador de trismaleato pH 6.9 y 1 ml de solución de α -amilasa (360 mg de enzima en 9 ml de regulador de trismaleato). Se incubaron durante 16 horas en baño a 37 °C con agitación constante. Pasado este tiempo, fueron centrifugadas las muestras durante 15 minutos a 3000 g y se desechó el sobrenadante; el residuo se lavó con 10 ml de agua destilada y se descartó nuevamente el sobrenadante.

Se adicionaron 3 ml de agua destilada al residuo y 3 ml de KOH 4M (preparado ese mismo día), la mezcla se mantuvo en agitación constante durante 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, se agregaron 5.5 ml de HCl 2 M y 3 ml de regulador de acetato de sodio, se ajustó el pH a 4.75, se adicionaron 80 μ l de amilogucosidasa. Se incubaron nuevamente por 45 minutos en un baño de agua a 60 °C con agitación constante. Se centrifugaron por 15 minutos a 3000 g, y se recolectó el sobrenadante en un matraz aforado de 50 ml. Se tomaron 50 μ l de muestra para determinar la cantidad de glucosa liberada por digestión enzimática, mediante el método de glucosa/oxidasa peroxidasa leyendo las absorbancias de las muestras a 510 nm en un espectrofotómetro espectral Genesys 5 (Spectronic Instruments Inc. Rochester, N.Y. USA).

Elaboración de la Masa

De las muestras de harina nixatamalida (extrudida y comercial) se pesaron 100 g y se le adicionó agua hasta alcanzar una consistencia adecuada, así como se indica en la prueba de capacidad de absorción de agua subjetiva (Martínez-Bustos, 2002) para el mezclado se utilizó una mezcladora (Marca Kitchen Aid ; Modelo MK4588WH St Joseph, Michigan, USA).

Contenido humedad. Esta determinación se realizó utilizando el Método 44-15 (AACC, 2001). La humedad de la masa se determinó utilizando una estufa con

circulación de aire (Marca Tripette & Renaud, Modelo EM10, Villeneuve La Garenne, France) por 12 h a 105 °C.

Elaboración de las Tortillas

La elaboración de las tortillas con la harina nixtamalizada (Extrudida y Comercial) se llevó a cabo mediante dos metodologías: de forma experimental (Fig. 15) de acuerdo a la metodología descrita por San Martín-Martínez y col. (2003); y de forma comercial. Para la forma experimental se pesaron 100 g de HMNE y HCOM, y utilizando la metodología de la capacidad de absorción subjetiva de agua se determinó la cantidad de agua a adicionar (en el caso de la HMNE= 72 ml y la HCOM= 120 ml), de la masa obtenida de consistencia adecuada se cortaron trozos de los cuales se elaboraron esferas con un peso aproximado de 20 g y utilizando una maquina tortillera (Marca TORTIMEX; Jalisco México) se moldean los discos, hasta un diámetro de 12.5 ± 0.1 cm y un grosor de 1.19 ± 0.1 mm. Los discos de masa fueron cocidos en una estufa comercial (marca-IEM) a una temperatura de 270 ± 10 °C por 15 s de un lado, seguido por 30 s del otro y nuevamente 15 s en el primer lado (en donde se da el inflado) de la tortilla. Las tortillas elaboradas con esta metodología fueron empleadas para obtener la tortilla molida de la HMNE y la HCOM.

Para la elaboración de tortillas de forma comercial (Fig. 16) se tomaron 2.5 kg de harina nixtamalizada por extrusión y se le adicionaron 1.8 L de agua, ésta fue mezclada en una amasadora industrial (Marca Horbat, Modelo AS200T, USA) a baja velocidad (600 rpm) por espacio de 20 min, luego la masa fue colocada en una bolsa de polietileno para evitar la pérdida de humedad. La masa fue trasladada a una tortillería comercial de la ciudad de Hermosillo Son., posteriormente la masa fue colocada en los rodillos formadores de discos (tortillas) de la maquina procesadora de tortillas para que éstas posteriormente, pasaran por el proceso de cocción ($280 \text{ °C} \pm 10\text{°C}$ por 1 min), y de forma automática en serie, se obtuvieron las tortillas. Las tortillas elaboradas con esta

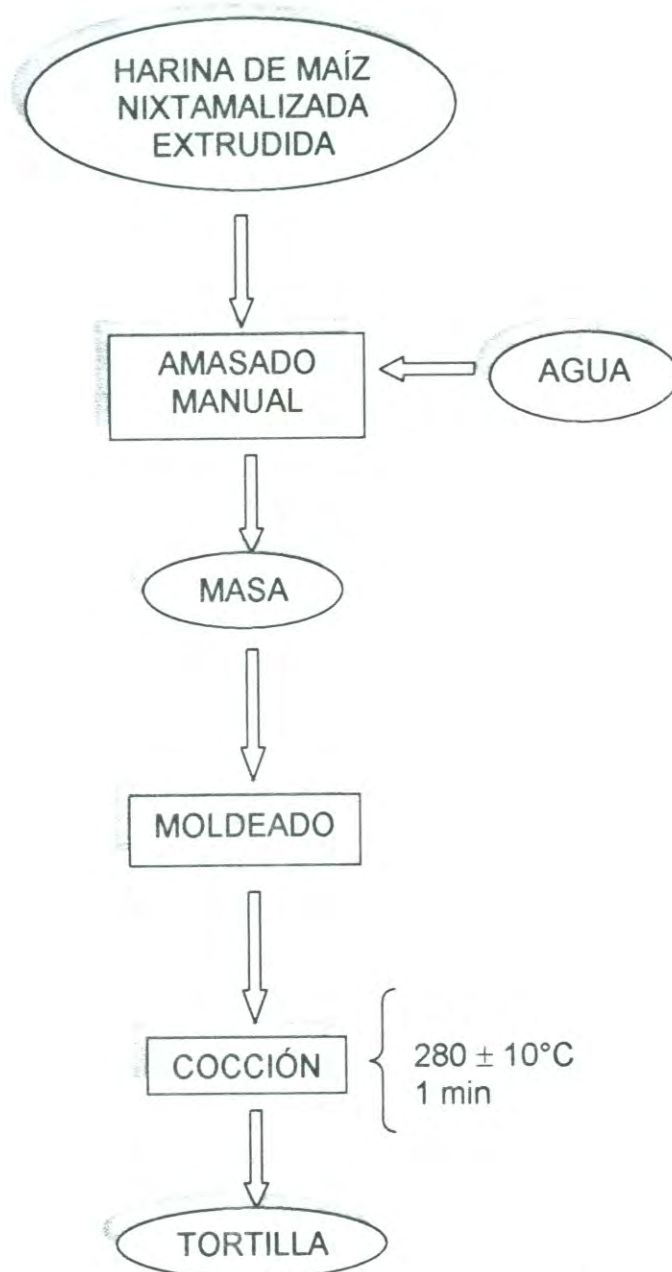


Figura 15. Producción de masa y tortilla elaborada de forma experimental con harina de maíz nixtamalizada por extrusión y comercial (MASECA).

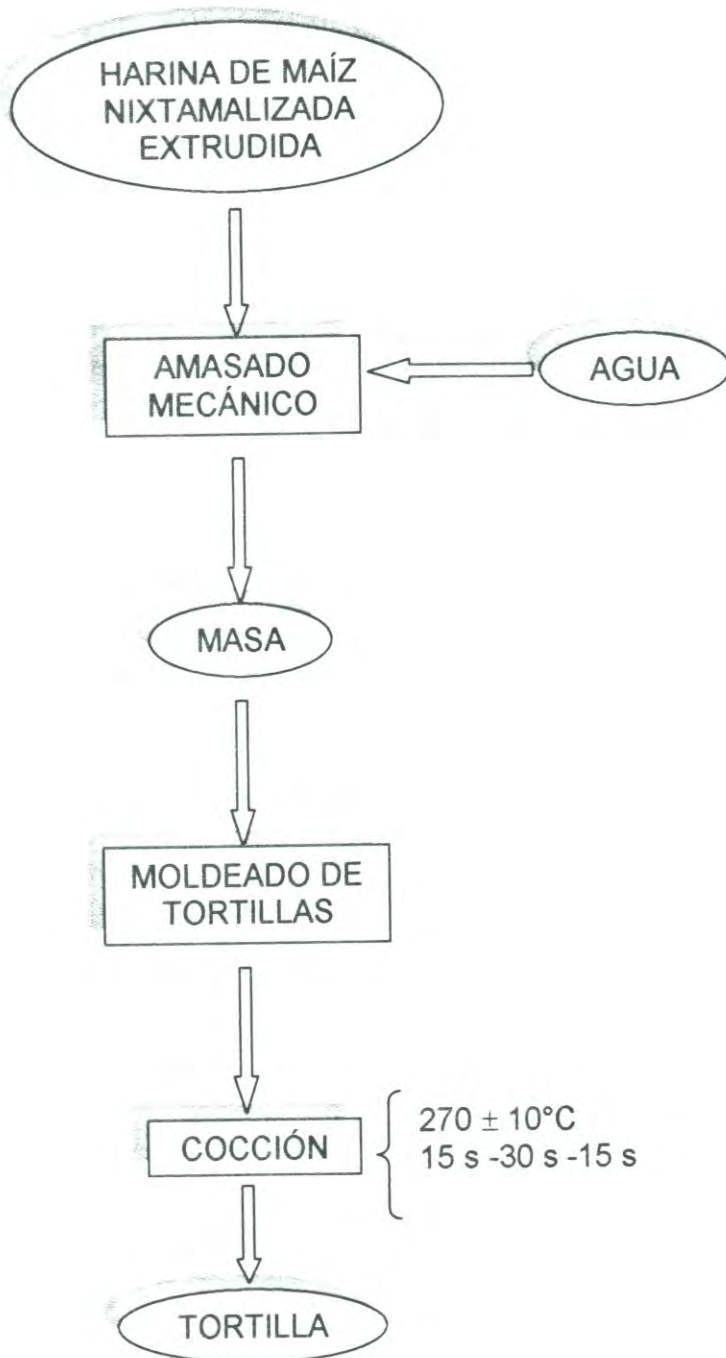


Figura 16. Producción de masa y tortilla elaborada de forma comercial con harina de maíz nixtamalizada por extrusión y comercial (MASECA).

metodología fueron empleadas para realizar los análisis de características físicas y propiedades texturales de la HMNE y la HCOM.

Para ambos procedimientos las tortillas se enfriaron por 30 min a una temperatura de 25 °C y después se empacaron en bolsas de polietileno y se almacenaron a temperatura ambiente para realizar los análisis posteriores.

Evaluación de las Tortillas

Características físicas

Se evaluaron tres características: peso (balanza digital OAHUS, USA), diámetro y espesor de tortilla (Verniere digital UNOX Metromex, México).

Propiedades texturales

La firmeza y rollabilidad en tortilla fueron evaluadas a diferentes tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h). Para cada tiempo de almacenamiento, fueron colocadas cinco tortillas en bolsas de polietileno y se almacenaron a temperatura ambiente (25 °C) hasta su análisis.

Firmeza y módulo de rigidez. Se utilizó un texturómetro (Instron, modelo 4465, Canton, MA, USA), al cual se le conectó la celda de kramer. Se cortó una pieza del centro de la tortilla de área de 41.47 cm² y se colocó en la caja rectangular de la celda de Kramer. Al bajar el cabezal del texturómetro se aplicó una compresión uniaxial y se registró la fuerza requerida para romper la tortilla. Se obtuvo una curva típica de deformación y ruptura en el graficador. Se utilizó la celda de carga de compresión y tensión de 500 kg, las velocidades del cabezal y de carga fue de 10 cm/min. La firmeza se expresó como el esfuerzo máximo en kPa, y fue corregido por el espesor de la tortilla. El módulo de rigidez se expresó en kg/mm².

Rollabilidad. De cada tortilla a evaluar fueron cortadas cinco tiras de 2 cm de ancho. Cada tira de tortilla fue enrollada en un cilindro de madera de 2 cm de diámetro y fue observada el grado de ruptura, para lo cual se estableció una escala de 1 a 5, donde 5 señaló aquella tortilla que no se rompió, 3 se rompió de manera parcial, y 1 se rompió completamente (Waniska, 1976). Con la harina comercial se elaboró masa y tortillas, así como sus respectivos análisis, de igual forma a la obtenida por el proceso de extrusión.

Obtención de la tortilla molida

Muestras de TMNE y TCOM, elaboradas por el método de laboratorio propuesto por (SanMartín-Martínez, 2002) frescas fueron cortadas en trozos, y posteriormente colocadas en charolas, luego se pasaron a un secador de tunel durante 2 h a 40 °C. Secas las muestras se molieron en un molino de cuchillas (Marca Thomas-Wiley, Laboratory Mill, Model 4 Thomas Scientific. USA), con malla de 0.5 mm. La tortilla molida se almacenó en bolsas de polietileno para posteriormente realizar los análisis de difracción de rayos x, viscosidad amilográfica, calorimetría de barrido diferencial, microscopía, pérdida de birrefringencia, temperatura de gelatinización, microscopía electrónica de barrido, contenido de amilasa aparente, almidón total y almidón resistente.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño experimental de un solo factor, el cual consistió en las diferentes etapas del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada extrudida. Las variables respuesta fueron las diferentes determinaciones realizadas a las muestras obtenidas (maíz molido, harina nixtamalizada extrudida y tortilla molida).

Los datos obtenidos de cada determinación se examinaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA), y se obtuvieron los niveles de significancia (Valor de p). La prueba estadística fue llamada no significativa (NS) cuando $p > 0.05$, significativo (*) si $0.01 < p < 0.05$, y muy significativo (**) si $p < 0.01$.

Para distinguir diferencias entre los tratamientos, se utilizó la prueba de Tukey a un niveles de significancia de 0.05 ($p < 0.05$). Además también se calcularon coeficientes de correlación simple (donde fue posible) para observar el efecto entre determinaciones. El análisis estadístico se realizó con el paquete computacional SAS (SAS, Instiute Inc., Cary. NC. USA, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición Proximal de la Materia Prima

La composición proximal de la materia prima utilizada en el presente estudio (MCPV-537C) y la harina de maíz nixtamalizada comercial (HCOM) se muestra en la Tabla 6. Resultados similares en cuanto al contenido de lípidos y cenizas fueron reportados por Milán-Carrillo (2003), utilizando la misma variedad de maíz. Sin embargo, difiere ligeramente en cuanto al contenido de proteína y carbohidratos totales, con una diferencia del 1.57 y 6.34 %, respectivamente. Diversos autores (Reyes-Moreno y col., 2003; González-Vera, 2002; Serna-Saldivar y col., 1991; Buendía, 1981), muestran cuantificación de componentes químicos similares a los encontrados en el MCP. Salinas y col. (1992), mencionan que el contenido ligeramente mayor de proteína en los MCP a diferencia del maíz blanco común, se debe a las modificaciones sufridas por esta variedad, y la cual se encuentra asociado de manera directa con la dureza del endospermo de este grano.

Por otro lado, el contenido de lípidos que presató el MM fue ligeramente mayor al que se observó en la HCOM, esta diferencia observada fue de 0.68 %. El ligero incremento de este componente químico pudiera causar problemas en la vida de anaquel (rancidez) del producto obtenido (HMNE), sin embargo, de acuerdo con González (1996), los productos extrudidos presentan menor contenido de lípidos que el que presenta la materia prima, esta disminución menciona este autor pudieran ser debido a las reacciones de formación de complejos de los triglicéridos con los diferentes componentes del gránulo de almidón, debido a las altas presiones y temperaturas de procesamiento. Datos similares fueron reportados por Gómez (1996), para componentes químicos de harinas instantáneas de maíz elaboradas por extrusión. De la misma forma Martínez y col. (1996), observaron una ligera disminución, obteniendo valores de 3.56% de extracto etéreo para la harina de maíz y 3.47 % en el producto extrudido.

Tabla 6. Composición proximal del maíz (MCP) y harina comercial (HCOM).

Determinación	MCP V-537C (MM)	DE ²	HCOM (MASECA)	DE ²	MCP (V-537C) ⁴
Cenizas (%)	1.42 ¹	0.01	1.32 ¹	0.006	1.6
Lípidos (%)	6.04 ¹	0.07	5.36 ¹	0.18	6.1
Proteínas (%)	9.13 ¹	0.11	8.01 ¹	0.30	10.7
Carbohidratos ³ (%)	74.8		75.2		81.6

¹ Los valores son el promedio de tres repeticiones en base seca.

² Desviación Estándar.

³ Se obtuvieron por diferencia.

⁴ Resultados reportados por Milán-Carrillo (2003).

Con respecto a la HCOM, Álvarez-Rivas (1996), reporta valores de 8.73 % en proteína, 3.81 % en lípidos, 1.31 % en cenizas y 84% de carbohidratos totales. Con base a los valores anteriores, se puede observar que existen pequeñas diferencias a las encontradas en el presente estudio, destacando el contenido de proteína y los carbohidratos totales con una diferencia de 1.32 y 8.74% respectivamente. Sin embargo, otros autores (Bedolla y Rooney, 1984; Flores-Farias y col., 2000; Bello-Perez y col., 2002; Reyes-Moreno y col., 2003), reportan resultados similares.

Las pequeñas variaciones que se presentan pueden ser atribuidas a la variabilidad que existe entre los diferentes híbridos de MCP y a las variaciones naturales y condiciones agronómicas de los cultivos (Bedolla y Rooney, 1984).

Caracterización de las Harinas

Contenido de humedad

El ANDEVA (Tabla 7) para el contenido de humedad en los productos analizados fue altamente significativo ($p < 0.01$). De igual forma, el valor promedio para todos los productos presentó diferencias estadísticas significativas ($DMS = 0.797$) en ambas harinas.

El contenido de humedad en los productos del proceso para elaborar tortillas con harina nixtamalizada por extrusión y la harina nixtamalizada comercial se muestran en la Fig. 17. En forma general se puede observar que los productos (HMNE, MHMNE y THMNE) derivados de la nixtamalización por extrusión, generaron valores menores en comparación con los obtenidos en la harina comercial. Sin embargo, estos últimos fueron ligeramente mayores, con una diferencia de 2.2 % en harinas, 11.4 % en masa y 4.7 % en la tortilla. Resultados similares en harinas nixtamalizadas por extrusión y comerciales fueron reportados por diferentes autores (Alvarez-Rivas, 1996; Almeida-Domínguez y col., 1996; Bello-Pérez y col., 2001; Galicia-García, 2005), quienes muestran intervalos de

Tabla 7. Análisis de varianza, valor F, del contenido de humedad del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

		Valor de F
Fuente de Variación	GL	Humedad
Tratamiento	6	17568.6 **
Error	14	
Total	20	

** Altamente significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

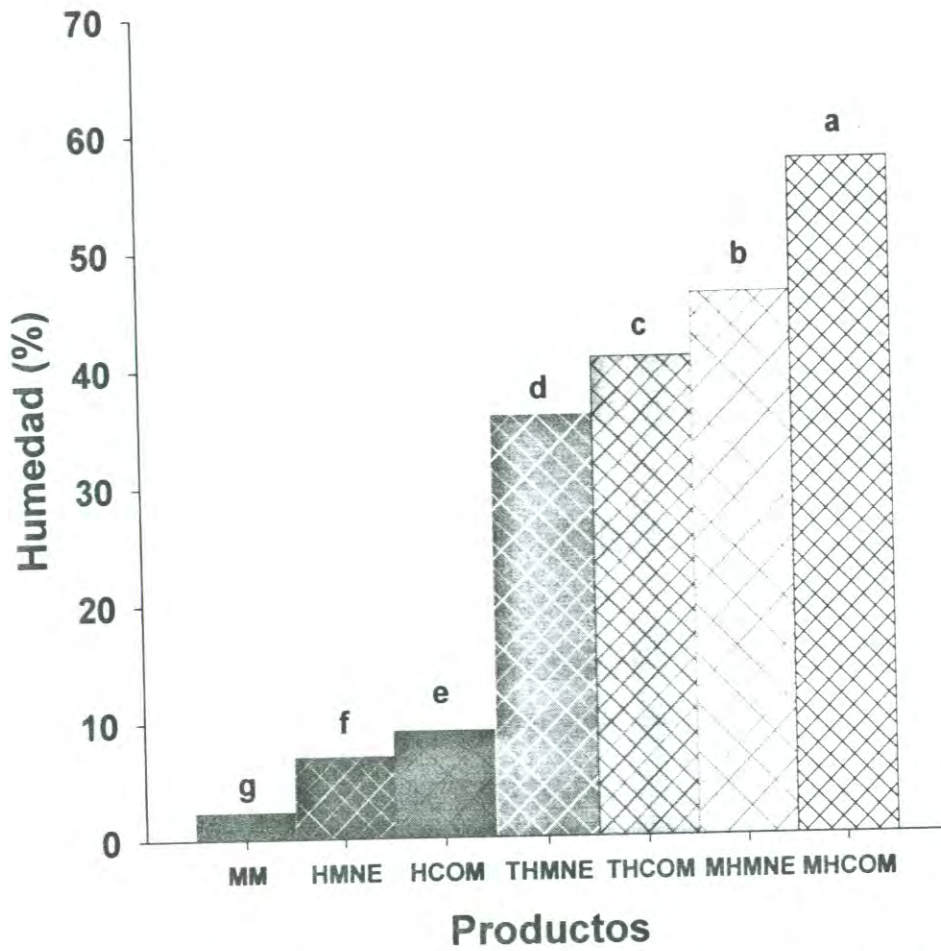


Figura 17. Contenido de humedad en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Nota: medias con letras iguales no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

humedad para estos productos de 6.7 % y 11.7 %. Según Arámbula y col. (1999), la concentración de humedad en la masa fresca generalmente se encuentra en el rango de 48- 52% (p/p), mientras que las tortillas presentan un intervalo de humedad de 45-50% (Islam y col., 1984; Johnson y col., 1980). Enríquez-Ramos (2004) reporta resultados similares en maíz y tortilla en los productos del proceso para elaborar tortillas de maíz por el proceso tradicional, mencionando que el contenido de humedad está en función del efecto de los tratamientos (molienda, cocción y horneado) por los que pasa el grano de maíz para transformarse en producto.

La diferencia en humedades en los productos extrudidos y los elaborados con la harina comercial pueden ser debido a que el primero se modifica mayormente la identidad gránular o estructural de los gránulos de almidón, tal como lo mencionan Mok y Dick (1991), quienes reportan que los sitios de enlazamiento de las moléculas de agua son los grupos hidroxilo de las moléculas de almidón. Por lo que, cuando las moléculas son modificadas mecánicamente o por efecto del calor, algunas enlaces de amilosa y amilopectina se rompen, esto incrementa el número de grupos hidroxilo libres para formar enlaces hidrógeno. La formación de enlaces hidrógeno disminuye el número de sitios polares accesibles en los cuales las moléculas de agua pueden enlazarse, lo que pudiera explicar la baja capacidad de absorción de agua.

Distribución del tamaño de partícula

En la Tabla 8, se presenta la distribución del tamaño de partícula (DTP) del MM, HMNE y HCOM. El MM, la HMNE y la HCOM presentaron el mayor porcentaje de harina retenida (Tabla 8) en la malla #60 (250 μ m) seguida de la #80 y #100, respectivamente, mallas cuya abertura es la más pequeña. Estos valores influyeron de manera importante en los valores obtenidos del ÍTP.

El análisis de varianza (Tabla 9) realizado a el ÍTP en el MM, HMNE y la HCOM mostró que hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ellos. El ÍTP de

Tabla 8. Valores de la distribución de tamaño de partícula del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Malla	MM ^{1,3} (%)	DE ²	HMNE ^{1,3} (%)	DE ²	HCOM ^{1,3} (%)	DE ²
20	0.71	0.15	0.10	0.04	0.45	0.23
40	5.92	1.17	1.21	0.11	2.05	1.26
60	72.68	5.96	68.66	3.02	52.88	3.79
80	11.99	1.44	15.25	3.16	24.48	1.24
100	8.55	3.84	13.29	1.97	19.23	5.86
Fondo	0.11	0.08	1.46	1.10	0.02	0.01

¹ Valores promedio de tres repeticiones.

² Desviación Estándar.

³ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial.

Tabla 9. Análisis de varianza, valor F, de la DAP y pH del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Fuente de Variación	GL	Valor de F		
		ÍTP ¹	DAP ¹	pH ¹
Tratamiento	2	6.35 *	171.15 **	1471.67 **
Error	6			
Total	8			

¹ ÍTP= Índice de Tamaño de Partícula; DAP= Densidad aparente; pH= Potencial hidrógeno.

* Significativos a un nivel de $p= 0.05$ ($p<0.05$).

**Altamente significativos a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

los harinas se muestra en la Tabla 10, en la cual se pueden observar las siguientes diferencias: el ÍTP del MM no mostró diferencia con la HMNE, pero con la HCOM si fue diferente, en tanto que la HMNE no fue diferente a la HCOM. Resultados similares fueron observados por Galicia-García (2005), quien menciona que el ÍTP tiene correlación con el inflado de la tortilla, esto es al haber un menor tamaño de partícula el inflado tiende a incrementarse.

Los valores de DTP en la Tabla 8, muestran que la HCOM tubo un tamaño de partícula más fino y uniforme que el MM y la HMNE, ya que una mayor cantidad de harina fue retenida en las mallas # 60 y # 80. La DTP en las harinas es un factor importante cuando se define el propósito específico del producto (Gómez y col., 1987). Por ejemplo, para elaborar tortillas suaves y/o flexibles se requieren harinas con un tamaño de partícula fina, mientras que para la elaboración de tostadas se requieren harinas de tamaño de partícula gruesas (grits) (Montemayor y Rubio, 1983). Figueroa y col. (1997), mencionan que la distribución de tamaño de partícula es una de las tres principales propiedades físicas asociadas con la funcionalidad de las harinas nixtamalizadas.

De acuerdo con la NOM (187-SSA1/SCFI-2002) para harinas nixtamalizadas de maíz, el 75 % de la harina debe pasar a través de la malla de número 60, por lo que ambas harinas (HMNE y HCOM) cumplen con dicha norma. Sin embargo, es de destacar que la HCOM mostró un menor porcentaje de harina retenida en la malla #60 lo que significa que presenta un mayor porcentaje de partículas finas en comparación con el MM y la HMNE. Gómez y col. (1991), reportan que fracciones de tamaño de partícula finos fueron mecánicamente más dañados y esto está influenciado por el tipo de maíz, la molienda y la abertura de malla. Cuando el tamaño de partícula decrece la magnitud de almidón dañado se incrementa, lo que es debido al grado de pulverización. Campbell y Briant (1957), indican que gránulos de almidón pequeños son susceptibles a sufrir un mayor daño a diferencia de gránulos más grandes. De igual forma Flores-Farías y col. (2002), mencionan que la dureza del

Tabla 10. Valores de densidad aparente y pH del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Producto ⁴	ITP ²	DAP ² (g/cm ³)	pH
MM	64.39 ¹ a ³	0.5502 ¹ b ³	6.42 ¹ c ³
HMNE	68.66ab	0.6838a	6.98a
HCOM	71.49b	0.4611c	6.63b
DMS	3.06	0.03	0.03

¹ Valores promedio de tres repeticiones.

² ITP= Índice de tamaño de partícula; DAP= Densidad aparente

³ Medias con letras iguales, en la misma columna, no son estadísticamente significativas a un nivel de $p=0.05$ ($p>0.05$).

⁴ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; DMS= Diferencia mínima significativa.

grano, el tiempo de nixtamalización, la cantidad de cal empleada, el tiempo de reposo y el cribado son factores determinantes en el tamaño de partícula obtenido en harinas nixtamalizadas comerciales.

Bedolla y Rooney (1984), revelan que la fracción fina es la responsable de la mayor parte de la absorción de agua y el desarrollo de viscosidad durante el mezclado. Mientras que la principal función de la fracción gruesa es reducir el exceso de blandura, o la formación de grandes burbujas de aire durante el cocimiento o el freído. Gómez y col. (1992), indican que las tortillas necesitan hacerse con harinas nixtamalizadas con un tamaño de partícula fino, para que éstas presenten cohesividad en la masa y una aceptable rollabilidad en el producto final.

Densidad aparente

La densidad aparente (DAP) para las tres harinas analizadas fue estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$), de igual forma también se observó una diferencia significativa ($DMS = 0.0373$) entre los valores promedio de esta determinación.

Los valores obtenidos de DAP se presentan en la Tabla 10, de los cuales la HMNE fue la que generó más peso por unidad de volumen con un valor de 0.683 g/cm^3 , en tanto que la HCOM fue la que tuvo el menor valor con 0.461 g/cm^3 . Datos similares fueron reportados por Galicia-García (2005), para ambas harinas (0.64 g/cm^3 y 0.47 g/cm^3 respectivamente). En tanto que Bressani y col. (2001) observaron rangos de valores para harinas comerciales de 0.410 a 0.547 g/cm^3 .

Resultados diferentes fueron encontrados por Bedolla y Rooney (1984) quienes reportan intervalos de valores de 0.385 a 0.448 g/cm^3 en harinas comerciales de México, resultados que concuerdan con los observados por Flores-Farias y col. (2002). Según Bressani y col. (2001), harinas

nixtamalizadas con altos valores en densidad son harinas que pueden empacarse bien en el embase.

Bedolla y Rooney (1984), mencionan que esta variable (DAP) tiene relación con el tamaño medio de partícula de las harinas, por lo que una mayor presencia de partículas finas se asocia con densidades más bajas, tal como lo muestran los resultados observados en el presente estudio, en donde la harina comercial presentó un porcentaje mayor de dichas partículas a diferencia del MM y la HMNE. Por otra parte varios autores (Flores-Farias y col., 2002; Arámbula y col., 1998) mencionan que la densidad aparente del MM es afectada por el tipo de molino y tamiz utilizado.

Determinación de pH

El ANDEVA (Tabla 9) realizado al pH de las harinas, fue estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$) entre las harinas, de igual forma también se observó una diferencia significativa entre los valores promedio de este análisis.

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 10, la HMNE fue la que generó el mayor valor de pH con 6.9, en tanto que el MM fue el que presentó el menor valor con 6.4. Ligeras variaciones de pH a los resultados obtenidos en el MM fueron reportados por Enríquez-Ramos (2004) y Vásquez (1995) quienes obtuvieron un valor de pH igual a 6.6. En tanto que Flores-Farias y col. (2000), en HCOM observaron valores de pH entre 6.2 y 6.9. Según Alvarez-Rivas (1996), en la industria de harinas nixtamalizadas se utilizan concentraciones bajas de hidróxido de calcio con el fin de reducir la tonalidad amarilla de la harina, de aquí que la diferencia del pH observado en la HCOM sea menor que el de la HMNE. Bazua y col. (1979), reportan variaciones del color debido a concentraciones diferente de cal durante la obtención de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión. Encontrando que niveles de concentración de 0.2 % de cal, es la que desarrollo mejor olor, sabor, color y textura en la masa extrudida. Bedolla y

Rooney (1984), mencionan un bajo pH se relaciona con menos adición de cal durante el cocimiento, y un excesivo lavado del nixtamal lo que resulta en una mayor pérdida de materia seca, y más agua utilizada. Pero sobre todo, menciona este autor, que el sabor es ampliamente influenciado por la variabilidad en el pH.

De acuerdo con Bello-Perez y col. (2002) y Flores-Farias y col. (2002), un pH alto se puede obtener incrementando la concentración de cal durante el cocimiento o reduciendo el número de lavados del nixtamal durante el procesamiento. De igual forma estos autores mencionan que debido al pH las cadenas de glucosa de la amilosa y la amilopectina se cargan lo cual ayuda a disminuir la retrogradación.

Determinación de color

Luminosidad (CL). El color es un atributo importante en los alimentos, ya que los consumidores toman decisiones finales basadas en la apariencia, en donde se incluye al color (Good, 2002).

El ANDEVA (Tabla 11) para la luminosidad (CL) en las harinas, no mostró diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$), en las harinas analizadas. Sin embargo, utilizando como referencia al maíz molido integral el cual generó el mayor valor de luminosidad (Tabla 12), existe una tendencia de disminución de la luminosidad en la HMNE y la HCOM. Este decremento, sugiere que debido al procesamiento las harinas nixtamalizadas muestran una tendencia al obscurecimiento. Galicia-García (2005), reporta resultados parecidos a los observados en el estudio en MM ($L = 73.5$) y la HMNE ($L = 61.6$ a 72.9). Pons-Hernández (2004), menciona que la tendencia al obscurecimiento en la HMNE se ve favorecido al incrementarse la temperatura, el porcentaje de humedad de acondicionamiento y la velocidad del tornillo.

Tabla 11. Análisis de varianza, valor F, del color en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Fuente de Variación	GL	Valor de F	
		CL ¹	Cb ¹
Tipo de Harina	2	1.68NS	365.72 **
Error	6		
Total	8		

¹ CL= Luminosidad; Cb= Tendencia al color amarillo.

NS= No significativas a un nivel de $p= 0.01$ ($p>0.01$).

** Altamente significativos a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 12. Valores de luminosidad (CL) y tendencia al color amarillo (Cb) en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Producto ³	CL	Cb
MM	72.65 ¹ a ²	10.05 ¹ b ²
HMNE	66.85a	14.52a
HCOM	65.05a	9.80b
DMS	13.29	2.44

¹ Valores promedio de tres repeticiones.

² Medias con letras iguales, en la misma columna, no presentan diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

³ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; DMS= Diferencia mínima significativa.

Resultados diferentes del valor de luminosidad en harinas comerciales fueron observados por Alvares-Rivas (1996), quien reporta intervalos de valores de L de 83 a 84.25. Según este autor menciona que la industria MASECA (HCOM) ha estado elaborando harinas de maíz más blancas en el mercado mexicano, pero les resulta difícil mantener este parámetro constante, ya que existe una gran variación de la disponibilidad y precio de genotipos de maíz disponibles.

Por otra parte, según Faubión (1982), el color es también influenciado por el pH ya que al aumentar, se incrementa el color oscuro en los productos extrudidos, probablemente debido a las reacciones no enzimáticas (reacciones de Maillard) de los carbohidratos con otros componentes químicos debido al pH y las temperaturas de procesamiento.

Tendencia al color amarillo (Cb). El ANDEVA (Tabla 11) para la tendencia al color amarillo (Cb) en las harinas, mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.01$). La HMNE (Tabla 12) fue la que mostró ser estadísticamente diferente ($p \leq 0.01$) con una mayor tonalidad amarilla ($b = 14.52$). Es de destacar que entre el MMI y la HCOM no se encontraron diferencias significativas, lo que demuestra que la industria ha puesto especial cuidado en disminuir este parámetro de coloración debido a los estándares de calidad que manejan. Resultados similares en cuanto a tendencias pero diferentes en valor, fueron observados por Galicia-García (2005), quien reporta rangos de valores de Cb en la HMNE entre 15.3 y 18.5. Martínez-Bustos y col. (1996), al obtener harinas extrudidas a diferentes condiciones de procesamiento: concentración de cal (0.15-0.35 %), temperatura (130 °C) y humedad (16-20 %), encontró rangos de valores de tonalidad amarilla de 6 a 10, los cuales son ligeramente menores los obtenidos en este estudio. Arámbula y col. (1998), menciona que incrementos en la humedad de acondicionamiento y la temperatura de procesamiento producen incrementos significativos en la tonalidad amarilla en la harina nixtamalizada extrudida.

Por otra parte, Alvares-Rivas (1996), reporta valores diferentes en HCOM encontrando rangos de valores de Cb entre 13 y 16, valores similares son reportados por Bedolla y Rooney (1984). Bazua y col. (1979), mencionan que la concentración de cal afecta el color de las harinas de maíz nixtamalizadas por el proceso de extrusión y nixtamalización por el proceso tradicional.

Capacidad de absorción de agua subjetiva

De acuerdo con Flores-Farias y col. (2002), esta determinación es muy útil para conocer la cantidad de agua necesaria que absorbe la harina, y de esta manera obtener una masa de consistencia adecuada para la elaboración de tortillas, además de ser un indicador del rendimiento.

El análisis de varianza (Tabla 13) realizado a la CAAS en la HMNE y la HCOM mostró diferencia estadística altamente significativa ($p \leq 0.01$), siendo la HMNE la que absorbió menor cantidad de agua (48 ml/100 g menos que la HCOM). Tendencias similares fueron reportadas por Galicia-García (2005), en tanto que diferentes autores (Flores-Farias, 2002; Billeb y Bressani, 2001; Alvares-Rivas, 1996; Bedolla y Rooney, 1984) reportan valores de absorción en harinas comerciales de 120 a 150 ml/100 g de harina.

Ciertamente el rendimiento observado (Fig. 18) por la HCOM fue mayor al generado por la HMNE, y esta variación puede ser atribuida al hecho de que actualmente en la industria de las harinas nixtamalizadas se adicionan gomas que mejoran la funcionalidad de dicho producto (Arámbula y col., 1999; Yau y col., 1994). Serna-Saldivar y col. (1990), mencionan que la goma más utilizada en la industria de harinas nixtamalizadas es la carboximetilcelulosa (CMC), debido a su

Tabla 13. Análisis de varianza, valor F, de la capacidad de absorción de agua subjetiva en la HMNE y HCOM.

		Valor de F
Fuente de Variación	GL	CAAS ¹
Tratamiento	2	1559.35 **
Error	6	
Total	8	

¹ CAAS= Capacidad de absorción de agua subjetiva.

** Altamente significativo a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

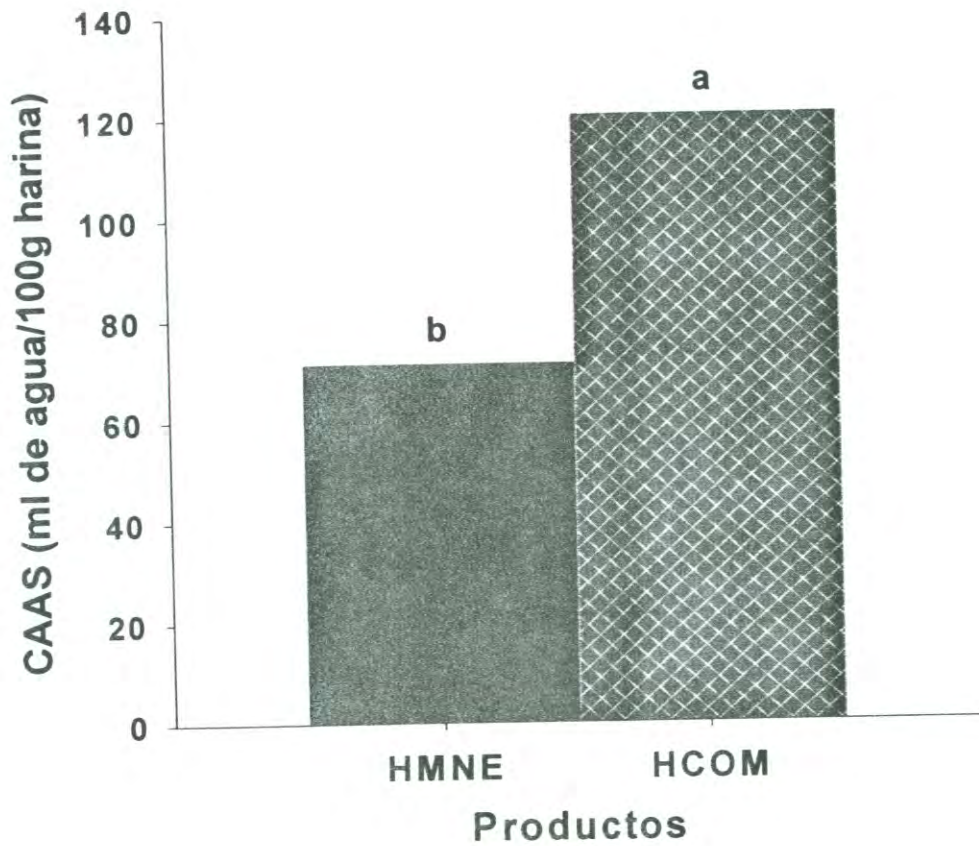


Figura 18. Capacidad de absorción de agua subjetiva de las harinas nixtamalizadas para la elaboración de tortillas de maíz.

Nota: medias con letras iguales no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

bajo costo, y por que uno de sus atributos es incrementar considerablemente la absorción de agua, y por ende el rendimiento de la harina.

Por otra parte García (1994), observo que la CAAS, el IAA e IMS dependen del contenido de almidón presente en el grano, así como de su grado de gelatinización y proporción de almidón dañado durante la elaboración de las harinas instantáneas. Arámbula y col. (1999), mencionan que el grado de gelatinización del almidón durante un proceso térmico cambia la habilidad de las harinas nixtamalizadas para absorber y retener agua. En el caso particular de las HMNE este autor comprobó que mediante la adición de gomas puede mejorarse la CAAS y también el grado de retención de la misma.

Índice de absorción de agua

El IAA esta íntimamente relacionado con el grado de gelatinización del almidón, ya que depende de la disponibilidad de los grupos hidrofílicos quienes ligan las moléculas de agua y facilitan la capacidad de las macromoléculas para formar gel (Gómez y Aguilera, 1983; Salay, 1995).

El ANDEVA (Tabla 14) para el IAA en las harinas, mostró que hubo diferencias estadísticamente significativas. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 15), el menor valor lo presentó el MM con 1.43 g agua/g de materia seca, en tanto que el mayor valor fue observado en la HCOM con 3.40 g agua/g de materia seca, valor que varia ligeramente al obtenido en la HMNE con 3.09 g agua/g de materia seca. Diferentes autores (Galicia-García, 2005; Campas-Baypoli, 1997; Martínez-Bustos, 1996; Gómez y Aguilera, 1983) muestran resultados similares a los observados en el maíz molido integral encontrando rangos de valores entre 1.62 a 1.97 g agua/g de materia seca.

Res. T. 972

Tabla 14. Análisis de varianza, valor F, del IAA e IMS del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Fuente de Variación	GL	Valor de F	
		IAA ¹	IMS ¹
Tratamiento	2	670.9 **	365.7 **
Error	6		
Total	8		

¹ IAA= Índice de Absorción de Agua; IMS= Índice de Material Soluble.

** Altamente significativas a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 15. Índice de absorción de agua del maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Producto ³	IAA (g agua/g de materia seca)	IMS (%)
MM	1.43 ¹ c ²	10.30 ¹ a ²
HMNE	3.09b	6.89b
HCOM	3.40a	4.28c
DMS	0.17	0.68

¹ Valores promedio de tres repeticiones y expresados en base seca.

² Medias con letras iguales, en la misma columna, no son estadísticamente diferentes a un nivel de $p = 0.05$ ($p > 0.05$).

³ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; DMS= Diferencia mínima significativa.

De igual forma Galicia-García (2005), reporta rangos de valores de IAA en la HMNE de 2.58 a 3.54 g agua/g de materia seca, en cuyo rango se encuentra el valor obtenido en el estudio realizado. Flores-Farias y col. (2002), reportan valores de IAA en harinas comerciales de 2.7 a 3.7 g agua/g de materia seca. En tanto que Bressani y col. (2001), reportan también en harinas comerciales un promedio de 3.7 g agua/g de materia seca. Las diferencias observadas de IAA entre los productos (MM y HMNE) puede ser atribuida a que el constituyente (gránulos de almidón) mayoritario del maíz en forma nativa tan solo puede absorber 0.4 veces su peso en agua, por lo que cuando este componente se ve modificado por efectos de una serie de operaciones que modifican su estructura interna, los grupos hidrofílicos de las moléculas de sus constituyentes quedan accesibles para ligar moléculas de agua, por lo que la capacidad de absorción de agua tiende a incrementarse a un cierto nivel límite. Dubai (2004), menciona que el almidón dañado puede absorber de 2 a 4 veces su peso en agua.

En el caso de las diferencias encontradas entre las harinas nixtamalizadas, en donde la harina comercial presenta un valor más alto de IAA, Álvarez-Rivas (1996), se lo atribuye al tipo de secado; secado tipo flash en el que la harina húmeda entra en contacto a contracorriente con el aire caliente, produciéndose un secado instantáneo, lo que favorece la expansión de la partícula de la harina, haciéndolas más porosas y con mayor capacidad de absorber agua.

Williams y col. (1977), al extrudir grits de maíz amarillo, indicaron que máximos valores de IAA se obtuvieron cuando el contenido de humedad fue de 27 % a 135 °C de temperatura. En tanto que varios autores (Galicia-García, 2005; Martínez-Bustos, 1996) mencionan que el IAA se ve favorecido durante el proceso de extrusión al incrementar la temperatura a un contenido de humedad de acondicionamiento baja y una velocidad del tornillo alta. Vargas-López y col. (1991), encontraron al extrudir sorgo y almidón de maíz, estos exhibieron un máximo de IAA al utilizar altas temperaturas de extrusión y altos contenidos de humedad.

Por otro lado, Ramírez-Wong y col. (1994), reportan que el tiempo de cocimiento y la molienda en el proceso tradicional de nixtamalización son parámetros que incrementan el IAA. En tanto que Campas-Baypoli (1997), reporta que el incremento de IAA es debido a las etapas de procesamiento durante la nixtamalización ya que conforme se avanzaba más en el procesamiento el IAA se ve incrementado paulatinamente (MM= 1.6, Nixtamal= 2.3, Masa= 2.6 y tortilla 3.6 g agua/ g de muestra seca).

Índice de material soluble

El proceso de extrusión provoca modificaciones importantes en los gránulos de almidón. Este tratamiento produce cambios estructurales internos significativos y, por lo tanto la absorción y solubilidad en agua fría se ven incrementados por dicho proceso (Dublier y col., 1986). El IMS ha sido estudiado por varios autores (Tang y Ding, 1994; Mason y Hosenev, 1986; Linko y col., 1981) para evaluar la cantidad y/o el grado de degradación que sufre el almidón, cuando más drástico es un proceso mayor será el IMS.

El ANDEVA (Tabla 14) para esta determinación en las harinas, mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre ellas. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 15), el MM fue el que presentó el mayor valor de IMS el cual fue de 10.3 %, seguido de la HMNE, en tanto que la HCOM presentó el menor (4.28 %). Resultados similares de IMS en el MM fueron observados por Galicia-García (2005) y Campas-Baypoli (1997) quienes reportan valores de 9.53 y 7.70 % respectivamente. En el caso de la HMNE el primer autor reporta un rango de valores de IMS de 4.91 a 6.8 %, en cuyo rango se encuentra el valor obtenido en el presente estudio. Por otra parte, comparando el valor de la HMNE con la HCOM, la primera generó 2.6 % más de material soluble. Flores-Farías y col. (2002), muestran rangos de IMS en harinas comerciales de 4 a 7.5 %.

Las diferencias observadas entre los productos analizados (paso de MM a HMNE), en donde el MM presenta un mayor porcentaje de ÍMS con respecto a la HMNE, puede ser debido a que en la molienda (tipo de molino utilizado) una proporción considerable de gránulos de almidón es fragmentado físicamente, lo que genera una mayor cantidad de material soluble en el medio, este efecto fue reportado por Gómez y col. (1990), quienes observaron que la mayor cantidad de componentes solubles del almidón (amilosa y amilopectina) fueron obtenidos en la harina integral de maíz, a diferencia de la cantidad observada en la masa por el proceso tradicional de nixtamalización. De acuerdo a Martínez-Bustos y col. (1996), la molienda en seco es una causa importante en el tamaño de partícula medio, daño a el almidón, transferencia de calor, difusión del agua y la cal durante el proceso de extrusión.

Un hecho que es interesante apreciar, es que las harina nixtamalizada muestran valores de ÍMS mayores (HMNE= 6.8 %) a los obtenidos por el proceso tradicional de nixtamalización (Nixtamal= 2.64 % y Masa= 3.84 %) (Campas-Baypoli, 1997), etapas que pueden compararse con la HMNE, ya que es la etapa previa para la elaboración de la tortilla. En el proceso tradicional de nixtamalización diferentes autores (Campas-Baypoli, 1997; Gómez y col., 1992; Gómez y col., 1990; Ramírez-Wong y col., 1994) mencionan que la molienda, el tiempo de cocción del nixtamal y en general, cada una de las etapas de procesamiento incrementan el ÍMS.

Contenido de almidón

El almidón es el componente mayoritario del maíz, y es el que determina esencialmente las propiedades funcionales (texturales, apariencia y consistencia) de los productos elaborados a base de este cereal (Robles, 1986). De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 16), el MM presentó el valor más bajo de almidón con 62.5 %, cuando esta misma materia prima se procesó (HMNE) se

Tabla 16. Contenido de almidón en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Producto ³	Contenido de almidón (%)	DE ²
MM	62.50 ¹	3.10
HMNE	66.90	1.20
THMNE	65.60	2.10
HCOM	71.60	2.70
THCOM	71.20	2.20

¹ Valores obtenidos de tres repeticiones expresados en base seca.

² DE= Desviación Estándar.

³ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; THMNE= Tortilla de harina nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THCOM= Tortilla de harina nixtamalizada comercial.

observó un ligero incremento con un valor de 66.9 %, porcentaje que fue muy similar al que presentó la THMNE (65.6 %). Con base a los resultados anteriores, no se observó pérdida aparente de este componente debido al proceso de extrusión.

El contenido de almidón observado en el MM (MCP) en este trabajo, fue 10 unidades de porcentaje menor, respecto al porcentaje que reportan diferentes autores (Enríquez-Ramos, 2004; Campas-Baypoli, 1997; Gómez y col., 1991; Bourne, 1989; Watson y Ramstad, 1987) en maíz dentado común, quienes observaron intervalos de este componente de 70 a 75 %. Por otra lado, el mayor contenido de almidón fue observado en los productos comerciales (HCOM y THCOM), con 71.6 y 71.2 %, respectivamente, lo que era factible esperarse ya que este componente varía genéticamente de acuerdo al genotipo (Glicksman, 1969). Flores-Farias y col. (2002) y Alvarez-Rivas (1996), reportan rangos de valores similares al obtenido en la harina de maíz nixtamalizada comercial (67- 69 %).

En lo que respecta al ligero incremento de contenido de almidón observado en la HMNE y la THMNE con respecto al MM, valores semejantes fueron observados por Gómez-Aldapa y col. (1996), al estudiar los cambios en algunos componentes químicos y nutricionales durante la preparación de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas por extrusión. De acuerdo a Zambrano y Gallardo (1998), esta disminución puede ser debido a que algunos constituyentes de la fibra pueden ser modificados debido a las condiciones de procesamiento en la extrusión tales como: temperaturas elevadas, altas presiones y sizallamiento.

De acuerdo con Holm y col. (1986), el contenido de almidón determinado mediante una digestión con α -amilasa y glucoamilasa no es afectado por la cocción por extrusión (Silgeström y col., 1986), resultados similares fueron reportados por otros autores (Mercier y Feillet, 1975; Björk y col., 1984). Por otra parte, Serna-Saldivar y col. (1988), reportaron un incremento relativo en el

contenido de almidón del orden de 9 % en la tortilla, con respecto al contenido en el grano, cuando se utilizó el proceso tradicional de nixtamalización. Este incremento se lo atribuyeron a la reducción de fibra que se que se produce durante el proceso nixtamalización tradicional.

En las tortillas de ambas harinas, no se observaron cambios considerables en el valor de contenido de almidón con respecto a las harinas nixtamalizadas. Resultados similares fueron observados por Gómez y col. (1991), en harinas nixtamalizadas comerciales y Campas-Baypoli (1997) en el proceso tradicional de nixtamalización.

Contenido de amilosa aparente

El ANDEVA (Tabla 17) para el contenido de amilosa aparente en los productos del proceso, fue altamente significativo ($p \leq 0.01$). La diferencia estadística observada fue que el contenido de amilosa disminuyó con forme se avanzó en la etapa de procesamiento para la obtención de las tortillas.

Los resultados obtenidos en esta determinación se muestran en la Fig. 19. En donde se observa que el MM presentó el mayor valor aparente de este polímero con 24.1 %, porcentaje que se encuentra dentro de la clasificación de almidones normales (Moore y col., 1984). Por otra parte, la THMNE fue la que tuvo el menor valor con 18.1 %. En tanto que las harinas nixtamalizadas no mostraron diferencias ($p \leq 0.001$) significativas con valores de 20.2 % en la HMNE y de 21.5 % para HCOM. De igual forma, el contenido de amilosa aparente de la THCOM no mostró diferencia ($p \leq 0.001$) significativa con la HMNE.

La variabilidad del contenido de amilosa en el maíz es muy diversa, tal como lo reportan la literatura (Enríquez-Ramos, 2004; Bello-Perez y col., 1998; Campas-Baypoli, 1997; Zobel, 1988; Lineback, 1984; Glicksman, 1969) quien

Tabla 17. Análisis de varianza, valor F, del contenido de amilosa en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

		Valor de F
Fuente de Variación	GL	CAM ¹
Tratamiento	4	49.7**
Error	10	
Total	14	

¹ CAM= Contenido de Amilosa Aparente (%).

** Altamente significativo a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

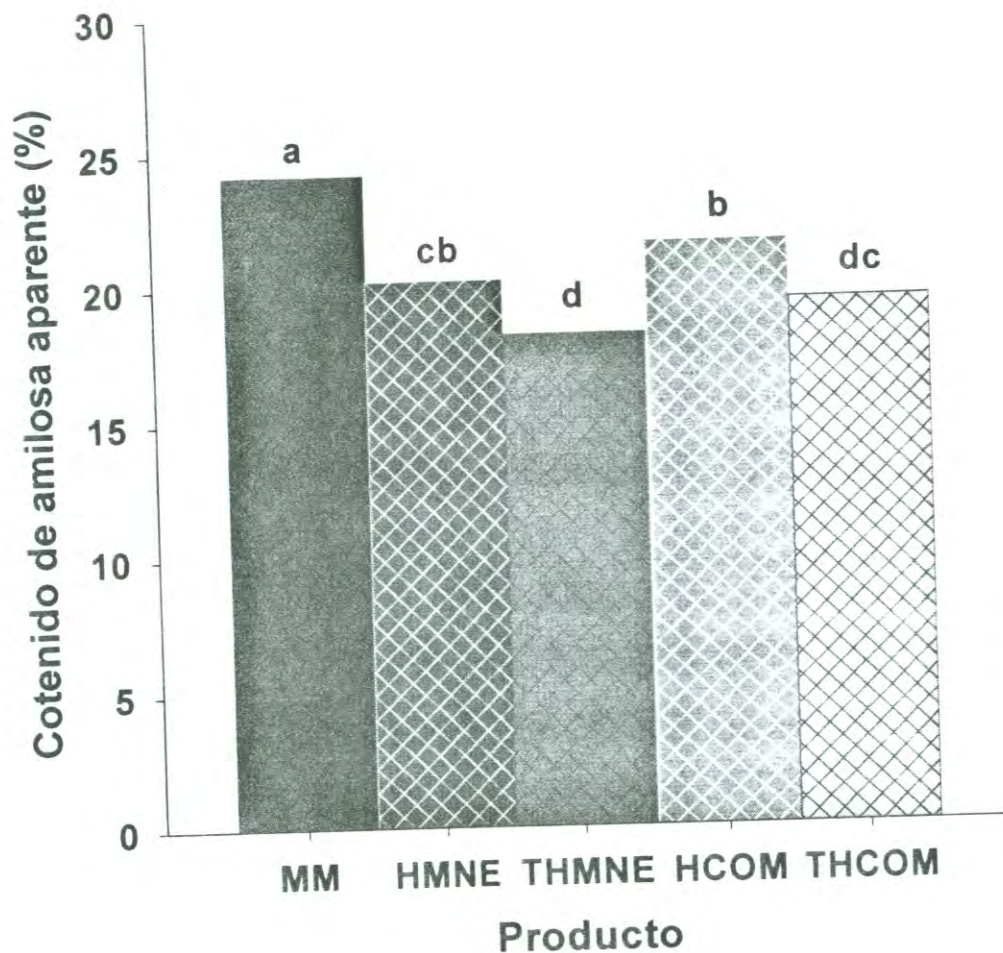


Figura 19. Contenido de amilosa aparente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Nota: medias con letras iguales no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

reporta intervalos de contenido de este polímero de 20 hasta un 29 % en el almidón de maíz, intervalos en el cual se encuentra el valor obtenido en el presente estudio.

Paralelamente la variabilidad en el contenido de amilosa aparente en harinas comerciales son evidentes por los intervalos que reportan diferentes autores (Flores- Farias, 2002; Álvarez-Rivas, 1996; Knutzon, 1986), los cuales oscilan entre 23.8 y 31 %. Los valores obtenidos para la HCOM y la HMNE difieren ligeramente del valor mínimo reportado. Las causas pueden ser diversas tales como la metodología utilizada para dicha determinación, el genotipo de maíz utilizado y el tipo de procesamiento utilizado para realizar la nixtamalización (Enríquez-Ramos, 2004).

Con respecto a la disminución del contenido de amilosa aparente en la etapa de MM a HMNE y por último a THMNE, este efecto puede atribuirse, a que la zona interior hidrófoba (lipófila) de la forma helicoidal de la amilosa es altamente reactiva, capaz de formar complejos con porciones lineales hidrófobas de moléculas que se ajusten a las dimensiones del tubo hidrofóbico de la espiral de la amilosa, lo que traería como consecuencia una disminución del complejo colorido con el yodo (compuesto que se emplea para realizar esta determinación) (Fennema, 1991).

Por otra parte Rooney y Suhendro (1999), mencionan que en la etapa de secado de las harinas nixtamalizadas, una proporción de almidón es retrogradado, y de acuerdo con Eliasson (1985) este efecto disminuye la formación del complejo colorido con el yodo. Esto pudo ser posible en el presente estudio ya que después de extruir la harina los extrudidos obtenidos fueron secados.

Microscopía óptica

La microscopía realizada, utilizando rojo congo para distinguir algunos cambios en la estructura física del almidón, en cada etapa del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada por extrusión, se muestra en las Fig. 20 y 21.

En la Fig. 20 (A y A'), se puede observar como los gránulos de almidón en el maíz son de forma irregular esto es: unos son esféricos, poliédricos y en forma de diente (Lineback, 1984), pero no sólo eso, ya que la distribución en sus tamaños también son distintos variando de 5 a 25 μm (Glicksman, 1969), dicha distribución tan heterogénea en tamaño y forma pudieran afectar de manera importante el grado de cocción de la harina nixtamalizada por extrusión.

Modificaciones en la estructura de los gránulos de almidón se hicieron evidentes (Fig. 20 "A-A' ") en la primera etapa del procesamiento (molienda), esto se pudo comprobar por la tinción en color rojo intenso de aquellos gránulos que sufrieron cierta modificación. De acuerdo con Viot (1992), según el tipo de molino utilizado, en el proceso de molienda se daña alrededor del 5 al 12 % del almidón, y que de cierta forma está pudo influir en el valor alto de ÍMS obtenido en esta etapa. También se observó que una gran cantidad de gránulos de almidón exhiben birrefringencia, ya que cada gránulo íntegro muestra una clara cruz de malta bajo el campo de luz polarizada que se muestra en al Fig. 20 (A'). Sin embargo, al pasar a la etapa de la HMNE, gran parte de los gránulos íntegros observados en la etapa anterior disminuyó debido al efecto del procesamiento (extrusión), generando gránulos parcialmente gelatinizados y sobregelatinizados, lo que es denotado por los trozos de almidón hinchados amorfos teñidos de color rojo, los que se diferencian muy bien de los gránulos que muestran la cruz de malta bajo la luz polarizada.

Por otra parte, se observaron claras diferencias entre los campos observados en la HMNE y la HCOM (Fig. 20 "B y C" respectivamente), ya que la

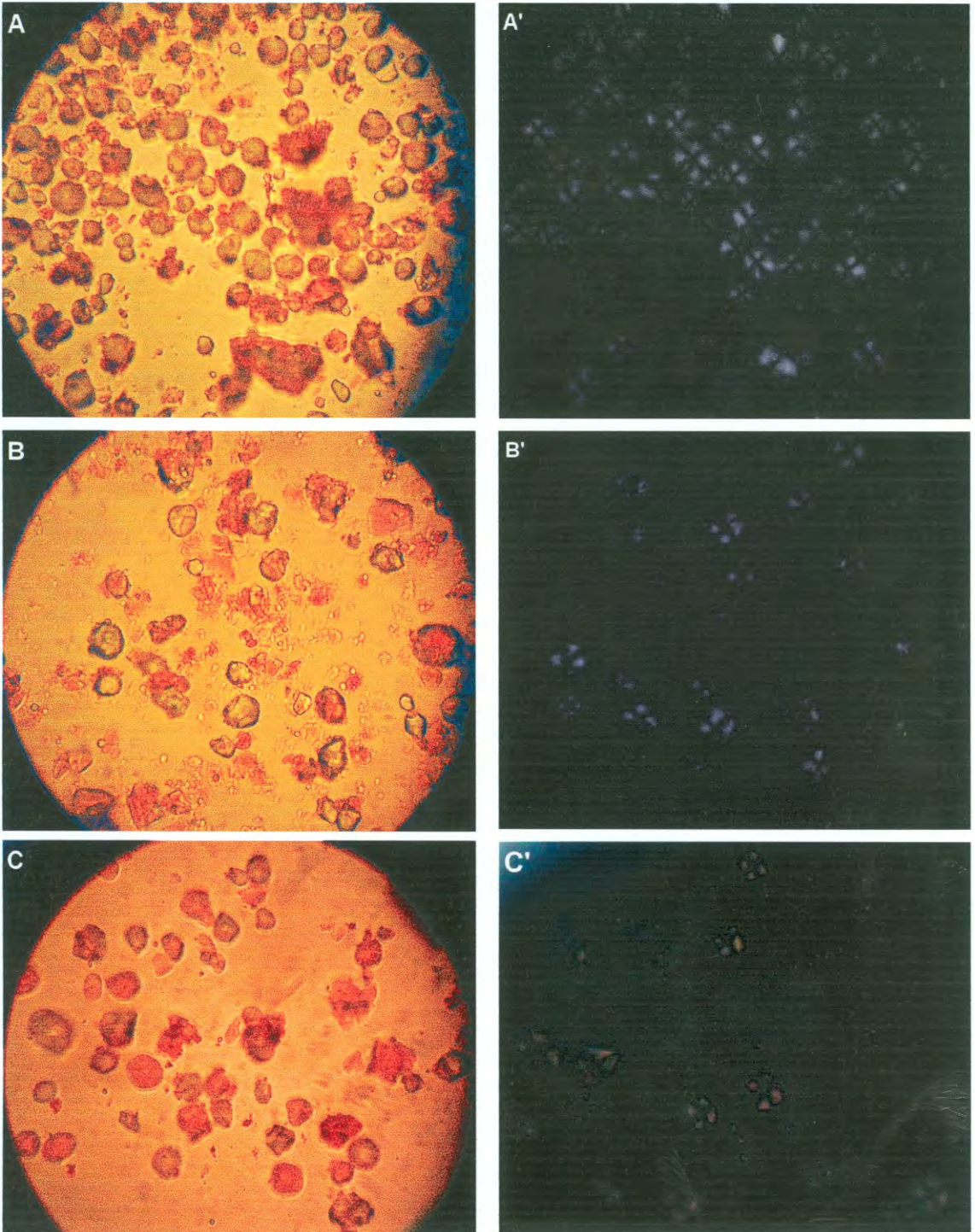


Figura 20. Microfotografía de pérdida de birrefringencia en muestras de harina de maíz: A y A', maíz molido; B y B', harina de maíz nixtamalizada extrudida; C y C', harina de maíz nixtamalizada comercial. A-C, vistas con luz normal; A'-C', luz polarizada con una magnificación de 40x.

primera exhibe una mayor proporción de gránulos parcialmente gelatinizados y en menor grado sobregelatinizados, los segundos no muestran forma definida, en tanto que los gránulos de la HCOM, si bien están parcialmente gelatinizados, ya que se tiñeron de color rojo, muestran de cierta manera una forma definida lo que demuestra que no se ha llevado a cabo completamente la gelatinización en estos gránulos de almidón. Por otro lado, la cruz de malta que exhiben ambas harinas (Fig. 20 "B' y C' ") parece estar mejor definida en los gránulos de la HMNE, a diferencia de la HCOM, esto pudiera ser atribuida a que la cocción fue más homogénea en la HCOM, mostrado por la tinción con rojo congo de las de los gránulos que fueron parcialmente gelatinizados, debido a este efecto pierden su birrefringencia, lo que dificultó su localización bajo la luz polarizada.

En la etapa de cocción, tanto la THMNE como la THCOM muestran una gelatinización casi total del almidón (Fig. 21 "D y E"), sin embargo, aún se siguen mostrando gránulos de almidón aislados. Aquí también se pudo observar que de las tortilla analizadas, la HMNE fue la que se mostró con una mayor facilidad para encontrar gránulos íntegros que presentaron birrefringencia bajo la luz polarizada (Fig. 21 "D' y E' ") a diferencia de la HCOM.

Gómez y col. (1991 y 1992), reportan observaciones similares a las encontradas en el MM y la HCOM, quienes mencionan que los gránulos de almidón de maíz crudo exhibían birrefringencia, y que el decrecimiento de la misma es debido a la etapa de procesamiento, ya que disminuye paulatinamente en cada etapa.

Estudios (Enríquez-Ramos, 2004; Campas-Baypoli, 1997; Gómez y col., 1992) similares pero realizados en el proceso tradicional de nixtamalización y en almidón extraído en el mismo procesamiento, muestran claras diferencias al estudio realizado, ya que los tratamientos debidos al procesamiento difieren sobre todo en las etapas de nixtamal y la molienda del mismo tratamientos que no incluye el proceso tradicional, bajo estas condiciones los gránulos observaron birrefringencia difusa, además se observaron grupos de gránulos aglomerados.

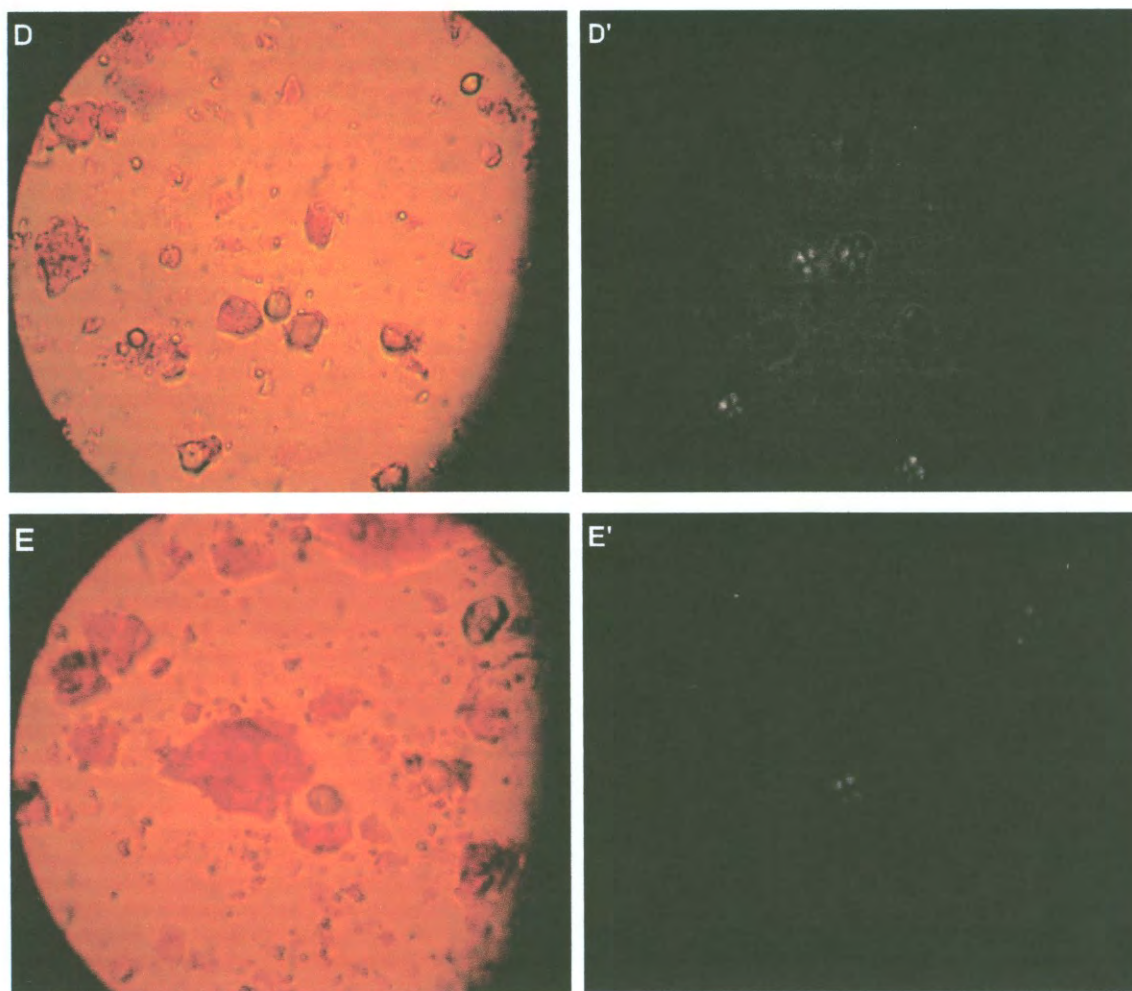


Figura 21. Microfotografía de pérdida de birrefringencia en muestras de tortillas de harina de maíz nixtamalizada por extrusión; D y D', tortilla de harina de maíz nixtamalizada comercial; E y E'. D y E, vistas con luz normal; D' y E', luz polarizada con una magnificación de 40x.

Sin embargo, en el caso de la tortilla reportan observaciones similares a las obtenidas en el presente estudio, ya que se perdió casi la totalidad de la birrefringencia, donde no se observaron gránulos de almidón definidos.

Microscopía electrónica de barrido

Diferencias importantes, en cuanto a cambios en la geometría de los gránulos de almidón fueron observadas en cada uno de los productos analizados por la MEB (Figs. 22 y 23). En la Fig. 22 ("A1-2"), correspondiente al MM, se puede observar la estructura de los gránulos de almidón característicos en maíz (redonda y poliédrica), también se puede observar como la molienda generó trozos de endospermo en donde se encuentra una cantidad considerable de gránulos incrustados en una matriz, y algunos gránulos libres dispersos. Sin embargo, al pasar a la etapa siguiente (HMNE) (Fig. 22 "B1-2"), el tamaño y forma de los gránulos ya no fue tan definida, lo que pudo ser debido al hinchamiento de los gránulos por la gelatinización parcial debido a las condiciones de procesamiento. En esta etapa también se pudieron observar claras agregaciones entre los gránulos pregelatinizados y sobregelatinizados, formando estructuras amorfas de diferentes tamaños y formas. En el caso de la HCOM (Fig. 22 "C1-2") las asociaciones entre los gránulos debido al proceso de gelatinización son muy diferentes a las observadas en la HMNE, ya que la diversidad de formas no son tan marcadas como en esta última. En la HCOM los gránulos aunque hinchados por una gelatinización parcial presentan una estructura definida, principal característica que la diferencia de la HMNE.

Por otra parte, estructuras continuas (aglomerados) amorfas fueron observadas tanto en la THMNE y la THCOM (Fig. 23 "D1-2 y E1-2"), estas estructuras fueron generadas tal vez por la fusión de los gránulos de almidón causadas por las temperaturas de calentamiento (270-290 °C) debido a la cocción de la tortilla, por lo que la falta de gránulos de almidón definidos demuestran que en esta etapa se da casi totalmente la gelatinización, y se puede mencionar que

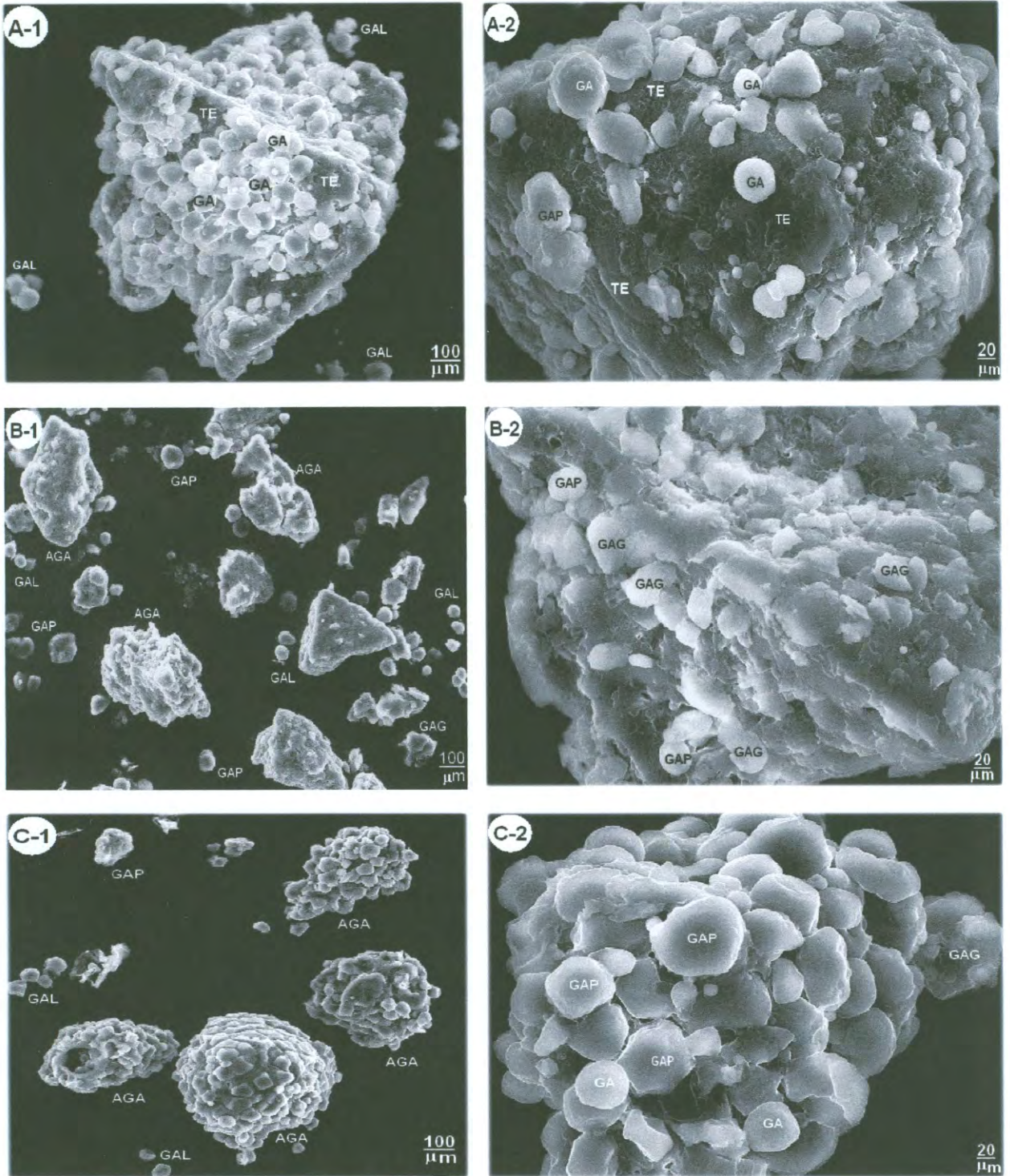


Figura 22. Microfotografía electrónica de barrido (MEB) del MM (A-1,2), HMNE (B-1,2) y HCOM (C-1,2). TE= Trozo de Endospermo, AGA= Agregados de Gránulos de Almidón; GA, GAL, GAP, GAG= Gránulo de Almidón, Libre, Parcialmente gelatinizado y Gelatinizado.

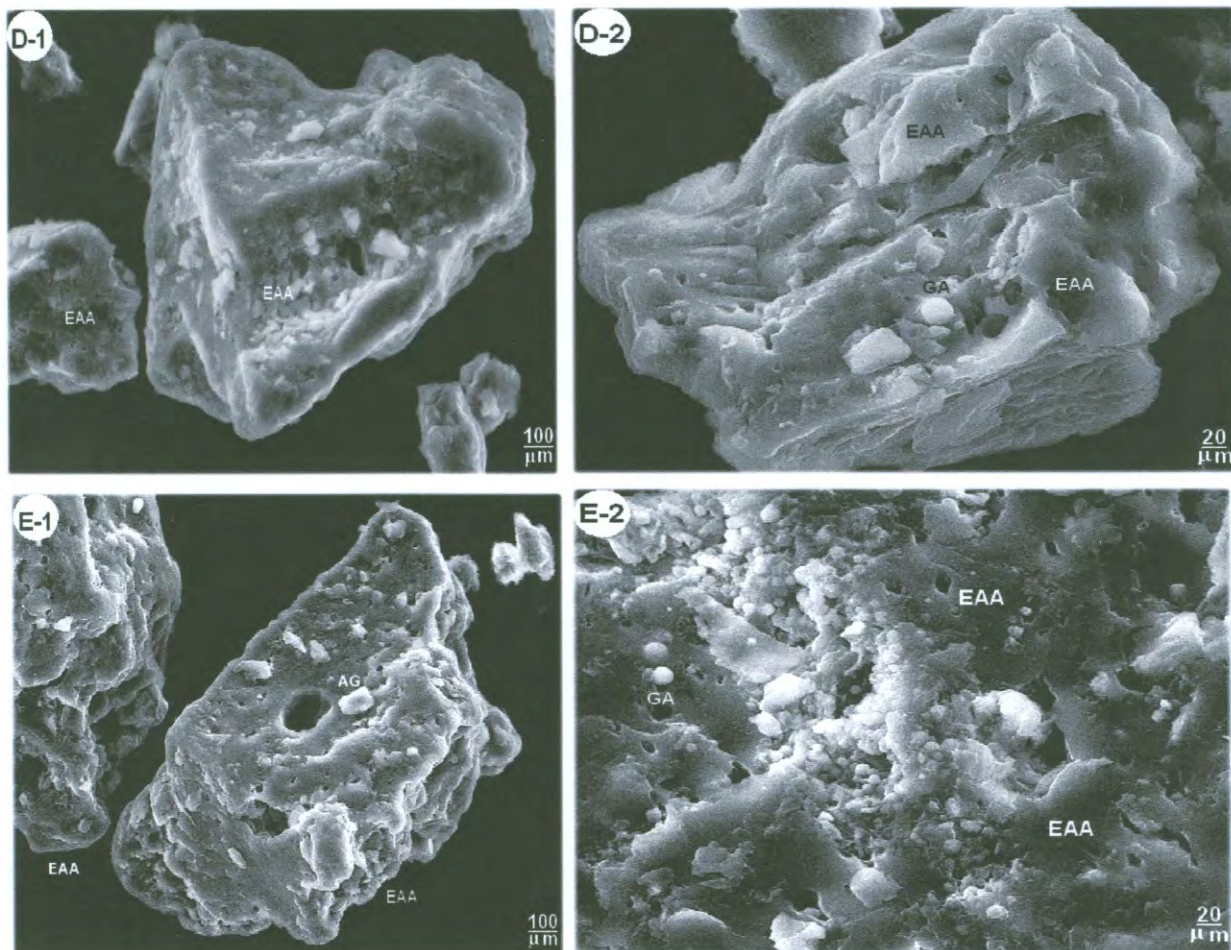


Figura 23. MEB de la THMNE (D-1,2) y THCOM (E-1,2). EAA= Estructura de Almidón Amorfa, GA = Gránulo de Almidón.

no es completa, ya que se observan algunos gránulos de almidón incrustados en las aglomeraciones, y también como lo demostró la microscopía óptica realizada existen algunos gránulos de almidón integros.

Temperatura de gelatinización

El ANDEVA (Tabla 18) para la temperatura inicial y final de gelatinización (metodo Kofler hot-stage) en las harinas analizadas, no fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$) para ambas determinaciones, por tanto los valores promedio no presentaron diferencias significativas.

La tendencia de los valores obtenidos (Tabla 19) no mostraron diferencias apreciables diferencias entre productos, sobre todo entre el MM y la HMNE que son etapas prácticamente diferentes. El MM presentó valores de temperatura inicial $T_i = 59$ y final de $T_f = 73$ °C, en tanto que la HMNE presentó valores de $T_i = 58.4$ y $T_f = 74.6$ °C, la pequeña diferencia observada entre las temperaturas finales del MM y la HMNE puede ser debido a que el proceso de cocción alcalina retarda la gelatinización de los gránulos de almidón debido a las interacciones que se presentan con el ión Ca^{2+} (amilosa-calcio y amilopectina-calcio), interacciones que inhiben la absorción del agua al interior del gránulo (Vázquez, 1978; Trejo-González y col., 1982).

La HCOM presentó valores prácticamente similares a la HMNE. Lineback (1984) y Glicksman (1969), reportan intervalos de valores de temperatura de gelatinización inicial y final entre los 62 a 72 °C en almidón de maíz utilizando el método con la placa Kofler Hot Stage. En tanto que Kuhn y Schlauch (1994), reportan una temperatura de gelatinización para el maíz de 67 °C. Por otro lado, Benctel (1983), utilizando calorimetría de barrido diferencial obtuvo un valor de gelatinización en almidón de maíz de 64 °C. Sin embargo, en la THMNE y la THCOM no se realizó esta prueba debido a que se encontraron pocos gránulos, lo cual dificulta su apreciación en el microscopio.

Tabla 18. Análisis de varianza, valor F, de la temperatura inicial y final de gelatinización en el maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial.

Fuente de Variación	GL	Valor de F	
		T _i ¹	T _f ¹
Tipo de Harina	2	0.59NS	3.57NS
Error	6		
Total	8		

¹ T_i= Temperatura inicial; T_f= Temperatura final.

NS= No significativas a un nivel de p= 0.05 (p>0.05).

Tabla 19. Valores de la temperatura de gelatinización en maíz molido integral, harina de maíz nixtamalizada extrudida y harina de maíz nixtamalizada comercial obtenidas con la placa Kofler.

Producto ⁴	T _i ¹	T _f ¹
MM	59.0 ² a ³	73.0 ² b ³
HMNE	58.4a	74.6b
HCOM	58.3a	74.0b

¹ T_i = Temperatura inicial; T_f = Temperatura final.

² Valores promedio de cuatro repeticiones.

³ Medias con letras iguales, en la misma columna, no presentan diferencias significativas (p>0.05).

⁴ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial.

Observando los resultados antes descritos en el presente estudio existen ciertas diferencias a los reportados por la literatura, y de acuerdo con Lineback (1984), la temperatura de gelatinización del almidón varía dependiendo sobre todo de su origen botánico.

Calorimetría de barrido diferencial

Esta técnica ayuda a detectar los cambios de flujo asociados con la fusión de materiales poliméricos (Reid y col., 1993), resultado del fenómeno orden-desorden de las zonas cristalinas que forman las moléculas de amilopectina (Biliaderis, 1990).

La HMNE presentó una ligera disminución en la temperatura de inicio y pico de gelatinización con respecto a los valores observados en el MM (Tabla 20). Sin embargo, ya en la THMNE, esta diferencia tendió a ser importante con respecto a los dos productos anteriores, ya que disminuyó en aproximadamente 10 °C. Resultados diferentes a los obtenidos en T_o y T_p , en el MM (Tabla 17) son reportados por varios autores (Enríquez-Ramos, 2004; Campas-Baypoli, 1997; Ziegler y col., 1993; Robles y col., 1988) quienes reportan valores de 65.6, 66.2, 65.8, 64.1 °C en T_o y 73.5, 69.6, 70.4, 70.3 en T_p , respectivamente.

Por otro lado, Mondragón y col. (2004), reportan resultados similares a los observados en este estudio, con valores de 70.9 °C en T_o y 76.2 °C en la T_p . Diversas son las causas que intervienen para que las temperaturas de gelatinización puedan variar, Krueger y col. (1987b), demostraron que contenidos altos de amilopectina en el almidón, acortan los rangos de temperatura de gelatinización. En tanto que Kanutson y col. (1982), observaron que una disminución en el tamaño de los gránulos incrementa el rango de temperaturas, y la entalpía de gelatinización del almidón. Adicionalmente Whistler y James (1985), mencionan que la presencia de sustancias como azúcares, proteínas, grasas, ácidos y el agua también afectan la temperatura de gelatinización del almidón.

Tabla 20. Propiedades térmicas¹ de los productos del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Productos ²	T_o^1 (°C)	T_p^1 (°C)	ΔH^1 (J/g)
MM	70.7	76.6	-6.87
HMNE	70.4	75.1	-1.12
HCOM	66.1	72.9	-1.83
THMNE	60.6	60.9	-0.03
THCOM	64.7	65.9	-0.01

¹ T_o = Temperatura de inicio de gelatinización; T_p = Temperatura pico de gelatinización; ΔT = Entalpía de gelatinización.

² MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Por otro lado, la HMNE y la HCOM, también mostraron una diferencia importante en ambas temperaturas, siendo mayor los valores generados por la HMNE ($T_o = 70.4\text{ }^\circ\text{C}$ y $T_p = 75\text{ }^\circ\text{C}$), en tanto que la HCOM presentó valores de $66.1\text{ }^\circ\text{C}$ en T_o y $72.9\text{ }^\circ\text{C}$ en T_p .

Por los resultados observados en las temperaturas de gelatinización (T_o y T_p) entre el MM y la HMNE, y tomando como referencia el proceso de nixtamalización tradicional, debido a que no hay estudios con este tipo de antecedentes en la HMNE, diversos autores reportan (Mondragón y col., 2004; Toro-Vazquez y Gómez-Aldapa., 2001; Campas-Baypoli, 1997) que las temperaturas de gelatinización tienden a incrementarse cuando se pasa del producto maíz a maíz nixtamalizado y posteriormente a masa. Esta tendencia mencionan que pudo deberse a que durante el periodo de reposo del grano cocido (nixtamal), se forman estructuras más ordenadas en el almidón debido a una recristalización del mismo, a este fenómeno se le conoce como annealing, el cual se presenta cuando se calienta el almidón en exceso de agua a temperaturas menores que las de gelatinización y un posterior periodo de incubación (Krueger y col., 1987; Jacobs y col., 1995).

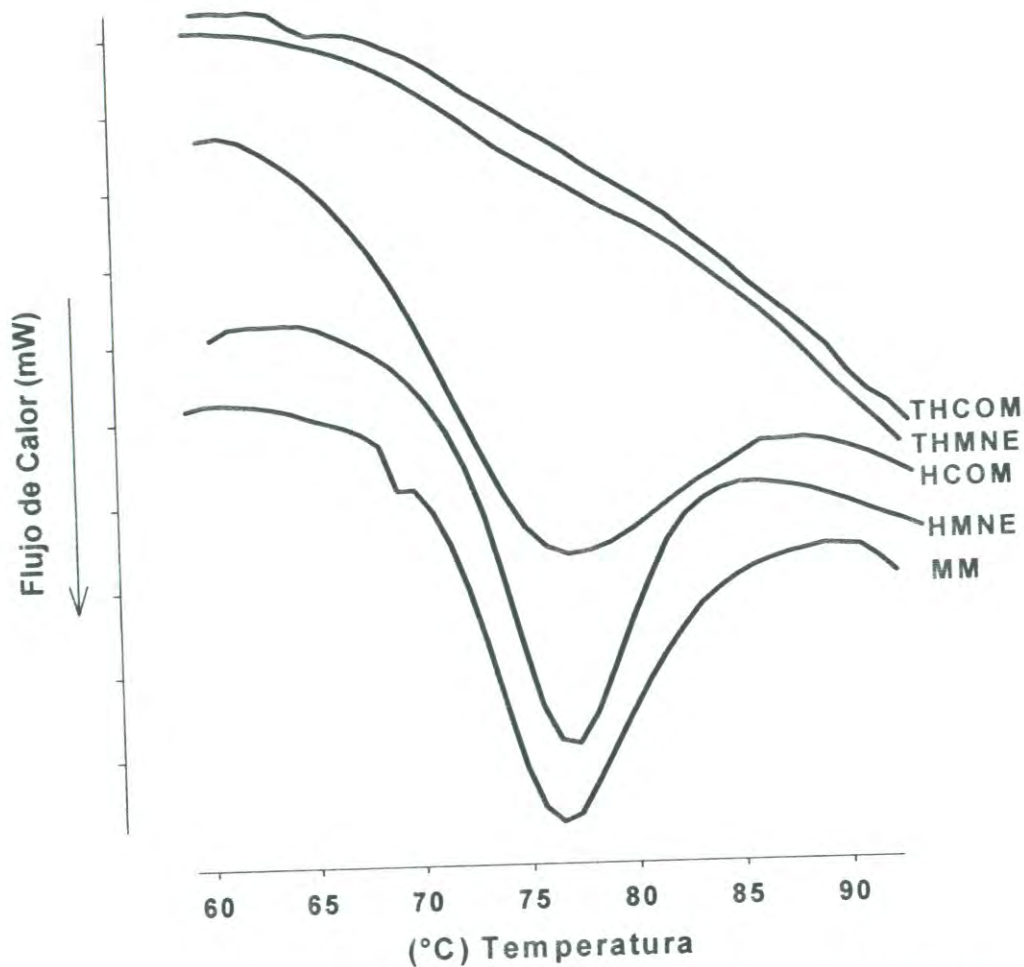
Adicionalmente, también se menciona (Gough y Pybus, 1973) que los iones Ca^{2+} retardan la gelatinización del almidón, ya que éste reacciona con la superficie del gránulo, evitando que se hinche retardando el suministro de agua al interior del gránulo. De igual forma Bryant y Hamaker (1997), reportan que el poder de hinchamiento, solubilidad y el grado de gelatinización se incrementan con bajos niveles de cal ($<0.2\text{ w/v}$) y decrece con el incremento en la concentración de la misma.

Por los estudios antes citados en el proceso tradicional de nixtamalización, se puede inferir que el fenómeno de annealing y la posible influencia de la cal (Ca^{2+}), no generaron un efecto parecido en la HMNE, lo que pudo deberse a la diferencia de tratamientos durante el procesamiento en ambos métodos.

En lo que respecta al producto final (TMNE y la THCOM), ambas tortillas mostraron valores en la temperatura de gelatinización diferentes, generando el valor más alto la THCOM en ambas temperaturas. Una observación relevante en los valores de esta etapa es que prácticamente la temperatura de inicio y pico de gelatinización fueron similares, lo que demuestra que el almidón está casi completamente gelatinizado. Razón por la cual muestran claras diferencias con respecto a los otros productos analizados (MM, HMNE y HCOM). Campas-Baypoli (1997), menciona que en el caso de la tortilla la mayor parte del almidón ya gelatinizó, por lo que la transición en este caso se debe a la disociación de la amilopectina retrogradada durante el enfriamiento.

Continuando con las propiedades térmicas, se observaron tendencias diferentes en los valores de las entalpías de gelatinización para los tres productos analizados, estos valores se muestran en la Tabla 20, y son representados en los endotermas de la Fig. 24. El comportamiento de la entalpía coincide con el grado de procesamiento al que fue sometido el producto en cada etapa, esto es, conforme se va avanzando en las etapas de procesamiento (incremento de las modificaciones estructurales a los diferentes componentes del grano principalmente en el almidón como componente mayoritario) la entalpía de gelatinización va disminuyendo paulatinamente, hasta llegar a un punto en donde las curvas son prácticamente lineales, y paralelas entre sí, como en el caso de la TMNE y la THCOM.

Cooke y Gidley (1992), sugieren que la entalpía de gelatinización resulta más de la pérdida de la doble hélice que por la pérdida de cristalinidad. En tanto que Ziegler y col. (1993), mencionan que es posible que la pérdida de la estructura cristalina puede estar asociada con la etapa inicial de hinchamiento del gránulo, y que la pérdida del carácter de la doble hélice está asociada con las últimas etapas del hinchamiento del mismo.



MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial;
 THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Figura 24. Termogramas obtenidos de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Según los valores obtenidos, muestran que la entalpía de gelatinización más alta correspondió para el MM con 6.87 J/g, en tanto que el valor menor fue para las dos tortillas (THMNE y THCOM) con 0.03 y 0.01 J/g, respectivamente. Por otra parte, las harinas nixtamalizadas (HMNE y HCOM) mostraron ligeras diferencias en el valor obtenido, necesitando mayor calor de fusión la HCOM. Bello- Perez y col. (2002), reportan valores de entalpía de gelatinización en harinas comerciales mayores a los observadas en el presente estudio (2.3 J/g en MASECA y 3.9 en MINSA).

Por otro lado, la diferencia observada entre los valores de ΔH en la HMNE y la HCOM, pudiera ser debido, a que por las condiciones de procesamiento, durante el proceso de extrusión se generó una mayor cantidad de almidón pregelatinizado y gelatinizado, en comparación con el proceso industrial, lo que propicio que exista una menor cantidad de gránulos de almidón que demanden energía para que se lleve a cabo la gelatinización. Tendencias similares en la disminución de la ΔH por efecto del procesamiento, fueron observados por Enriquez-Ramos (2004), en almidón extraído de los productos del proceso tradicional de nixtamalización, reportando los valores siguientes maíz, nixtamal, masa y tortilla 12.4, 11, 9.8 y 0.28 J/g, respectivamente.

De igual forma Robles y col. (1988), reportan valores de 14.4 J/g en maíz y 13.2 J/g en nixtamal, donde también se encontró una disminución en la entalpía debido a las condiciones de procesamiento. Por otra parte Mondragón y col. (2004), al evaluar el efecto del tiempo de cocimiento y la concentración de cal durante la nixtamalización del maíz, observaron que el tiempo de cocimiento afectó significativamente la CBD, ya que cuando este se incrementó las entalpías de gelatinización disminuyeron.

Viscosidad amilográfica

El hinchamiento de los gránulos y su consecuente desintegración bajo calentamiento prolongado conducen a cambios significativos en la viscosidad y otras propiedades reológicas de la pasta, que son características del tipo de almidón y el tipo procesamiento utilizado (Rasper, 1980). Con el analizador de viscosidad rápido (RVA) se determinó la temperatura de gelatinización y viscosidad máxima de los productos estudiados.

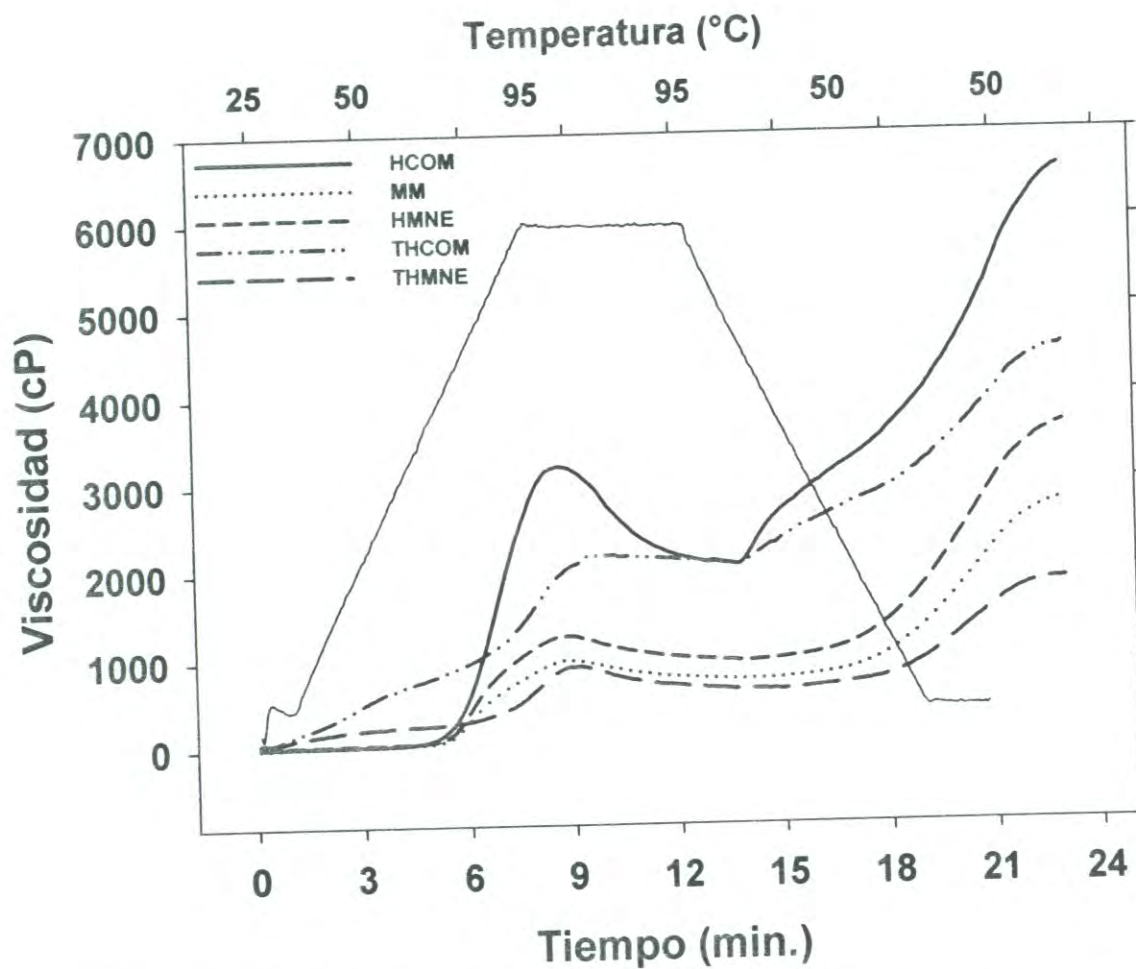
Los valores (Tabla 21) obtenidos de temperatura de gelatinización utilizando el RVA tuvieron un comportamiento similar a los obtenidos con el CBD, esto sobre todo en relación con las tres harinas (MM, HMNE y HCOM). Este comportamiento se mostró de la siguiente manera: entre el MM y la HMNE la temperatura disminuyó ligeramente, entre la HMNE y la HCOM fue ligeramente mayor en la primera, y entre la THMNE y la THCOM fue también similar, pero disminuyó enormemente con respecto a los productos anteriores. En el MM Arámbula y col. (1998), reportan una temperatura de gelatinización empleando el RVA de 73 °C muy semejante al obtenido en el presente estudio el cual fue de 74.7 °C, en tanto que, Mistry y Eckhof (1992), observaron ligeras diferencias al obtenido siendo de 71 °C.

Por otra parte, la tendencia en los picos de viscosidad generados por el incremento del volumen en los gránulos de almidón se mostró diferente para todos los productos analizados (Fig. 25). Como se puede observar en la Tabla 22, la diferencia entre los valores de viscosidad de la HCOM y la THCOM con respecto a la HMNE y la THMNE fue considerable. Y esto se constata con los valores de viscosidad máxima a 95 °C obtenidos por dichos productos, los cuales fueron de 3618 y 2158 cP, respectivamente, seguidos en orden descendente por la HMNE y el MM, en tanto que la THMNE fue la que generó la menor viscosidad, siendo 926.5 cP.

Tabla 21. Valores de temperatura de gelatinización obtenidos con el analizador de viscosidad rápido en los productos analizados del proceso para la elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Producto ¹	Temperatura de gelatinización (°C)
MM	74.7
HMNE	73.7
HCOM	71.9
THMNE	51.0
THCOM	50.4

¹ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.



MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial;
 THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Figura 25. Viscosidades amilográficas de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Tabla 22. Valores de viscosidad máxima, obtenidos con el viscoamilógrafo rápido de los productos del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Producto ¹	Pico máximo de viscosidad (cP)
MM	985
HMNE	1264
HCOM	3618
THMNE	926.5
THCOM	2158

¹ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

En el caso particular del MM, se podría esperar que este producto generara un pico de viscosidad relativamente más alto al observado, ya que la mayor parte de los gránulos de almidón se encuentran estructuralmente íntegros, lo que fue comprobado por la microscopia óptica realizada ha dicho producto en el presente estudio. Diversos autores (Campas-Baipoly, 1997; García, 1994; Gómez, 1992) reportan tendencias similares a los valores observados, este efecto se a observado en variedades distintas de maíces blancos dentados y también en maíces QPM, pero también se a visto el efecto opuesto (desarrollo de picos de viscosidad altos) en otros híbridos. En lo que respecta al maíz QPM la Nacional Research Council (1988), menciona que debido a las modificaciones (cruzas entre variedades) sufridas por este grano, en el endospermo células compactas se encuentran rodeando a los gránulos dejando relativamente pequeños espacios de aire lo que dificulta la penetración de agua, lo que ocasiona que se requiera una mayor temperatura y tiempo para su gelatinización. En el caso de variedades de maíces dentados, Gómez y col. (1989), mencionan que el hinchamiento y la gelatinización del gránulo de almidón es restringida por que los gránulos de almidón fuertemente encerrados dentro de las células del endospermo.

En el caso de las harinas nixtamalizadas, el pico de viscosidad generado por la HMNE, fue marcadamente menor al generado por la HCOM, ciertamente este efecto puede tener relación con los estudios antes mencionados en cuanto a la influencia de las variedades y/o tipo de maíces utilizados, o puede estar ligado directamente con el tipo de tratamiento en el proceso utilizado. Martínez-Flores y col. (1998), observaron picos bajos de viscosidad en HMNE, atribuyendo ésto al grado de daño que sufrió el almidón el cual fue expuesto a efectos termomecánicos durante dicho procesamiento.

De igual forma Arámbula y col. (2002), se lo atribuyen al proceso, ya que en éste se realizan dos tratamientos térmicos: extrusión y deshidratación. Gómez y Aguilera (1984), desarrollaron un modelo fisicoquímico para la cocción por extrusión en almidón de maíz observando que la dextrinización del almidón se

incrementa a humedades por debajo del 20 %, mientras que la gelatinización del almidón predomina a contenidos de humedad por arriba del 20 %. Estos investigadores también observaron que la máxima gelatinización fue observada alrededor del 28-29 % de humedad. En realidad el grado de gelatinización del material extrudido es un efecto combinado de todas las variables de extrusión, tal como lo observaron Chiang y Jonson (1977), quienes evaluaron el efecto de estas variables sobre la gelatinización del almidón. Estos autores variaron el contenido de humedad en el material, la temperatura de extrusión, la velocidad del tornillo de cocimiento y el tamaño del dado de salida, señalando que incrementos en la temperatura de extrusión aumentan la gelatinización del almidón, e incrementos en la velocidad de alimentación y el tamaño del dado de salida disminuyen este efecto.

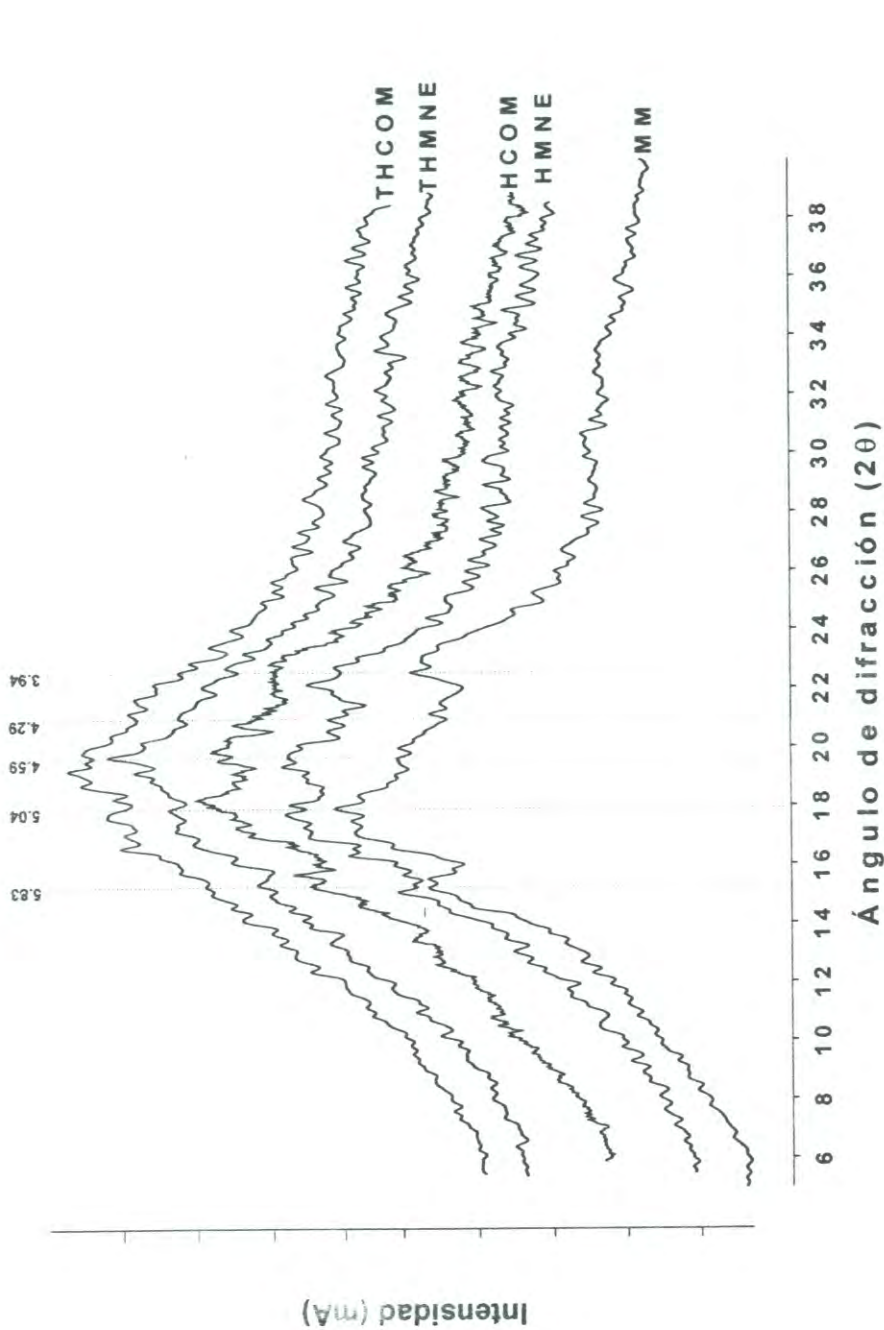
Por las tendencias observadas de los resultados en los análisis previos y por el pico de viscosidad a 95 °C generado en este análisis, se puede inferir que posiblemente el grado de cocción y fuerza de corte al cual se sometió el maíz molido para obtener la HMNE, fue drástico para una cierta cantidad de gránulos de almidón, sin embargo, también muchos de ellos conservaron su estructura después de este proceso (resultados observados en la microscopia óptica y electrónica). Con respecto a la considerable diferencia de viscosidad observada con la HCOM, Martínez y col. (1996) y Gómez y col. (1987), reportan que tamaños de partícula pequeños (harina fina) como es el caso de la HCOM son responsables de la viscosidad generada. Por otra parte Arámbula y col. (1999), mencionan que la adición de ciertos ingredientes presentes en la formulación de las HCOM como las gomas (polisacáridos solubles en agua de alto peso molecular) tienen una influencia importante en la generación de picos de viscosidad altos, de igual forma Bell (1990) y Christianson (1982), reportan el mismo efecto mencionando que las gomas incrementan la viscosidad en la masa y durante el proceso térmico compite con el agua retardando la gelatinización del almidón.

Serna-Saldivar y col. (1990), mencionan que la carboximetilcelulosa (CMC) utilizada en la industria de las harinas nixtamalizadas es un aditivo que incrementa los picos de viscosidad en dicho producto. Estas posibles causas pueden ser también las responsables de que la THCOM generara un mayor pico de viscosidad que la THMNE, sin embargo, ambas desarrollaron los menores valores de viscosidad con respecto a la HCOM y HMNE. Una característica importante de este producto que las diferencia del MM, HMNE y HCOM, es que generan viscosidad una vez que da comienzo el ciclo de calentamiento (Fig. 23). De acuerdo a Fernández y col. (1999), se debe a que el almidón es fácilmente dispersado debido a que ya está completamente gelatinizado, sin embargo, tienen la capacidad para retener agua y generar un cierto grado de viscosidad. Resultados similares fueron observados por Gómez y col. (1991), en tortillas elaboradas con HCOM nixtamalizadas, en tanto que Campas-Baipoly (1997) y Gómez y col. (1992), reportan también las mismas tendencias pero en tortillas elaboradas por el proceso tradicional.

Difracción de rayos-x

Con los difractogramas de rayos-x se pueden diferenciar almidones de cereales y tubérculos (Zobel, 1988b), y detectar cambios en la cristalinidad de la amilopectina causada por tratamientos físicos y químicos en los gránulos de almidón (Bello, 2005). De acuerdo con Varriano-Marston y col. (1980) y Owusu-Ansah y col. (1982), esta técnica es muy empleada para medir el grado de gelatinización del almidón. En este caso los picos de los difractogramas representados en la Fig. 26, indican la presencia del estado cristalino del almidón (haciendo referencia a la parte amorfa de la amilopectina) en los productos analizados.

Tomando como referencia al MM en el cual los gránulos de almidón conservan su integridad cristalina; este generó cinco picos que corresponden a



MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Figura 26. Difractogramas de los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

los valores de las distancias interplanares 3.94, 4.29, 4.59, 5.04 y 5.83 Å, además generó el mayor porcentaje de cristalinidad relativa (Tabla 23) con 40.7 %. Resultados similares fueron reportados por diferentes autores (Arámbula y col., 2002; Sandeep y Milford, 1994; Gómez y col., 1992; Gómez y col., 1991), quienes observaron cinco picos en almidón nativo de maíz con valores de distancia interplanar de 3.9, 4.7 5.2, 5.39 y 5.95 Å, valores que corresponden al patrón de cristalinidad A para el almidón en cereales (Zobel, 1988a), este último autor reporta 40 % de cristalinidad en maíz. De manera paralela esta misma tendencia fue observada en la HMNE y la HCOM, pero con una ligera mayor intensidad en las distancias interplanares (Fig. 26) de 4.29 y 4.59 Å para ambos productos. La preservación de este mismo patrón de cristalinidad en relación con el observado en el MM, indica que a pesar del procesamiento existe una proporción de gránulos de almidón que conservan su naturaleza cristalina (patrón tipo-A), lo que fue comprobado con el porcentaje de cristalinidad obtenido siendo este de 35.7 % para la HMNE y 36.4 % para la HCOM, tendencias similares en los picos y distancias interplanares fueron observadas en harinas nixtamalizadas comerciales y en los productos del proceso tradicional de nixtamalización, así como en el almidón extraído de dichos productos (Gómez y col., 1991; Campas-Baypoli, 1997; Gómez y col., 1992; Enríquez-Ramos, 2004).

Con respecto al ligero incremento de intensidad en dos de los picos de los difractogramas, Mondragón y col. (2004), mencionan que el incremento en la intensidad de la difracción (pico a 19.8° "d= 4.59" ángulo de Braggs 2θ) durante la nixtamalización tradicional se debe a que en la cocción (gelatinización parcial o total del almidón) se pueden formar complejos de amilosa con los lípidos internos, lo que de cierta manera hacen que se incremente la intensidad observada, estos autores mencionan también que este efecto es responsable de la disminución en el poder de hinchamiento del gránulo y su solubilidad.

En el caso del proceso de extrusión se han reportado la formación del complejos amilosa-lípidos y amilosa-proteína (Mercier y col., 1980). Diversos

Tabla 23. Porcentaje de cristalinidad relativa en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Producto ¹	Cristalinidad (%)
MM	40.79
HMNE	35.70
HCOM	36.40
THMNE	12.43
THCOM	19.07

¹ MM= Maíz molido; HMNE= Harina de maíz nixtamalizada extrudida; HCOM= Harina comercial; THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

investigadores han estudiado el efecto de la adición de varios lípidos y parámetros de procesamiento en la formación de este complejo durante el proceso de extrusión (Owusu-Ansah y col., 1982; Colonna y Mercier, 1983; Meuser y col., 1985; Schweitzer y col., 1986). De acuerdo con Chi-Tang y Mark (1992), son dos los mecanismos por los cuales se puede formar el complejo amilosa-lípido. El primero es la encapsulación física, donde los lípidos son simplemente atrapados dentro de las matrices de la harina de maíz formadas durante la extrusión, y el segundo, el cual consiste en las interacciones a nivel molecular de los diferentes lípidos con la amilosa. En el caso del complejo amilosa-proteína el mecanismo también es una encapsulación o cubrimiento de la superficie de los gránulos de almidón lo que dificulta la disponibilidad del almidón para la amilasa *in vitro* (Mercier y col., 1989).

En la última etapa del proceso (cocción), los cinco picos característicos de cristalinidad observados en el MM, HMNE y HCOM, fueron alterados ya que tendieron a decrecer en la intensidad de la difracción para la THMNE y THCOM, generándose dos picos, uno pequeño y difuso a 5.04 Å y el mayor a 4.59 Å en ambas tortillas, de manera conjunta los valores del porcentaje de cristalinidad fueron también bajos siendo de 19 y 12.4 %, respectivamente. Tendencias similares en decremento de intensidad por los picos de los difractogramas fueron reportadas por diferentes autores (Gómez y col., 1991; Enríquez-Ramos, 2004; Campa-Baypoli, 1997; Gómez y col., 1992), tanto en harinas comerciales como por el proceso tradicional de nixtamalización.

De acuerdo con Gómez y col. (1992) y Arámbula y col. (2002), gran parte de la pérdida de la cristalinidad del almidón se debe al tratamiento térmico debido a las altas temperaturas (320-420 °C) de exposición (20-45 s) durante el horneado de las tortillas. Zobel y col. (1988), atribuyen esta disminución a la gelatinización del almidón, ya que con este fenómeno se da una completa destrucción de la integridad cristalina la cual está en función de la humedad y la temperatura utilizada en determinado proceso.

Contenido de almidón resistente

El almidón resistente es la porción de almidón que no es digerido en el intestino delgado y pasa al colon donde es fermentado por la microflora natural. Este componente tiene efectos fisiológicos en el cuerpo humano similares a la fibra dietaria (Berry, 1986).

El ANDEVA (Tabla 24) para el contenido de almidón resistente en los productos del proceso fue altamente significativo. El porcentaje de almidón resistente en las muestras analizadas no mostró una secuencia definida (Fig. 27), esto es, el valor mayor correspondió al MM con el 2.2 %, el valor bajo a la HMNE con el 1.15 % y el valor intermedio a la THMNE con el 1.53 %, valor que comparado con la THCOM fue considerablemente menor. Entre los porcentajes de almidón resistente obtenidos en la HMNE, HCOM y THMNE no se observaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), ya que hay poca variación entre los valores obtenidos de uno y otro producto.

Por otra parte, el contenido de almidón resistente obtenido en el MM fue similar al reportado por Rendón-Villalobos y col. (2002) y Unlu y Faller (1998), quienes obtuvieron porcentajes de 1.99 y 2.1, respectivamente. De acuerdo a la clasificación de Englyst y col. (1986), este tipo de almidón corresponde al tipo-2 (RS2) el cual se refiere a gránulos de almidón nativos sin cocción, quienes por su cristalinidad los hacen menos susceptible a la hidrólisis enzimática (Faisant y col., 1995). Sin embargo, cuando el MM se nixtamalizó por extrusión el porcentaje de almidón resistente en el MM tendió a disminuir, siendo este decremento significativo con el porcentaje obtenido en la HMNE. Este efecto según Unlu y Faller (1998), puede ser debido a las condiciones de procesamiento utilizadas en general, ya que en muchos casos se destruye el almidón resistente tipo 1 (RS1) y 2 (RS2), para poder producir el tipo 3 (RS3). Sin embargo, en un sistema alimenticio no se exenta a uno u otro almidón de acuerdo a la clasificación donde

Tabla 24. Análisis de varianza, valor F, del contenido de almidón resistente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Fuente de Variación	GL	Valor de F
		AR ¹
Tratamiento	5	140.46 **
Error	4	
Total	9	

¹ AR= Contenido de almidón resistente (%).

** Altamente significativo a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).

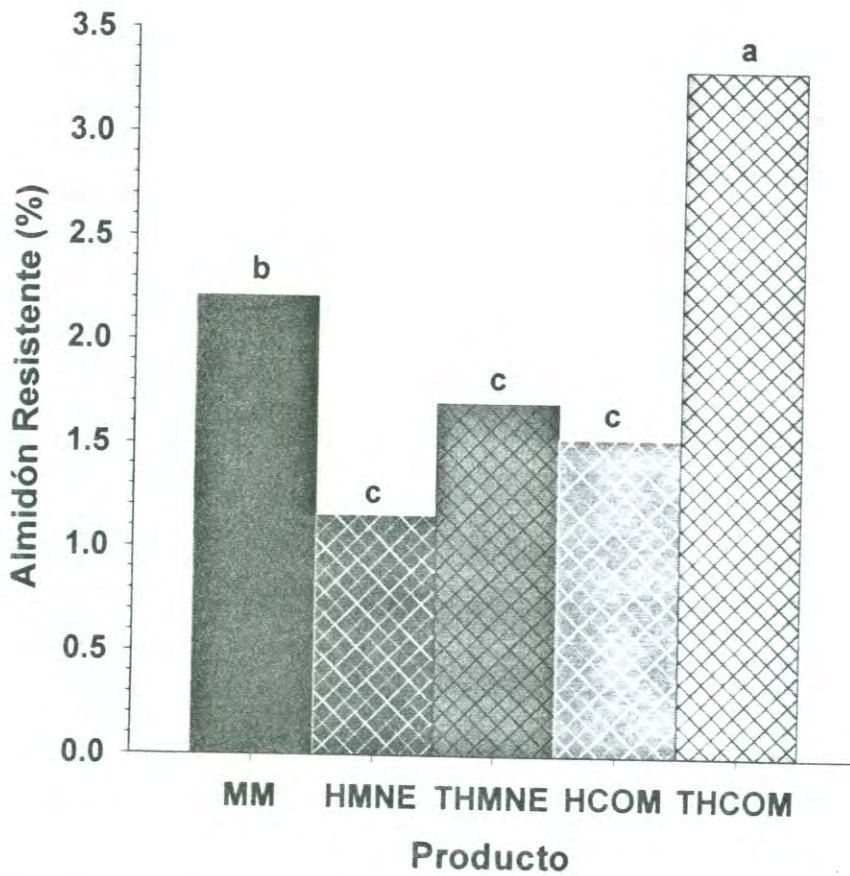


Figura 27. Contenido de almidón resistente en los productos analizados del proceso de elaboración de tortillas de maíz con harinas nixtamalizadas.

Nota: medias con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

este se sitúe, ya que de acuerdo con Noa y col. (1998), en las leguminosas las cuales son ricas en almidón y fibra, contienen básicamente RS1, pero también pueden contener RS2 y RS3 (después de una cocción).

En lo que respecta a las tortillas (THNE y THCOM) donde hay un incremento en menor o mayor grado del contenido de AR con respecto al producto anterior (HMNE y HCOM), este tipo de almidón de acuerdo a la clasificación de Englyst y col. (1986), se ubicaría como AR3 del cual diversos estudios sugieren que este almidón está asociado con la retrogradación de la amilosa (Berry y col., 1988; Berry, 1986; Sievert y Pomeranz, 1990). Tendencias similares en el incremento del contenido de almidón resistente también fue reportado por Campas-Baypoli (1997), pero en tortillas elaboradas mediante el proceso tradicional de nixtamalización. Además este mismo autor reportó que este componente aumentó significativamente al pasar de una etapa a otra. Sin embargo, un estudio más reciente realizado por Rendon-Villalobos y col. (2002), al evaluar el tiempo de almacenamiento sobre la digestibilidad *in vitro* y contenido de almidón resistente del nixtamal, masa, y tortilla, no observaron grandes variaciones de este componente en el maíz, nixtamal y masa, pero en la tortilla el incremento de este componente fue significativo. De igual forma Unlu y Faller (1998), mencionan que este tipo de almidón también es afectado por el estado físico del alimento (entero o molido), contenido de agua, pH, temperatura de calentamiento y tiempo de exposición, número de ciclos calentamiento y enfriamiento, métodos de congelado (lento vs rápido), y el secado (Englyst y Cummings, 1987).

Determinaciones físicas de las tortillas

El ANDEVA (Tabla 25) para las determinaciones físicas de la THMNE y la THCOM mostró diferencias significativas ($p \leq 0.01$). Los valores promedio de peso y espesor de las tortillas para ambos productos fueron diferentes ($p \leq 0.01$) estadísticamente, mientras que el diámetro de las tortillas no mostró ser

Tabla 25. Análisis de varianza, valor F, de las propiedades físicas de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

Fuente de Variación	GL	Valor de F		
		Diámetro	Peso	Espesor
Tratamiento	1	0.02NS	296.31 **	344.65 **
Error	16			
Total	17			

** Significativo a un nivel de $p = 0.01$ ($p < 0.01$).

NS= No significativo a un nivel de $p = 0.05$ ($p > 0.05$).

diferente. Por los resultados observados en la Tabla 26, los valores más altos los generó la THMNE con 32.2 g en peso y 2.45 mm en espesor comparados con la HCOM. Resultados muy semejantes a los obtenidos en la HMNE fueron reportados en la literatura (Enríquez-Ramos, 2004; Campas-Baypoli, 1997; Vázquez, 1995; Ramírez-Wong, 1989), lo que es de destacar debido a que estos autores emplearon el proceso tradicional de nixtamalización.

Por otra parte Galicia-García (2005), reporta valores diferentes a los obtenidos en las características físicas para las THMNE; obtuvo en peso 15.7 g, 11.1 cm en diámetro y 1.5 mm de espesor. Estas diferencias observadas fueron debido al método empleado para hacer las tortillas, ya que este autor empleo la metodología propuesta por San Martín-Martínez y col. (2003), mientras que en el presente estudio se utilizó un método comercial. Sin embargo, este mismo autor reporta la misma tendencia en los valores de las características físicas observada con la HMNE del presente estudio, valores que son superiores a los de las tortillas elaboradas con HCOM. Estas diferencias pueden ser debido, en forma general, a las condiciones de operación utilizadas durante el proceso (Serna-Saldivar y col., 1987; Martínez-Bustos y col., 1996), ya que por los resultados que se han observado en el presente trabajo, existe una mayor proporción de almidón pregelatinizado y gelatinizado en la HMNE que en la HCOM. Específicamente, diversos autores (Ramírez-Wong, 1993; Gómez y col., 1989; Pflugfelder y col., 1988; Bedolla y Rooney, 1982) mencionan que el grado de daño que sufre el almidón debido a la gelatinización favorece que se modifiquen algunas propiedades texturales (cohesividad, adhesividad) de la masa, lo que en este caso propició que durante el maquinado de la tortilla al pasar por los rodillos de formado ésta incrementara su grosor y por tanto su peso.

Tabla 26. Valores de las propiedades físicas de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

Determinación	THMNE ¹	THCOM ¹
Diámetro (cm)	13.3 ² a ³	13.3 ² a ³
Peso (g)	32.2 a	24.9 b
Espesor (mm)	2.45 a	1.79 b

¹ THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

² Valores promedio de cinco repeticiones.

³ Medias con letras iguales, en la misma línea, no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$).

Rollabilidad

La rollabilidad es un indicador subjetivo de la textura en una tortilla (Bedolla y Rooney, 1984), y de acuerdo con Arámbula y col. (1999), tortillas de buena calidad deben de ser suaves y rolables internamente para formar un "taco" sin dañarse.

El ANDEVA (Tabla 27) para la rollabilidad debido al tiempo de almacenamiento en la THMNE y la THCOM fue estadísticamente significativo ($p \leq 0.01$). Paralelamente los valores promedio de rollabilidad en los tres tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h) fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.01$) tanto para la THMNE y la THCOM.

De acuerdo a la escala subjetiva de rollabilidad la THMNE fue 9, 18 y 28 % a las 2, 24 y 48 h, respectivamente menos rollable que la THCOM. Sin embargo, ambas tortillas mostraron (Fig. 28) un descenso gradual en su flexibilidad conforme se incrementó el tiempo de almacenamiento. Los valores obtenidos de rollabilidad muestran ligeras diferencias a los reportados por la literatura (Galicia-García, 2005; Flores-Farias y col., 2000; Arámbula y col., 1998; Martínez-Flores, 1998; Bedolla y Rooney, 1984). Esto pudo ser debido a la diferencia de métodos para elaborar las tortillas, ya que el método comercial mecanizado que se empleó generó tortillas de mayor espesor. De acuerdo a Suhendro y col. (1998), el espesor de la tortilla influye en la rollabilidad, ya que tortillas con un mayor espesor requieren de una mayor fuerza para ser enrolladas y su efecto es más notorio después de las 24 h de almacenamiento. Un efecto similar fue reportado por Billeb y Bressani (2001), en harinas nixtamalizadas donde el grosor de la tortilla fue de alrededor de 2 mm; estos mismos autores mencionan que aunque el grosor fue alto, el porcentaje de rollabilidad fue bueno, tal como lo mostró el presente estudio a las 2 h de almacenamiento.

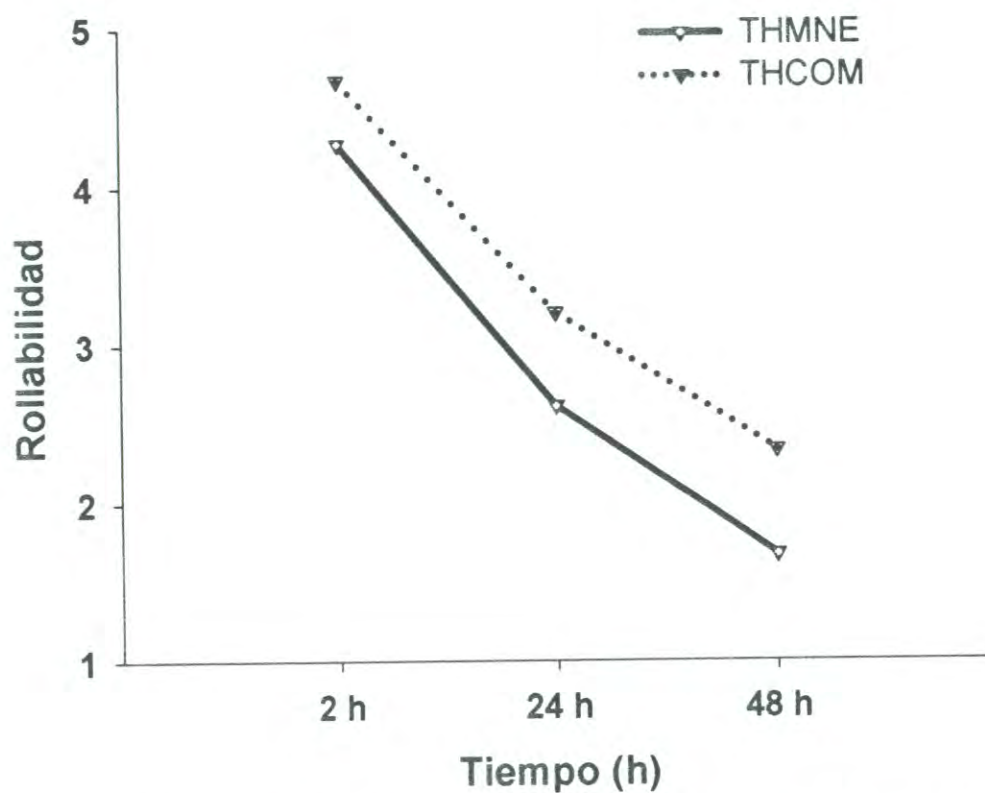
Tabla 27. Análisis de varianza, valor F, de la firmeza y módulo de rigidez de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

Fuente de Variación	GL	Producto ¹	Valor de F	
			Firmeza	Módulo de rigidez
Tratamiento	2	THMNE	133.83 **	140.62 **
Error	12	THCOM	470.77 **	5.97 *
Total	14			

¹ THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

* Significativas a un nivel de $p= 0.05$ ($p<0.05$).

** Altamente significativo a un nivel de $p= 0.01$ ($p<0.01$).



THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Figura 28. Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la rollabilidad de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

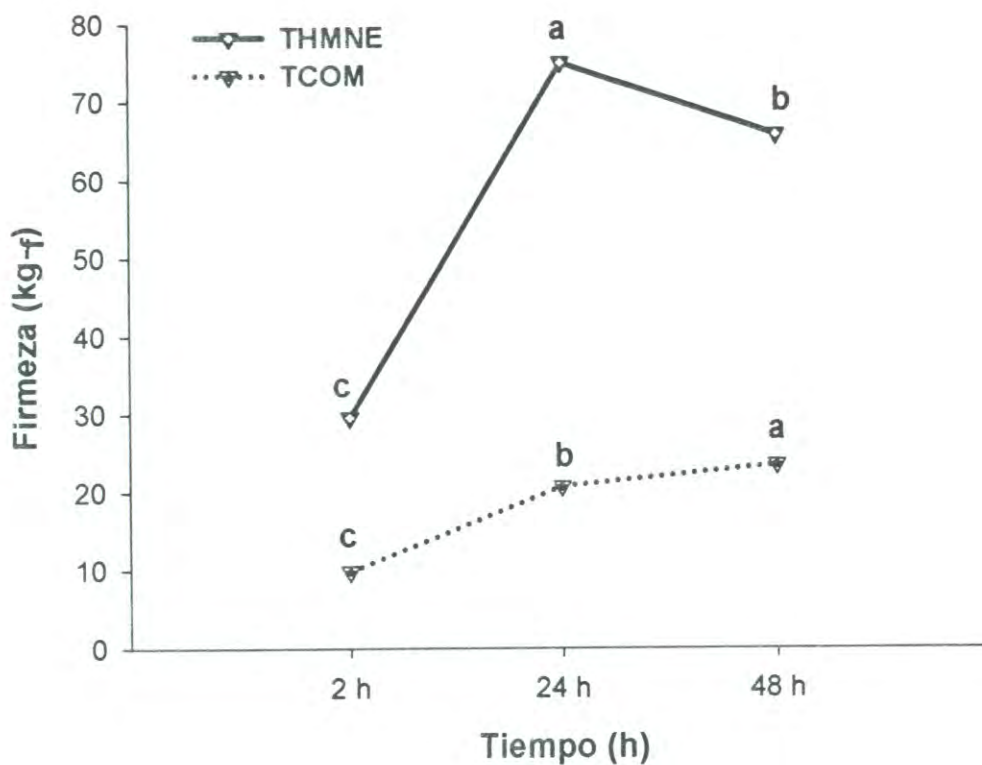
Por otra parte, la diferencia de rollabilidad entre la THMNE y la THCOM, puede ser debido a que en la tortilla elaborada con HMNE existe una mayor proporción de almidón gelatinizado parcialmente y gelatinizado, lo que generó en la tortilla poca elasticidad y flexibilidad. De acuerdo con Arámbula y col. (1999), la absorción y retención de agua son propiedades importantes, que afectan las características texturales de la tortilla. Estas propiedades en el caso de la THCOM son mejoradas con la adición de aditivos (gomas) que retienen una mayor cantidad de agua, además de mejorar la flexibilidad de la tortilla, y en general desarrollan una mejor textura en este producto (Flores-Farías y col., 2002; Gómez y col., 1991; Serna-Saldivar y col., 1990). Por otro lado Gómez y col. (1992), mencionan que el tamaño de partícula también juega un papel importante en la rollabilidad, ya que se producen harinas con mayor absorción de agua, y se hacen masas con mayor cohesividad.

Firmeza

La firmeza es un método instrumental de medición de textura, el cual es utilizado como un parámetro de calidad en tortillas (Rooney y Suhendro, 1999).

El ANDEVA (Tabla 27) de la firmeza debido al tiempo de almacenamiento para la THMNE y la THCOM fue estadísticamente significativo ($p \leq 0.01$). Paralelamente los valores promedio de firmeza en los tres tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h) fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.01$) tanto para la THMNE y la THCOM.

De acuerdo con los resultados observados en la Fig. 29, la THMNE generó una mayor firmeza en los tres tiempos de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C). Sin embargo, ambas tortillas (THMNE y THCOM) mostraron una tendencia similar de incremento en la fuerza de rompimiento (aumento en la dureza) durante las 24 h de almacenamiento. A las 48 h la THMNE mostró un descenso más pronunciado en la firmeza a diferencia de la THCOM.



THMNE= Tortillas de harina nixtamalizada extrudida; TCOM= Tortilla de harina comercial.

Figura 29. Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la firmeza de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

Nota: medias con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos en las THMNE son similares a los reportados por Galicia-García (2005), a las 2 y 48 h de almacenamiento, pero a las 24 h el valor obtenido en el presente estudio fue mayor al reportado por este mismo autor. Por otra parte Campas-Baypoli (1997) y Enríquez-Ramos (2005), al medir la firmeza en tortillas nixtamalizadas por el proceso tradicional obtuvieron resultados similares a las 2 h de almacenamiento, pero a las 24 h Campas-Baypoli (1997) reporta menores valores que los observados en el estudio realizado. A las 48 h este mismo autor también observó un reblandecimiento de las tortillas, ya que la firmeza tendió a disminuir con respecto al valor obtenido a las 24 h.

Tal como lo señalan diferentes autores (Fernandez y col., 1999; Vásquez, 1995; Gracia y Silvia, 1992; Ramírez-Wong, 1989), y por los resultados obtenidos en el estudio realizado, los cambios más significativos en cuanto a textura durante el almacenamiento suceden durante las primeras 24 h (25 °C).

Ciertamente la firmeza obtenida en los tres tiempos de almacenamiento para la HMNE estuvo por encima de la generada por la THCOM, sin embargo, es de destacar que esta misma característica textural fue comparable al valor reportado en una tortilla fresca elaborada (2 h de almacenamiento) por el proceso tradicional de nixtamalización. Adicionalmente es importante señalar que el valor de la firmeza se incrementó drásticamente en la THMNE a las 24 h, siendo mayor al que reporta la literatura y al valor obtenido en la THCOM, lo que pudo ser debido a un rápido envejecimiento (incremento de firmeza y pérdida de frescura) y retrogradación de la THMNE.

Arámbula y col. (2002), menciona que la tortilla es altamente susceptible a la pérdida de humedad, debido a su alto contenido (48 a 50 % peso/peso), y a la forma en que está hecha ya que tiene una gran área superficial (175 cm²) y pequeño grosor (1 a 1.3 mm). Por otra parte y considerando que también pudo ocurrir, según Fernandez y col. (1999), la retención de algunos cristales de almidón después del horneado de la tortilla funcionan como núcleos que facilitan

la propagación de estructuras cristalinas (por ejemplo, asociaciones de amilosa y/o amilopectina para formar estructuras inter e intragranulares) que facilitan la rápida asociación del almidón, lo que produce cambios estructurales durante las 24 h iniciales después de la cocción.

Bajo esta perspectiva pudiera ser que en la THMNE existe una mayor cantidad de estos cristales remanentes lo que facilita una rápida retrogradación o incremento de la textura de este producto. Miles y col. (1985), mencionan que la recristalización del almidón gelatinizado ocurre como un proceso que depende del tiempo y de la temperatura; de la misma manera, el contenido de humedad afecta la velocidad y la magnitud del fenómeno de recristalización.

Las causas que propiciaron el decremento en la firmeza observado en ambas tortillas en el último periodo de almacenamiento (48 h), pueden ser atribuidas al hecho de que este tipo de producto es altamente susceptible al ataque de microorganismos, por su alto contenido de humedad (38-46 %), actividad de agua ($a_w = 0.96$), y su poca alcalinidad ($pH = 7.3$) (Serna-Saldivar y col., 1990). Este mismo autor menciona que el rango de vida de anaquel en tortillas comerciales es de 3 a 60 días según las condiciones de almacenamiento utilizadas. De acuerdo con Tellez-Giron y col. (1988), los microorganismos son los que generalmente deterioran este producto.

Módulo de rigidez

También conocido como módulo de deformación (elasticidad) para una fuerza de corte, representa la pendiente obtenida de esfuerzo contra tiempo, si la pendiente es alta, indica una mayor esfuerzo para romper un material en este caso a la tortilla (Ledesma, 1997).

El ANDEVA (Tabla 27) para la rigidez debido al tiempo de almacenamiento en la THMNE y la THCOM mostró diferencias significativas estadísticamente para

ambas tortillas ($p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$, respectivamente). Paralelamente los valores promedio de rigidez en los tres tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h) para la THMNE fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.01$), en tanto que para la THCOM los valores promedio de rigidez a las 24 y 48 h no mostraron diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Según los valores observados en la Fig. 30, la rigidez generada en la THMNE fresca (2 h de almacenamiento) fue ligeramente mayor al valor de la THCOM, sin embargo, a las 24 h de almacenamiento este valor se incrementó notablemente en la THMNE. Por otra parte, en el último período de almacenamiento (48 h) ambas tortillas mostraron un descenso en su rigidez.

En resumen, por los resultados obtenidos la tortilla de HMNE requiere de un esfuerzo parecido a la THCOM para poder ser fracturada o rota a las 2 h de almacenamiento, sin embargo, al igual que en la firmeza esta característica textural se incrementa drásticamente a las 24 h de almacenamiento, y después de este período el valor tiende a disminuir en ambas tortillas. Las posibles causas de este efecto pueden ser las mismas que dan pie al incremento en la firmeza, antes discutidas.

Correlaciones entre Determinaciones Fisicoquímicas Realizadas a los Productos del Proceso de Elaboración de Tortillas utilizando HMNE

Las correlaciones entre algunas de las determinaciones realizadas a los productos del proceso se presentan en la Tabla 28. Dichos resultados mostraron que se generó una correlación negativa, de la humedad contenida en los productos, con la temperatura de inicio de gelatinización ($r = -1.00$) derivada del calorímetro de barrido diferencial, así como también de la temperatura de gelatinización ($r = -0.999$) obtenida en el viscosímetro rápido.

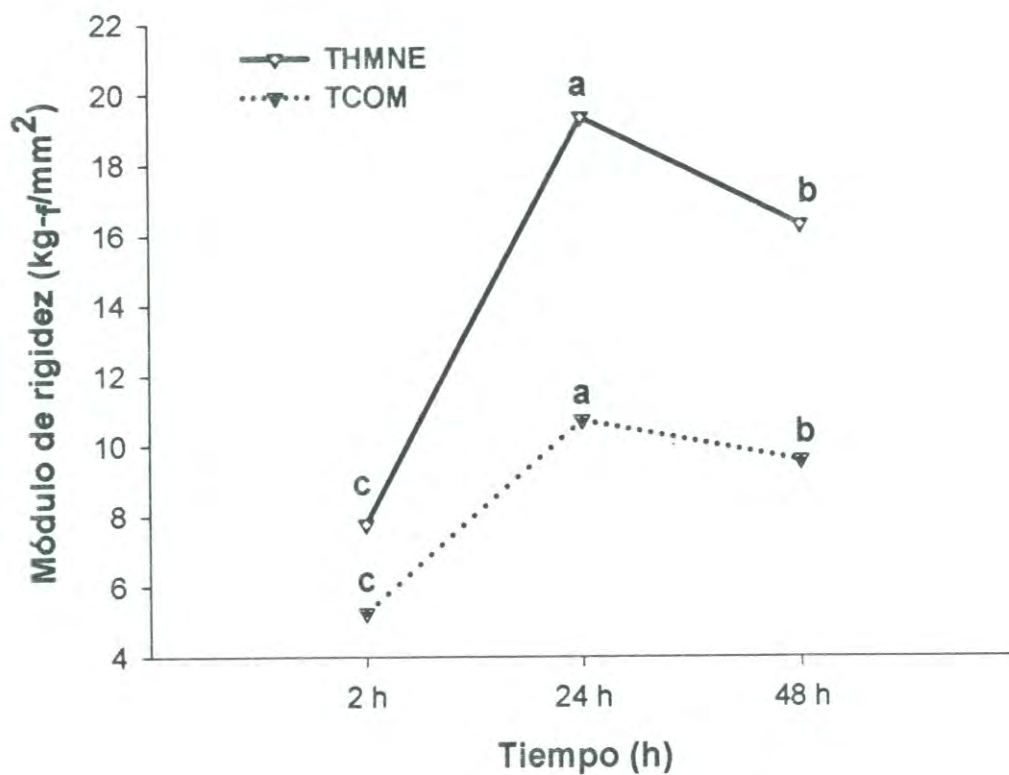


Figura 30. Efecto del tiempo de almacenamiento sobre el módulo de rigidez de las tortillas, elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión y comercial.

Nota: medias con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$).

Tabla 28. Correlaciones simples (r) entre determinaciones realizadas a los productos del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada por extrusión.

Determinación	CA	AR	AA	EG	To	Tp	Vm	CR	Hum	TG
Contenido de Almidón (CA)	1									
Almidón Resistente (AR)	-0.969	1								
Amilosa Aparente (AA)	-0.805	0.633	1							
Entalpía de gelatinización (EG) ¹	-0.905	0.771	0.981	1						
Temperatura inicial de gelatinización (To) ¹	-0.255	0.009	0.779	0.643	1					
Temperatura pico de gelatinización (Tp) ¹	-0.313	0.069	0.816	0.688	0.998*	1				
Viscosidad máxima (Vm)	0.607	-0.785	-0.017	-0.210	0.613	0.564	1			
Cristalinidad relativa (CR)	-0.390	0.151	0.861	0.746	0.990	0.997	0.495	1		
Humedad (Hum)	0.234	0.013	-0.766	-0.626	-1.000*	-0.997	-0.630	-0.986	1	
Temperatura de gelatinización (TG) ²	-0.266	0.020	0.787	0.652	1.000*	0.999*	0.604	0.991	-0.999*	1

¹ Determinada con el calorímetro de barrido diferencial.

² Determinada con el viscosímetro rápido.

* Significativas a un nivel de $p=0.05$ ($p<0.05$).

Por otra parte, las temperaturas (T_o y T_p) de inicio y pico de gelatinización obtenidas en el calorímetro, manifestaron una correlación positiva entre sí ($r=0.998$), y a su vez con la temperatura de gelatinización determinada en el viscosímetro rápido ($r=1.00$ y $r=0.999$, respectivamente).

Implicaciones del Presente Trabajo

A lo largo del proceso de elaboración de tortillas de maíz empleando harinas nixtamalizadas extrudidas, el almidón sufrió cambios físicoquímicos que influyeron en las propiedades funcionales del producto final. Cada etapa que compone a dicho proceso se distinguió por generar cambios significativos en diferente forma y grado de acuerdo al efecto intrínseco del equipo utilizado. Conforme se avanzó en la etapa de procesamiento se observó que los cambios en el almidón de los materiales fueron más significativos.

La molienda del grano como primera etapa del proceso, infringió daño mecánico a los gránulos de almidón fragmentándolos en piezas de diferentes tamaños, tal como se demostró en la técnica de microscopía óptica. El elevado número de gránulos fraccionados pudiera ser indicativo de que el enlace de la proteína que rodea a los gránulos de almidón debe ser muy fuerte en este genotipo (MCP). La heterogeneidad de los gránulos observados pudiera ocasionar que durante la extrusión el grado de cocción del mismo no sea homogénea. Así mismo, este fraccionamiento granular propició una gelatinización parcial en dichos gránulos, lo cual se comprobó con la técnica de microscopía óptica y tinción con rojo congo. Otro análisis que detectó este tipo de daño fue el ÍMS, debido a que se presentó el valor más alto en esta etapa.

La cocción por extrusión (combinación de calor, fuerza mecánica y presión) segunda etapa del proceso; provocó una mayor gelatinización parcial que la etapa de molienda, y en algunos casos sobregelatinizó el almidón de la HMNE. Ambos efectos modificarán la forma granular del almidón, en la cual

además de contener gránulos íntegros, se crearon diferentes geometrías tales como: gránulos hinchados dispersos, gránulos fragmentados, aglomeraciones de gránulos hinchados (pérdida o escasa forma granular) y gránulos completamente fusionados (estructuras amorfas). Estas formas y asociaciones geométricas fueron diferentes a las que presentó la HCOM, tal como lo demostró la microscopía electrónica. Los gránulos de almidón que participaron en la creación de nuevas formas geométricas granulares, sufrieron la pérdida de birrefringencia bajo la luz polarizada, observado en la microscopía óptica.

Las modificaciones en el almidón antes mencionadas, propiciaron que propiedades como: la cristalinidad relativa, la T_i , T_p y ΔH de gelatinización de los gránulos determinadas por los análisis de difracción de rayos-x y calorimetría de barrido diferencial, disminuyeran con respecto a las observadas en el MM. Adicionalmente, la ΔH de gelatinización generada por la HMNE fue ligeramente menor a la que presentó la HCOM.

Por otro lado, la cocción por extrusión incrementó la capacidad de hinchamiento (viscosidad) de los gránulos, comparado con el observado en el MM. De acuerdo con la literatura, también generó la formación del complejo lípido-amilosa (observado como el incremento de intensidad de la difracción de rayos-x a 19.8° " $d= 4.59$ " ángulo de Bragg 2θ) teniendo influencia en la disminución del contenido de amilosa aparente determinada en la HMNE.

En esta etapa, los resultados encontrados respecto al almidón en la harina nixtamalizada por extrusión sufrió cambios físicoquímicos más severos. Dichos cambios aceleraron el proceso de retrogradación, el cual se reflejó en la disminución de rollabilidad durante el almacenamiento y un incremento más pronunciado de la firmeza medido como fuerza máxima y elasticidad (módulo de rigidez) a las 24 h de almacenamiento en la THMNE.

La cocción de la tortilla como última etapa del proceso generó las mayores modificaciones fisicoquímicas en el almidón. Posiblemente, por las altas temperaturas de calentamiento ($>270^{\circ}\text{C}$), y fue comprobado mediante la escasa presencia de gránulos íntegros observados en la microscopía óptica. Con respecto a la generación de aglomerados se debió a la fusión de los gránulos de almidón observados en la microscopía electrónica. Para la cristalinidad relativa se obtuvo que el porcentaje fue el más bajo por difracción de rayos-x. El pico más bajo de viscosidad (poder de hinchamiento de los gránulos), se incrementó el porcentaje de almidón resistente con respecto a la HMNE. Los valores más bajos de T_i , T_p y ΔH de gelatinización generados por la calorimetría de barrido diferencial. Los cambios observados en esta etapa mostraron una tendencia similar en ambas tortillas (THMNE y THCOM).

Tomando como base los cambios encontrados en cada etapa del proceso. El almidón en la harina nixtamalizada por extrusión sufrió cambios más severos en comparación con los observados en la harina elaborada comercialmente.

La cocción de la tortilla, última etapa del proceso, generó los cambios más drásticos en el almidón, lo cual se comprobó por la escasa presencia de gránulos íntegros, la generación de aglomerados que demuestran la fusión de los gránulos de almidón, el bajo porcentaje de cristalinidad relativa, el pico más bajo de viscosidad y los valores más bajos de T_i , T_p y ΔH gelatinización.

Las modificaciones que sufrió el almidón en la HMNE, tuvieron efecto en el proceso de retrogradación de la THMNE, lo cual se reflejó, en una menor rollabilidad, así como, un incremento más pronunciado de la firmeza a las 24 h de almacenamiento, a diferencia de la TCOM. Sin embargo, es importante señalar que las THMNE frescas (2 h), muestran una firmeza similar a las que presentan las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización, de acuerdo con la literatura.

El almidón en la harina nixtamalizada por extrusión sufrió cambios más severos, comparados con los observados en la harina elaborada comercialmente. Las determinaciones analíticas que en forma más pronunciada detectaron los cambios en el almidón de los materiales fueron la microscopía óptica y electrónica, el viscoamilógrafo rápido, la difracción de rayos x, la calorimetría de barrido diferencial y las pruebas texturales de firmeza y rollabilidad.

RECOMENDACIONES

Emplear cromatografía de alta resolución (HPLC) para cuantificar la amilosa y la amilopectina del almidón. Esto daría una idea más clara de los cambios a nivel molecular que sufre el almidón en cada una de las etapas del proceso para la elaboración de tortillas utilizando harinas nixtamalizadas por extrusión.

Realizar un estudio similar, pero evaluando el efecto de la adición de aditivos a las harinas nixtamalizadas extrudidas que ayuden a evitar cambios negativos en el almidón, y de esta forma mejorar sus propiedades funcionales. Además, sería conveniente realizar una evaluación sensorial a las tortillas obtenidas.

Finalmente, por los cambios fisicoquímicos encontrados en el presente trabajo, pudiera ser conveniente para el proceso emplear otro tipo de molino para experimentar diferentes tamaños de partícula del maíz molido, así como también incrementar el tiempo de reposo de la harina acondicionada.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. H. 1984. Descripción del Equipo. I Reunión Panamericana de Extrusión de Alimentos. Chihuahua, Méx.
- Álvarez-Rivas, L. A. 1996. Efecto de las fracciones del almidón sobre la calidad y vida de anaquel de la tortilla. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo.
- American Association of Cereal Chemists (AACC). 1995. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- American Association of Cereal Chemists (AACC). 2001. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- Ananthan, N. K, Avtar S. S., and Milford, A. H. 1996. Physical and molecular properties of re-extruded starches as affected by extruder screw configuration. *Journal of Food Sci.* 91(8): 596-600.
- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., and Griffin, E. L. Jr. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today.* 14:1-4.
- Arámbula, V., Figueroa, C., Martínez-Bustos, F., Ordica, F., and González-Hernández. 1998. Milling and processing parameters for corn tortilla from extruded instant dry masa flour. *Journal of Food Sci.* 63 (2): 338-341.
- Arámbula, V. G. 1994. Evaluación de un proceso continuo de extrusión para obtención de harina instantánea de maíz para elaboración de tortillas. Tesis. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.

- Arámbula, V. G., Mauricio, C. J. D., Figueroa, J., González-Hernández, and Ordorica, F. C. A. 1999. Corn masa and tortillas from extruded instant corn flour containing hydrocolloids and lime. *Journal of Food Sci.* 63(1):120-124.
- Asp, N. G. 1992. Preface. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46:1.
- Atwell, W. A., Hood, L. F., Lineback, D. R., Varriano-Marston, E., and Zobel, H. F. 1988. Terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World.* 33:306.
- Arámbula, V. G., González-Hernández, Moreno, M. E., and Ondorica, F. C. A. 2002. Characteristics of tortillas prepared from dry extruded masa flour added with maize pericarp. *Journal of Food Sci.* 67(4).
- Almeida-Dominguez, H. D., Cepeda, M., and Ronney, L. 1996. Properties of comercial nixtamalized corn flour. *Cereal Foods World.* 41:624-630.
- Báez, R. O. A. 1990. Estudio de la influencia de las condiciones de proceso sobre la calidad de harina de maíz nixtamalizado para tortilla. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Bazua, C. D., Gurfera, R., and Sterner, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation. *J. Food Sci.* 44: 940-941.
- Bell, D. A. 1990. Methylcellulose as a structure enhanced in bread baking. *Cereal Foods World.* 35: 1001.

- Bedolla, S. 1983. Development and characterization of an instant tortilla flour from sorghum and maize infra-red cooking (micronizing) and extrusion cooking. Dissertation submitted to the graduate college of Texas A & M University. Doctor of Philosophy.
- Bedolla, S., and Rooney, L. W. 1984. Characteristics of U.S and mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World*. 29(11): 732-735.
- Bello-Pérez L. A., Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Núñez-Santiago, C., y Paredes-López, O. 2002. Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*. 36:319-328.
- Bello-Pérez, L. A., Roger, P., Baud, B., and Colonna, P. 1998. Macromolecular features of starch determined by aqueous high-performance size exclusion chromatography. *J. of Cereal Sci.* 27: 267-278.
- Bello-Pérez, L. A. 2005. Almidón y fibra dietética: química, tecnología y biodisponibilidad. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos. Pp. 31-32.
- Benczel, D. B. 1983. *New frontiers in foods microstructure*. AACC. St. Paul, Minnesota.
- Berry, C. S. 1986. Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fiber. *J. Cereal Sci.* 4:301-314.

- Berry, C. S., I' Anson, K., Miles, M. J., Morris, V. J., and Russel, P, L. 1988. Physical and chemical characterization of resistant starch from wheat. *J. Cereal Sci.* 8:203-206.
- Biliaderis, C. G. 1990. Thermal analysis of food carbohydrates, in: *Thermal analysis of foods*, Eds. V.R. Harwalkar and C. Y. Ma. Elsevier Applied Science, London, pp. 169-220.
- Biliaderis, C. G. 1992. Structures and phase transitions of starch in food systems. *Food Technology*. June: 98-109.
- Bourne, G. H. 1989. Nutricional value of cereal products, beans and starches. Ed. KARGER. 50:350.
- Billeb, S. A. C., y Bressani, R. 2001. Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 51(1): 86-94.
- Bjarnason, M., and Vasal, S. 1992. Breeding of quality protein maize (QPM). *Plant Breeding Rev.* 9:181-216.
- Bressani, R., Turcios. J. C., Reyes, L., y Mérida, R. 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.
- Brockett, E., Thompson, D., Davis, T., and Boyer, C. 1988. Gelatinization characteristics of starch from du, wx, ae and ae, wx endosperm of sweet corn in bred. *Starch/Stärke*. 40:175-177.

- Brown, S. A., and French, D. 1977. Specific adsorption of starch oligosaccharides in the gel phase of starch granules. *Carbohydr. Res.* 59: 203.
- Campbell, A. M., and Briant, A. M. 1957. Wheat starch pastes and gel containing citric acid and sucrose. *Food Res.* 22: 358-366.
- Camire, M. E., and King, C. C. 1991. Protein and fiber supplementation effects on extruded cornmeal snack quality. *Journal of Food Sci.* 56(3): 760-763.
- Campas-Baypoli, O. 1997. Cambios fisicoquímicos en el almidón durante el proceso de elaboración y almacenamiento de la tortilla de maíz. Tesis de Maestría. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.
- Chiang, B. Y., and Jonson, J. A. 1977. Gelatinization of starch in extruded products. *Cereal Chem.* 54:436.
- Chi-Tang, H., and Mark, T. I. 1992. Lipid-protein and lipid-carbohydrate interactions during extrusion. In: *Foods extrusion science and technology*. Jozef, L. K., Chi-Tang, Ho., and Mukund, V. K. (Ed.). Marcel Dekker, Inc. New Jersey. USA. Pp. 415-421.
- Christianson, D. D. 1982. Hydrocolloids interactions with starch. In: *Food Carbohydrates*, D.R. Lineback (Ed.). Avi Publishing, Wesport, CT.
- Colonna, P., and Mercier, C. 1983. Macromolecular modifications of manioc starch components by extrusion-cooking with and without lipids. *Carbohydr. Polym.* 3:87-108.
- Cooke, D., and Giggley, M. J. 1992. Loss of cristaline and molecular order during starch in food systems. *Food Technol.* 46(6):98-109,145.

- Cummings, J. H., and Macfarlane, G. T. 1991. The control and consequences of bacterial fermentation in the human colon. *J. Appl. Bacteriol.* 70:443-459.
- Dubai, A. 2004. The importance and impact of starch damage and evolution of measuring methods. *SDmatic*. Pp.1-5.
- Dublier, J. L., Colonna, P., and Mercier, C. 1986. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. II. Rheological characterization of starch pastes. *Cereal Chem.* 63:240-246.
- Duran-Domínguez, C. 1978. Procedimiento para cocer maíz por extrusión. Registro de patentes: abril 7 de 1978. Dirección general de invenciones y Marcas, Departamento de patentes, Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. México.
- Eliason, A. C. 1985. Starch gelatinization in the presence of emulsifier, a morphological study of wheat starch. *Starch/Stärke.* 37:411.
- Englyst, H. N., and MacFarlane, G. T. 1986. Breakdown of resistant starch and readily digestible starch by human gut bacteria. *Journal Sci. Food Agric.* 37:699.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cumings, J. H. 1986. Classification and measurement of nutritional important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46:33-50.
- Englyst, H. N., Kingman, H. S., and Cummings, J. H. 1987. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46:33-50.

- Enríquez, G. M. A. 1984. Introducción a la extrusión de alimentos. I Reunión panamericana de extrusión de alimentos. Chihuahua, México.
- Enríquez-Ramos, J. 2004. Evaluación de los cambios fisicoquímicos extraído de las etapas del proceso tradicional de elaboración y durante el almacenamiento de la tortilla de maíz. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Faisant, N., Champ, M., Colonna, P., Buléon, A. Molis, C., Lartigue, S., Galmiche, J. P., and Champ, M. 1995. Digestion of raw banana starch. *Br. J. Nutr.* 73: 111-123.
- Faubion, J. M., Hosney, R. C., and Seib, A. P. 1982. Functionality of grain. *Cereal Chem.* 27(5): 212-216.
- Fennema, O. 1991. Química de los alimentos. 2ª ed. Ed. Acribia. Zaragoza España.
- Fernández, D. A., Waniska, R. D., and Rooney, L. W. 1999. Changes in starch properties of corn tortillas during storage. *Starch/stärke.* 51(4): 136-140.
- Figuroa, J. D. C., Martínez, B. F., González, H. J., Sánchez, S. F., Martínez, M. J. de L., y Ruíz, T. M. 1994. Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización y la tortilla. Mimeografiado.
- Figuroa, J. D., González-Hernandez, C. J., Arámbula-Villa, G., y Morales-Sánchez. 1997. Tecnologías ecológicas para la producción de tortilla. *Avances y perspectiva.* 16: 363-374.
- Flores-Farias, R., Martínez-Bustos. F., Salinas-Moreno, Y., Chang-Kil, Y., Hernández-González, J., and Ríos, E. 2000. Physicochemical and

rheological characteristics of commercial nixtamalized mexican maize flours for tortillas. *J. Sci. Food Agric.* 80:657-664.

Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., and Rios, E. 2002. Caracterization of comercial nixtamalized maize flours. *Agrociencia.* 36:557-567.

Freedman, J. M. 1973. Quality factors affecting value of corn for wet milling. *Trans. ASAE.* 16: 671-679.

Galicia-García, T. 2005. Producción y evaluación de la calidad de harinas nixtamalizadas obtenidas de maíz de calidad proteica, utilizando el proceso de extrusión y técnicas de optimización. Tesis de Maestría. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.

García, M. N. 1997. Procesos no convencionales de la elaboración de harinas instantáneas para tortilla. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

García, A. R., y Silva, E. B. 1992. Estudio de algunas variables del proceso de producción de tortilla de maíz a nivel planta piloto y de sus efectos en la textura de la masa y la tortilla. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

García, M. N. 1994. Procesos no convencionales de elaboración de harinas instantáneas para tortilla. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

- Giral, B. A. 1994. Comercialización de un desarrollo tecnológico. CINVESTAV, México, D. F.
- Glicksman, M. 1969. Gum technology in the food industry. Academic Press, Inc. San Diego, New York, Bakeley Boston.
- González, A. J. 1996. Utilización del grano agotado de cervecería y harina de maíz en la elaboración de extrudidos. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- González, A. U. 1995. El maíz y su conservación. Ed. Trillas. México, D.F.
- González-Vera, I. 2002. Estudio de las variables de extrusión en la obtención de botanas de maíz de alta calidad proteica. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Gómez, A. C. A. 1995. Efectos del proceso de extrusión (CINVESTAV) sobre los componentes químicos y características nutricionales de harinas instantáneas de maíz para la elaboración de tortillas. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.
- Gómez, M. H., Lee, J. K., Mc Donough, C., Waniska, R. D., and Roney, L. W. 1992. Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. *Cereal Chem.* 69: 275.
- Gómez, A. C. A., Martínez, B. F., Figueroa. C. J de D., Ordorica, F. C. A., y González, H. J. 1996. Cambios en algunos componentes químicos y nutricionales durante la preparación de tortillas de maíz elaboradas con

harinas instantáneas obtenidas por extrusión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 46 (4): 315-319.

Gómez, M. H., Mc Donough, C. M., Rooney, L. W., and Waniska, R. D. 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *J. Food Sci.* 54(2): 330-336.

Gómez, M. B., Waniska, R. D., and Rooney, L. W. 1991. Starch characterization of nixtamalized com flour. *Cereal Chem.* 68(6): 578-582.

Gómez, M. H., and Aguilera, M. J. 1983. Changes in the starch fraction during extrusion-cooking of corn. *Journal of Food Sci.* 48: 378-381.

Gómez, M. H., and Aguilera, M. J. 1984. A physicochemical model for extrusion of corn starch. *Journal of Food Sci.* 49: 40-43.

Gómez, M. H., Rooney, L. W., Waniska, R. D., and Pflugfelder, R. L. 1987. Dry corn masa flours for tortilla and snack production. *Cereal Foods World*. 32:372.

Gómez, M. H., Lee, K. J., McDonough, C. M., Waniska, R. D., and Rooney, L. W. 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *Journal of Food Sci.* 54: 330-336.

Gómez, M. H., Waniska, R. D., and Rooney, L. W. 1990. Effects of nixtamalization and grinding conditions on starch in masa. *Starch/Stärke*. 42:475.

Gómez-Noel, Sierra-Mauro, Canto-Miguel, Rodríguez-Flavio, Manjares-Margarito, Espinosa-Alejandro, Betanzos-Esteban, Córdova-Hugo, Caballero-Filiberto, Turrent-Antonio, García-Abrahm, Ramírez-Genova, Sandoval-Alfredo,

- Coutiño-Balmuro, Cervantes-Ernesto, Reyes-César y Nava-Lauro. 2003. V-537C y V-538C, nuevas variedades de maíz con alta calidad de proteína para el trópico mexicano. *Rev. fitotecnia mexicana*. Vol. 26 (3).
- Goñi, I., García-Díaz, L., Mañas, E., and Saura-Calixto, F. 1996. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. *Food Chem.* 56: 445-449.
- Goñi, I., García-Díaz, L., and Saura-Calixto, F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutr. Res.* 17, 427-437.
- Greenwood, C. T. 1979. Observations on the structure of starch granules. In: *Polysaccharides in food*. Blashard J. M. V. y Mitchel J. R. Butterworks, London. Pp. 130-146.
- Hamaker, B. R., and Griffing, V. K. 1993. Effect of disulfide band- containing protein on rice starch gelatinization and pasting. *Cereal Chem.*70:377.
- Harper, M. J. 1981. *Extrusion of foods*. Volume I. CRC Press, Inc. Boca Raton Florida, U.S.A.
- Harper M. J. 1991. *Extrusion of foods Vol. I y II*. International Standard Book Library of Congress. In Publication Data USA.
- Hart, E. R. 1985. *Cereal processing*. U.S. Patent. 4,555,409.
- Hola, J., Björck, I., Drews, A., and Asp, N. G. 1986. A rapid method for the analisis of starch. *Steerke*, 38:224-226.
- Hoseney, R. C. 1991. *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*. Ed. Acribia, S. A., Zaragoza. España.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1992. Abasto y comercialización de productos básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Censo agropecuario. México.
- Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria (INIFAP). 2001. Descripción varietal de H-519C, H-553C y V-537C. Maíces con alta calidad de proteína para el trópico húmedo de México. Folleto Técnico No. 30.
- Investigación y desarrollo (Periodismo de Ciencia y Tecnología). 1999, 2000. México cultiva maíz de alto contenido proteico. Septiembre. México.
- Irvin, S. A., Feder, R. A., and Merrith, C. G. 1991. Continuous extrusion for tortilla cheap production. U.S. Patent 4,985,269.
- Islam, M., Lirio, E. M., and Del Valle, R. M. 1984. Mold inhibition in tortilla by dimethyl fumarate. *J. Food Processing and Preservation*. 8:41-45.
- Jackson, B. A., and Shandera, J. R. 1995. Corn wet milling: separation chemistry and technology. *Advances in food and Nutritional Research*.
- Jane, J. 1993. Mechanism of starch gelatinization in neutral salt solutions. *Starch/Stärke*. 45:161-166.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. 1993. *Starch/Stärke*. 45, 417.
- Johnson, B. A., Rooney, L. W. and Khan, M. N. 1980. Tortilla-making characteristic of micronized sorghum and corn flours. *Journal of Food Sci.* 46:671.

- Katz, J. R., and Derksen. 1932. The physical chemistry of starch and bread making. *Zeit. Phys. Chem. A.* 150: 100.
- Kent, N. L. 1978. *Tecnología de los cereales*. Ed. Acribia. Zaragoza, España p.221.
- Kevin, N. G. 1992. Resistant starch. *European Journal of Clinical Nutrition.* 56(1):60.
- Knutson, C. A., Khoo, U., Cluskey, I. E., and Inglett, G. E. 1982. Variation in enzyme digestibility and gelatinization behavior of corn starch granule fractions. *Cereal Chem.* 59:512-515.
- Knutson, C. A. 1990. Annealing of maize starches at elevated temperatures. *Cereal Chem.* 67:376-384.
- Krueger, B. R., Walker, C. E., Knutson, C. A., and Inglett, G. E. 1987. Differential scanning calorimetry of raw and annealing starch isolated from normal and mutant maize genotypes. *Cereal Chem.* 64:187-190.
- Kuhn, K., and Schlauch, S. 1994. Comparative study about commercially available starches for high temperature applications in foods. *Starch/Stärke.* 46(6): 2008-218.
- Kwok, K. Shiu, Y. Yeung, Ch., and Niranjana, K. 1998. Effect of thermal processing on available lysine, thiamine and riboflavin content in soymilk. *J Sci. Food Agric.* 77: 473-478.
- Leach, W. N. 1965. Gelatinization of starch. Chap XII In: *Starch Chemistry and Technology*. Vol I. Ed. by Whistler, R.L. and Paschall. E.F. Academic Press, N.Y. USA.

- Lehninger, A. L. 1985. Bioquímica. Editorial Omega. Barcelona. España.
- Lineback, D. 1984. The starch granule. Organization and properties. Bakers digest. No. 3: 16-21.
- Lionel-Noah., Fabienne-Guillon., Brigitte-ouchet., Alain-Buléon, Cristine-Molis., Maria-Gratas., and Martine-Champ. 1998. Digestion of carbohydrate from white beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in healthy Humans. Humans Nutrition and Metabolism. 128:977-985.
- Linko, P., Colonna, P., and Mercier, C. 1981. High-temperature, short-time extrusion of wheat gluten and bran -like fraction. Cereal Chem. 62:267.
- López, O. 2002. Cereal Chem. 79(3):340-344.
- MacIntyre, A., Gibson, P. R. Gibson, P. R., and Young, G. P. 1993. Fermentation products of dietary and protection against large bowel cancer in rat model. Gut. 34:386-391.
- Marcel, M. I. 1997. Maíz- tortilla, políticas y alternativas. Ed. UNAM. México, pp 58-59.
- Martínez, B. F. 1979. Farinha pre-gelatinizada de milho alaborada por processo hidrotérmico. Características químicas, tecnológicas y usos. Tesis de Maestría. Facultad de Engenharia de Alimentos e Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.
- Martínez, B. F., Figueroa, J. D. C., and Larios S. A. 1996. High lysine extruded products of quality protein maize. J. Sci. Food. Agric. 71: 51-155.

- Martínez-Bustos, F., Figueroa, J. D. C., Sánchez-Sinencio, F., González-Hernández, J., Martínez-Montes, J. L., and Ruiz-Torres, M. 1996. Method for the preparation of instant fresh corn dough or masa. U.S. Patent 5.532,013. Jul. 2.
- Martínez, B. F. 1988. Obtenção de farinhas instantâneas de sorgo para tortillas pelo processo de extrusão. Tese de Duodocorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Sao Paulo Brasil.
- Martínez-Flores, H., Martínez-Bustos F., Figueroa J., and González-Hernández, J. 1998. Tortilla from extruded masa as related to corn genotype and milling process. *Journal of Food Sci.* 63(1): 130-133.
- Martínez-Herrera, M. L. and Lachance, P. A. 1979. Corn (*Zea mays L*) kernel hardness as an index of the alkaline cooking time for tottrilla preparation. *Journal of Food Sci.* 44:377-280.
- Mason, W. K., and Hoseney, R. C. 1986. Factors affecting the viscosity of extrusion-cooked wheat starch. *Cereal Chem.* 63:436-441.
- Matz, S. A. 1962. Food texture. Ed. AVI Pibl. Westport Connecticut. USA.
- Mensah-Agyapong, J., and Horner, A. F. W. 1992. Nixtamalization of maize (*Zea mays L*) using a single screw cook-extrusión process on lime-treated grist. *J. Sci. Food Agric.* 60: 509-514.
- Mercier, C. 1980. Veränderungen der struktur und verdaulichkeit von getraide-stärken beim extrudieren. *Getreide Mehl Brot.* 34: 52-56.

- Mercier, C., and Feillet, P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. *Cereal Chem.* 52:283-297.
- Mercier, C., Linko, P., and Harper, J.M. 1989. Extrusion cooking. American Association of Cereal Chemist. St. Paul Minnesota. USA. p371.
- Mertz, E. T., Bates, L. S., and Nelson, O.E. 1964. Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science.* 145: 279- 280.
- Meuser, F., Van Lengerich, B., and Stender, J. 1985. Bildung von Stärkelipid-komplexen durch Kochextrusion. 1. Teil: herstellung und strukturelle charakterisierung der komplexe. *Getreide Mehl Brot.* 39:205-211.
- Mian, W. R. 2000. Extruders in foods application. Technomics Publishing Company, Inc. Lancaster. Pensilvania. USA.
- Milán-Carrillo, J., y Reyes-Moreno. 2002. Alternativas tecnológicas para la producción de harinas instantáneas de maíz (*Zea mays L.*) de calidad proteínica y garbanzo (*Cier arietenum*). Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Culiacán, Sinaloa.
- Miles, M. J., Morris, V. J., Orford, P. D., and Ring, S. D. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohidr. Res.* 135:271-281.
- Misra, P. S. Mertz, E. T., and Clover, D. V. 1975. Studies on corn proteins, endosperm changes in single and double endosperm mutants of maize. *Cereal Chem.* 52, 161-166.

- Mistry, A. H., and Ekchoff, S. R. 1992. Characteristics of alkali-extracted starch obtained from corn flour. *Cereal chem.* 69(3): 296-303.
- Mok, C., and Dick, W. J. 1991. Moisture adsorption of damaged wheat starch. *Cereal Chem.* 68(4):405-409.
- Molina, M. R., Letona, M., and Brezan, R. 1977. Drum drying technology for the improved production of instant tortilla flour. *Journal of Food Sci.* 42: 1432-1434.
- Mondragon, M., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Betancur-Ancona, D., and Juan-Luis, P. 2004. Effect of cooking time on starch gelatinization of corn during nixtamalization. *Starch/stärke.* (56): 248-253.
- Montemayor, E., and Rubio, M. 1983. Alkaline cooked corn flour technology and uses in tortilla and snack products. *Cereal Foods World.* 28:577.
- National Research Council. 1988. *Quality Protein Maize.* National Academy Press. Washinton, D.C.USA.
- Noah, L., Guillon, F., Bouchet, B., Buleon, A., Molis, C., Gratas., M., and Champ, M. 1998. Digestion of carbohydrate from from white beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in: *Healthy humans.* *J. Nutr.* 128: 977-985.
- Ortega, E. I., Villegas, E., y Vasal S. K. 1986. A comparative study of protein changes in normal and quality protein maize during tortilla making. *Cereal Chemistry.* 63(5): 446- 451.
- Oosten, B. J. 1982. Tentative hypotesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperature of starches in water. *Starch/ Stärke.* 34:233-239.

- Owusu-Ansah, J., Van de Voort, F. R., and Stanley, D. W. 1982. Effect of extrusion variables on product moisture and extrusion crystallinity of corn starch. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 15:257-261.
- Owusu-Ansah, J., Van de Voort, F. R., and Stanley, D. W. 1982. Determination of starch gelatinization by x-ray diffractometry. *Cereal Chem.* 59: 167-171.
- Paredes-López, O., and Saharópulos, M. E. 1983. Maize: A review of tortilla technology. *Baker's.* 57:16:25.
- Pons-Hernández, J. L. 2004. Maíz QPM, de riego y temporal, sus usos en nixtamalización. INIFAP-Bajío. Citado en: I Congreso Nacional de Nixtamalización Octubre 2004. Querétaro, México.
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L., W., and Waniska, R. D. 1988. Fraccionation and composition of comercial com masa. *Cereal Chem.* 65:262-266.
- Ramírez-Wong, B. 1989. Measurement and evolution of textural and rheological properties of fresh corn masa. Philosophy Doctor Disertation. Texas A & M University, College Station.
- Ramírez-Wong, B., Sweat, V. E., Torres, P. I., and Rooney, W. L. 1993. Development of two instrumental methods for corn masa texture evaluation. *Cereal Chemistry.* 70: 286-290.
- Ramírez-Wong, B., Sweat, V. E., Torres, P. I., and Rooney, L. W. 1996. Cooking time, grinding, and moisture content effect on fresh corn masa texture. *Cereal Chem.* 71(4): 337-343.

- Rasper, V. 1980. Theoretical aspects of amylographology. In: The amilograph handbook. Shuey, W. C., and Tipples, K. H. (Eds.). American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul Minnesota, USA. Pp. 1-6.
- Reid, D. S., Hsu, J., and Ker, W. 1993. Calorimetry. In *The Glassy State in Foods*, eds. J. M. V. Blanshard and P. J. Lillford. Nottingham University Press. UK, pp. 123-132.
- Rendon-Billalobos, R., Bello-Pérez, L. A., Osorio-Díaz, P., Tovar, J., and Paredes-López, O. Effect of storage time in Vitro digestibility and resistant starch content of nixtamal, masa and tortilla. *Cereal Chem.* 79(3): 340-344.
- Riva, M., Piazza, L., and Schiraldi, F. 1991. Starch gelatinization in pasta cooking: differential flux calorimetry investigations. *Cereal Chem.* 68:622.
- Robles, R. R. 1986. Cambios fisicoquímicos del almidón durante la nixtamalización del maíz. Tesis de maestría. IPN- Ciencias Biológicas. México, D.F. 113p.
- Robles, R. R., Murray, E. D., and Paredes-López, O. 1988. Physicochemical changes of maize starch during the lime-heat treatment for tortilla making. *International Journal of Food Science and Technology.* 23:91-98.
- Rendón- Villalobos, R., Bello-Pérez, L. A., Osorio-Díaz, P., Tovar, J., and Paredes-Rodríguez, P., San Martín-Martínez, E., y González, C. G. 2001. Calorimetría diferencial de barrido y rayos-x del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada. *Superficie y Vacío.* 13(12): 61-65.
- Rooney, L. W., and Suhendro, E. L. 1990. Perspectives on nixtamalization (alkaline cooking) of maize tortillas and snacks. *Cereal Foods World.* 44:466-470.

- Rosenberg, H. R., Rohdenburg, E. L., and Eckert, R. E. 1960. Multiple amino acid supplementation of white corn meal. *J. Nutr.* 72:415-422.
- Rutemberg, M. W., and Solarek, D. 1984. Starch derivatives: productions and uses. Pages 312 -388 in: *Starch: Chemistry an Technology*, 2nd ed. R. L. Whistler, J. N. BeMiller. and E. F. Paschall, eds. Academic Press: Orlando, FL.
- Sahai, D., Mua, J. P., Surjewan, I., Buendía, M. O., Rowe, M. and Jackson, D. S. 1999. Assessing degree of cook during corn nixtamaliziatioin: impact of variables. *Cereal Chem.* 76(6): 850-854.
- Salay, E. 1995. Producao, caracterizacao e propiedades de pasta de amido fosfatado obtido por extrusao. Tese apresentada a facultade de engenharia de alimentos da Universidad Estadual de Campinas, para obtenção do titulo de Mestre em Tecnologia de Alimentos. Campinas, Brasil.
- Sandeep, B., and Milford, H. A. 1994. Amylase-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal Chem.* 71(6): 582-587.
- SanMartín-Martínez, E., Jaime-Fonseca, M. R., Martínez-Bustos, F., and Martínez-Montes. 2003. Selective nixtamalization of fractions of maite grain (*Zea mays* L.) and their uses in the preparation of instant tortilla flour analyzed using response surface methodology. *Cereal Chem.* 80(1): 13-19.
- Saura-Cálixto, F., Goñi, I., Bravo, L. and Mañas, E. 1993. Resistant starch in Foods: modified method for dietary fiber residues. *Journal of Food Sci.* 58(3): 642-643

- Schoch, T. J., and Maywald, D. 1956. Microscopic examination of modified Starches. *Anal. Chem.* 28(3): 382-387.
- Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1982. Boletín mensual de información básica del sector agropecuario y forestal. México.
- Serna-Saldivar, S. O. 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. Ed. Tecnológico de Monterrey. México, Pp. 275-305.
- Serna- Saldivar, S. O., Gómez, M. H., and Rooney, L. W. 1990. Technology, chemistry, and nutritional value of alkaline-cooked corn products. En "Advances in cereal science and technology. Vol. X. ACC. Pomeranz. Y. Pp. 243-307.
- Serna- Saldivar, S. O., Rooney, L. W., and Greene, L. W. 1991. Effect of lime treatment on the availability of calcium in diets of tortillas and beans: rat growth and balance studies. *Cereal Chem.* 68(6): 565-570.
- Serna- Saldivar, S. O., Gómez, M. H., Islas- Rubio, A. R., Bockholt, A. J., and Rooney, L. W. 1992. The alkaline processing properties of quality protein maize. Edited by Edwin T. Mertz.
- Serna-Saldivar. S. O., Gomez, M. H., and Roney, L. W. 1987. "Technology, chemistry and nutritional value of alkaline -cooked corn products". *Advances in Cereal Science and Technology.* 10:243-307.
- Scheppach, W., Fabian, C., Ahrens, F., Spengler, M., and Kasper, H. 1988. Effects of starch malabsorbption on colonic function and metabolism in humans. *Gastroenterology.* 95:1549-1555.

- Schierbaum, F., Taufel, K., and Ullman. 1962. Hydration of starch. *Starch/Stärke*, 14:161.
- Schoch, T. J., and Elder, A. L. 1955. Starches in the food industry. *Advances in: Chemistry Series*. 12:21-34.
- Schoch, T. J., and Maywald, E. C. 1956. Microscopic examination of modified starches. *Anal. Chem.* 28(3): 382-387.
- Schweizer, T. F., Reimann, S., Solms, J., Elliasson, A. C., and Asp, N. G. 1986. Influence of drum-drying and twin-screw extrusion cooking on wheat carbohydrates. II. Effect of lipids on physical properties, degradation and complex formation of starch in wheat flour. *J. Cereal Sci.* 4: 249-260.
- Siervert, D., and Pomeranz, Y. 1989. Enzyme-resistant starch I. Characterization and evaluation by enzymatic, thermoanalytical, and microscopic methods. *Cereal Chem.* 66(4): 432-347.
- Sievert, D., and Pomeranz, Y. 1990 Enzyme resistat starch. II. Differential scanning calorimetry studies on heat-treated starches and enzyme resistant starch residues. *Cereal Chem.* 67:217-221.
- Siljeström, M., and Asp, N. G. 1985. Resistant starch formation during baking. Effect of baking time and temperature and variation in the recipe. *Z. Lebensm. Unters Forsch.* 4: 1-81.
- Siljeström, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J., Asp, N. G., and Theader, O. 1986. The effects of various thermal processes an dietary fiber and starch content of whole grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.* 4: 315-323.
- Solís, F. 1998. *La Cultura del Maíz*. Ed. Clío. México. Pp. 11-12.

- Stauffer, C. E. 2000. Emulsifiers as antistaling agents. CEW (FEATURE). March, VOL. 45, No.3.
- Stern, M. H., and Zone, R. O. 1984. Method of grinding and cooking whole grain. Patent U.S. 4,463,002.
- Suhedro, E. L., Almeida-Domínguez, L., Rooney, L. W., Waniska, R. D., and Moreira, R. G. 1998. Tortilla bending technique: An objective method for corn tortilla texture measurement. Cereal Chem. 75: 854-858.
- Suzuki, A., Kanayama, M., Takeda, Y., and S. Hizukuri. 1986. Denpun Kagaku. (33)191.
- Tang, J., and Ding, X. 1994. Relationship between functional properties and macromolecular modification of extruded corn starch. Cereal Chem. 71(4):364-369.
- Tedaldi, J. S. 1985. En: El maíz en México, su pasado, presente y futuro. Usos industriales del maíz demanda actual y futura. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos: México, D.F.
- Tellez-Giron, A., Acuff, G. R., Vanderzant, C., and Rooney, L. W. 1987. The effect of cooking conditions on the quality of table tortillas made from hard and soft corns. (Abstr.) Cereal Foods World. 32:658.
- Thomas, D. J., and Atwell, W. A. 1997. Starches. Eagan Press. Ed. Handbook series, St. Paul, Minnesota, USA. p4.
- Tierramérica. 2000. El Universal. 8(5):25-30.

- Takahashi, S., Maningat, C. C., and Seib, P. A. 1982. Acetylated and hidroxipropilated wheat starch: paste and gel properties compared with modified maize and tapioca starches. *Cereal Chem.* 6(66):499-506.
- Trejo-González, A., Feria-Morales, A., and Wild-Altamirano, C. 1982. The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla production. Pages 245-263 in: *Modification of proteins: Food, Nutritional, and Pharmacological Aspects. Advances in Chemistry, Series 198.* R. E. Feeney and J. R. Whitaker, eds. Am. Chem. Soc. Washington, DC.
- Unlu, E., and Faller, J. F. 1988. Formation of resistant starch a twin-screw extruder. *Cereal Chem.* 75(3): 346-350.
- Vasal, S. K. 1974. El mejoramiento del maíz a nivel mundial en la década de los 70's y el papel del CONACYT. *Memorias el Batán, México.*
- Vásquez, L. F. 1995. Evaluación de los cambios en solubilidad que sufren las proteínas durante el proceso de elaboración de la tortilla de maíz y sus efectos en la textura de la masa y el producto final. Tesis de Maestría. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora. Hermosillo Sonora, México.
- Vaqueiro, C. M., and Reyes, P. 1986. Process for producing nixtamalized corn flour. Patent U.S.4,594,260.
- Vargas-López, M., Paredes-López, O., and Ramírez-Wong, B. 1991. Physicochemical properties of extrusion-cooked amaranth under alkaline conditions. *Cereal Chem.* 68 (6): 610-613.

- Varriano-Marston, E., Ke, V., Huang, G., and Ponte, Jr. J. 1980. Comparison of methods to determine starch gelatinization in bakery foods. *Cereal Chem.* 57:242-248.
- Vázquez, M. B. 1978. Alkaline treatment of corn to prepare. M. Sc., North Dakota State University. USA.
- Vásquez, L. M. 1995. Evaluación de los cambios en solubilidad que sufren las proteínas durante el proceso de elaboración de la tortilla de maíz, y sus efectos en la textura de la masa y el producto final. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Villegas, E. 2000. Maíz de alta calidad proteica (MCP). Énfasis alimentos, tecnología, empaque. 1: 14-20.
- Villegas, E., Vasal, S., and Bjarnason, M. 1990. Quality Protein Maize what is it and how was it developed. Presented at the Quality Protein Maize (QPM) Symposium. Am. Assoc. Cereal Chem. Annual Meeting October 14-18 Dallas, Tx. USA.
- Wang, N., Bhirud, P.R., Sosuiski, F.W., and Tyler, R.T. 1999. Pasta-Like product from pea flour by twin-screw extrusion. *J. Food Sci.* 64 (4):671-677.
- Waniska, R. D. 1976. Methods to asses quality of boiled sorghum, gruel and chapaties from sorghum with different characteristics. M. S. Thesis. Texas A&M. University, College Station, TX.
- Watson A., S., and Ramstad, E. T. 1987. Corn: Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemistry, Inc: St. Paul Minnesota. Cap.3. USA.

- Whistler, R. L., and Daniel, J. R. 1984. Molecular structure of starch. In "starch: Chemistry and Technology," ed. R. L. Whistler, J. N. Bemiller, and E. F. Paschall, pp. 153-182. Academic Press, Inc., New York.
- Williams, P. C., Kuzina, F. D., and Hlynka, I. 1970. A rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.* 47: 411-420.
- Williams, M. A., Horn, R. E., and Rugula, R. P. 1977. Extrusion an in-depth look at a versatile process. *Food Eng.* 49(9):99.
- Wiseman, J., and Inbarr, J. 1990. En: Recent advances in animal nutrition. Pp:79-102. Ed. Butterworths, Londres.
- Wistler, R. L., and James, R. D. 1985. Carbohydrate. Page 115 in: *Foods Chemistry*, O. Fennema, ed. Marcel Dekker. New York.
- Wolf, M. J., Bazua, C. L., MacMasters, M. M., and Rist, C. E. 1952. Structure of the mature corn kernel. *Cereal Chem.* 29:321-382.
- Yau, J. C., Waniska, R. D., and Rooney, L. W. 1994. Effects of food additives on storage stability of corn tortillas. *Cereal Foods World.* 39:396-402.
- Zambrano, M. L., y Gallardo, N. Y. T. 1998. Establecimiento de condiciones de extrusión de un producto rico en fibra. Citados En: Aguilera J. M., Temas de tecnología en alimentos. CYTED, IPN. México pp 113-119.
- Zobel, H. F. 1988. Molecules to granules: a comprehensive starch review. *Starch/stärke.* 40(2):44-50.

Ziegler, G. R., Thompson, D. B., and Casanovas, J. 1993. Dynamic measurement of starch granule swelling during gelatinization. *Cereal Chem.* 70(3): 247-251.