

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

ESCUELA DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

TESINA PROFESIONAL

“LA EXTRUSIÓN COMO MÉTODO ALTERNO PARA LA
ELABORACIÓN DE TORTILLAS DE MAÍZ”

QUE PRESENTA

REBECA MACAZAGA ALVAREZ

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO FARMACOBIOLOGO

ASESOR

D.C. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES

MORELIA, MICH., NOVIEMBRE DEL 2005

ÍNDICE

Pág

Agradecimientos	I
Resumen	II
Capítulo 1	1
1.0 Introducción	1
Capítulo 2	3
2.0 El maíz	4
2.1 La planta del maíz	4
2.2 Estructura del grano de maíz	4
2.3 Estructura	6
2.4 Composición química de las partes del grano	7
2.5 Aplicaciones del maíz	9
Capítulo 3	11
3.0 La tortilla de maíz, su producción y consumo.	11
3.1 Generalidades del proceso de nixtamalización.	11
3.1.1 Nixtamalización: procesos doméstico e industrial.	13
3.1.1.1 Cocción en agua de cal en las zonas rurales	13
3.1.1.2 Cocción industrial en agua de cal	13
3.2 Cambios durante el proceso de nixtamalización	16
3.3 Cambios nutricionales durante el proceso de nixtamalización	18
3.3.1 Aminoácidos	19
3.3.2 Fibra dietética	20
3.4 Desventajas del proceso de nixtamalización	21
3.5 Limitantes tecnológicas del proceso de nixtamalización	22
Capítulo 4	23
4.0 Estudios alternativos al proceso de nixtamalización	23
Capítulo 5	25
5.0 Extrusión	25
5.1 Elementos y funcionamiento de los extrusores	25
5.2 Clasificación de los extrusores	27
5.3 Variables de extrusión	28
5.3.1 Funciones de los extrusores en la industria alimentaria	28
5.4 Aplicaciones de los extrusores	29
5.5 Ventajas del proceso de extrusión.	30
5.6 Cambios químicos por extrusión.	30
5.7 Extrusión como un proceso alterno en la elaboración de masa fresca	

y tortillas de maíz.	31
5.8 Cambios que ocurren en harina, masa y tortilla elaboradas por el proceso de extrusión.	31
5.8.1 Nutricionales	31
5.8.2 Microbiológicos	36
5.8.3 Ensayos biológicos en la absorción de calcio	39
5.8.4 Texturales y sensoriales	41
Capítulo 6	45
6.0 Conclusiones	45
Capítulo 7	46
7.0 Bibliografía	46

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Estructura anatómica del grano de maíz	5
2. Proceso de nixtamalización	12
3. Elementos de un extrusor	26

ÍNDICE DE CUADROS

1. Distribución ponderal de las principales partes del grano de maíz	6
2. Composición química de las partes principales del maíz (%)	7
3. Contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del maíz	8
4. Composición química general de distintos tipos de maíz (%)	8
5. Composición química del maíz y tortilla (% en base seca)	21
6. Medición química y física de los huesos de las ratas.	41

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por estar siempre conmigo y darme la oportunidad de poderme superar cada día y ser mi soporte en los momentos significativos de mi vida.

A mi mamá, Teresa Margarita Álvarez y Rodríguez, por creer en mí, amarme, apoyarme y guiarme en cada paso que he caminado a lo largo de mi vida.

A mi papá, Ricardo Macazaga Fuentes, por su ejemplo, brindarme su apoyo y acompañarme en mi proceso de madurez.

A mis hermanos, Montserrate y Josemaría por su apoyo incondicional, que siempre me alentó a seguir adelante.

A mis amigos, que me han apoyado de manera muy significativa, pues han jugado un papel muy importante a lo largo de toda mi carrera, han compartido conmigo su alegría y han sido motivo de superación. De manera especial a Juan Carlos por su gran estar conmigo, a Beto, Iván, Sandra y Alondra.

Al Laboratorio Aldama por brindarme por apoyarme en mis estudios y compartir conmigo el sueño e impulsarme en mi preparación profesional y personal.

A mi asesor, D. C. Héctor Eduardo Martínez Flores, por creer en mí, compartir sus conocimientos, tiempo, ser guía y clave muy importante en mi superación profesional.

A todos mis maestros y Sinodales, por compartir conmigo sus conocimientos, valores y consejos que han dejado una huella importante en mi persona.

A todos, MIL GRACIAS!!!

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta el proceso de extrusión como una alternativa para la elaboración de la tortilla de maíz. Este proceso es versátil, siendo la tortilla producida por éste método, de gran calidad nutricional, textural, con buena vida de anaquel con ventajas de tipo ecológica, energética y tecnológica.

Algunas de las metodologías propuestas para la elaboración de tortillas de maíz, son: cocimiento alcalino de harina de maíz utilizando vapor; elaboración de harinas instantáneas cociendo y secando una mezcla de harina de maíz con agua y cal en un doble tambor rotatorio; producción de harina instantánea mediante la micronización, método de procesamiento en seco utilizando quemadores de gas infrarrojo; tratamiento del grano de maíz a través de aire caliente, y extrusión.

Estas metodologías han tenido éxito en disminuir el tiempo de procesamiento, del uso de agua y cal. Sin embargo, la calidad de los productos obtenidos no ha sido la adecuada.

Las limitantes en el proceso de nixtamalización son la temperatura y la difusión de agua dentro del grano de maíz. Y desde el punto de vista nutricional, es la pérdida de componentes químicos del grano, las cuales se incrementan con el tiempo de cocimiento, las altas concentraciones de cal y durante el reposo.

En la modernización de la transformación del maíz a tortilla, se deben de considerar los siguientes aspectos: a) Eliminación del agua residual, altamente contaminante (nejayote), b) Mejoría en el valor nutritivo de la tortilla, c) Ahorro de agua, d) Ahorro de energía.

El único sistema de procesamiento que se ha planteado para la elaboración de tortillas de maíz que utiliza el principio de reducción del grano entero de maíz a harina, es el de extrusión. Es un proceso versátil que puede manufacturar una gran cantidad de productos alimenticios.

La extrusión es la generación y uso de un flujo continuo de materias primas para fabricar productos. La palabra extrudir proviene del latín “extrudere” y significa empujar o presionar hacia fuera, expeler o expulsar. La extrusión permite la interacción de diversos componentes, tales como el agua, el vapor y otros líquidos, así como sólidos, los que deben ser continua y uniformemente combinados.

Algunas de las desventajas del proceso de extrusión es que el tratamiento térmico, a pesar de que es por corto tiempo, alcanza a dañar a algunos componentes químicos de los productos extraídos.

Palabras clave: extrusión, nixtamalización, maíz.

CAPÍTULO 1

1.0 INTRODUCCIÓN

La palabra “cereal” deriva del nombre de la diosa romana del grano o de la cosecha, Ceres. Los cereales son semillas de los pastos. Las plantas de las que provienen los cereales son el trigo, arroz, maíz, avena, centeno y cebada (Charley, 2001).

La planta del maíz es un sistema metabólico cuyo producto final es almidón depositado en órganos especializados: los granos. Es un fruto formado por un pericarpio delgado que encierra una semilla simple.

El maíz tiene tres aplicaciones posibles: alimento, forraje y materia prima para la industria, para convertirlo en jarabe de glucosa o “jarabe de maíz” (Fox y Cameron, (2002). En lo que respecta a su aplicación como forraje, en los países desarrollados más del 60 % de la producción se emplea para elaborar piensos compuestos para aves de corral, cerdos y rumiantes.

La mayor parte del maíz que se produce en México se industrializa y consume principalmente en forma de tortillas, un 66 % se procesa por medio de la nixtamalización tradicional y el 34 % en forma de harina instantánea; bajo diversas formas de consumo la tortilla forma parte de la dieta de todos los estratos sociales con un consumo anual *per capita* de 120 Kg y en zonas rurales provee aproximadamente el 70 % del total de las calorías y 50 % de las proteínas ingeridas diariamente.

En la época precolombina, la forma de preparación de tortillas consistía en los siguientes pasos: desgranado manual de la mazorca, cocimiento del grano con cal para obtener el nixtamal, reposo del material durante toda la noche, molienda del maíz en metate, preparación del fogón y elaboración y cocimiento de las tortillas. La preparación de tortillas mediante este proceso tradicional es una tarea ardua, que involucra diversas etapas y consume mucho tiempo.

A pesar de que este proceso ha permanecido sin cambios durante años, presenta limitantes para la época actual y requiere de la aplicación de nuevas tecnologías para ser un proceso que este acorde con los adelantos tecnológicos de la época. Por lo tanto, se han propuesto algunas metodologías para la creación de la tortilla de maíz. Estas metodologías han tenido éxito en disminuir el tiempo del procesamiento, del contenido de agua y de cal. Sin embargo, la calidad de los productos obtenidos no ha sido la adecuada. El único sistema de procesamiento que se ha planteado para la elaboración de tortillas de maíz que utiliza el principio de reducción del grano entero de maíz a harina, es el de extrusión. Uno de los atributos más importantes cuando un proceso trata de sustituir a otro, es que los atributos sensoriales y texturales no se modifiquen sustancialmente, el proceso de extrusión lo logra de manera significativa.

La extrusión es un proceso que fuerza a un material a fluir bajo una gran variedad de condiciones controladas a lo largo de un barril y finalmente lo hace pasar a través de un orificio de diámetro pequeño (2 a 4 mm) conocido como dado o boquilla, a una velocidad determinada. Los extrusores pueden ser usados para realizar diferentes funciones, incluyendo el mezclado, el formato, la expansión, y el secado. La extrusión presenta grandes ventajas respecto a otros sistemas de cocimiento tradicionales como: versatilidad, dar diferente forma y cierta textura a productos, producción continua, operación eficiente del equipo, pasteurización de los productos terminados además de que el procesamiento no genera efluentes (Eastman y col., 2001).

CAPÍTULO 2

2.0 EL MAÍZ

Maíz, palabra de origen indio caribeño, significa literalmente «lo que sustenta la vida». Botánicamente, el maíz (*Zea mays*) el único cereal proveniente del Nuevo Mundo; pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radicular fibroso. Se trata de una especie que se reproduce por polinización cruzada y la flor femenina (elote, mazorca, choclo o espiga) y la masculina (espiguilla) se hallan en distintos lugares de la planta. Las panojas -a menudo, una por tallo- son las estructuras donde se desarrolla el grano, en un número variable de hileras (12 a 16), produciendo de 300 a 1 000 granos, que pesan entre 190 y 300 g por cada 1 000 granos. El peso del grano depende de las distintas prácticas genéticas, ambientales y de cultivo. El grano constituye aproximadamente el 42 % del peso en seco de la planta. El maíz es a menudo de color blanco o amarillo, aunque también hay variedades de color negro, rojo y jaspeado. Hay varios tipos de grano que se distinguen por los diferentes compuestos químicos depositados en él.

Las variedades cultivadas fundamentalmente para alimentación comprenden el maíz dulce y el reventador, aunque también se usan en buena medida el maíz dentado, el amiláceo o harinoso y el cristalino; este último también se utiliza para pienso. El maíz normal inmaduro en la panoja es objeto de gran consumo, ya sea hervido o tostado. El maíz harinoso es un grano con endospermo blando que se emplea mucho como alimento en México, Guatemala y los países andinos. El maíz de tipo dentado tiene un endospermo calloso y vítreo a los lados y en la parte posterior del grano, en tanto que el núcleo central es blando. El maíz de tipo cristalino posee un endospermo grueso, duro y vítreo, que encierra un centro pequeño, granuloso y amiláceo.

2.1 LA PLANTA DEL MAÍZ

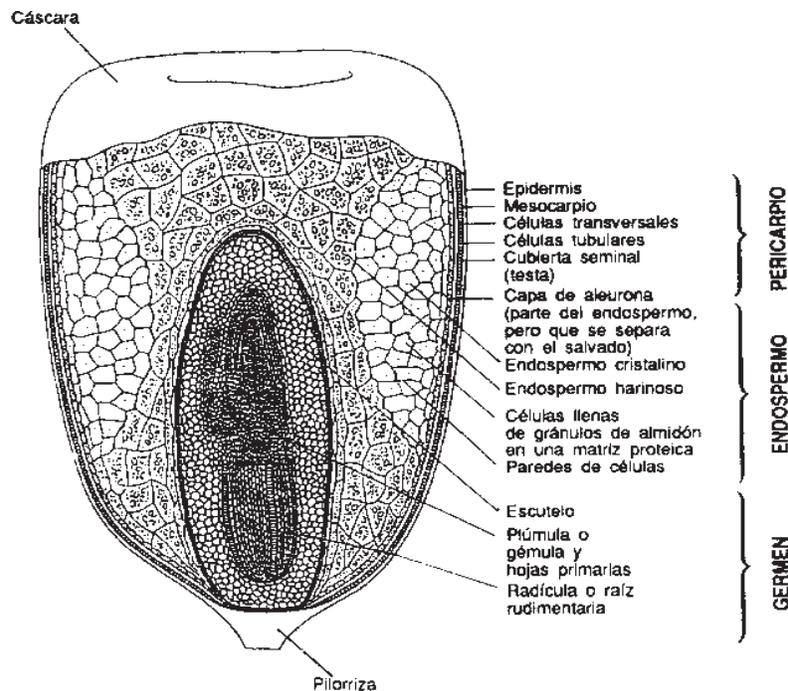
Se puede definir la planta del maíz como un sistema metabólico cuyo producto final es almidón depositado en órganos especializados: los granos. El desarrollo de la planta se puede dividir en dos fases fisiológicas. En la primera, o fase vegetativa, se desarrollan y diferencian distintos tejidos hasta que aparecen las estructuras florales. La fase vegetativa consta de dos ciclos. En el primero se forman las primeras hojas y el desarrollo es ascendente; en este ciclo, la producción de materia seca es lenta y finaliza con la diferenciación tisular de los órganos de reproducción. En el segundo ciclo se desarrollan las hojas y los órganos de reproducción; este ciclo acaba con la emisión de los estigmas.

La segunda fase, también llamada fase de reproducción, se inicia con la fertilización de las estructuras femeninas que se diferenciarán en espigas y granos. La etapa inicial de esta fase se caracteriza por el incremento de peso de las hojas y otras partes de la flor; durante la segunda etapa, el peso de los granos aumenta con rapidez (Tanaka y Yamaguchi, 1972).

2.2 ESTRUCTURA DEL GRANO DE MAÍZ

Los granos de maíz se desarrollan mediante la acumulación de los productos de la fotosíntesis, la absorción a través de las raíces y el metabolismo de la planta de maíz en la inflorescencia femenina denominada espiga. Esta estructura puede contener de 300 a 1,000 granos según el número de hileras y el diámetro y longitud de la mazorca. El peso del grano puede variar, de 19 a 30 g por cada 100 granos. Durante la recolección, las panojas de maíz son arrancadas manual o mecánicamente de la planta. Se pelan las brácteas que envuelven la mazorca y luego se separan los granos a mano o, mecánicamente.

El grano de maíz se denomina en botánica cariósida o cariopsis; cada grano contiene el revestimiento de la semilla, o cubierta seminal, y la semilla.



(Facilitado por el Wheat Flour Institute, Chicago, Illinois, 1964)

Figura 1. Estructura anatómica del grano de maíz.

En la Figura 1 se muestran las cuatro estructuras físicas fundamentales del grano: el pericarpio, cáscara, o salvado; el endospermo; el germen o embrión; y la piloriza (tejido inerte en que se unen el grano y el carozo). Wolf y col. (1952) y Wolf y col. (1969) han descrito la anatomía general y la estructura microscópica de estos elementos anatómicos. También han estudiado la estructura del maíz opaco-2 mejorado y han determinado que se diferencia del común en el endospermo: su matriz proteica es más delgada y presenta menos y más pequeños cuerpos proteicos, pues en el maíz opaco-2 se da una limitación de la síntesis de zeína.

La distribución ponderal de las distintas partes del grano se indica en el Cuadro 1. Al endospermo, la parte de mayor tamaño, corresponde del 80 a 85 % del peso del grano, en tanto que el germen equivale por término medio al 11 % y el pericarpio del 5 al 6 %. El resto está constituido por la piloriza, estructura cónica que junto con el pedicelo une el grano a la espiga.

CUADRO 1. Distribución ponderal de las principales partes del grano de maíz.

Estructura	Porcentaje de distribución ponderal (%)
Pericarpio	5-6
Aleurona	2-3
Endospermo	80-85
Germen	10-12

2.3 ESTRUCTURA

El grano de maíz, al igual que los granos de cualquier cereal, es conocido botánicamente como “cariopsis”, es decir, se trata de un fruto formado por un pericarpio delgado que encierra una semilla simple. El pericarpio lo forman una serie de capas celulares, la más interna de ellas recibe el nombre de cubierta de la semilla. Para todos los cereales se dice que el pericarpio es la pared madura del ovario y que no se abre durante el secado-maduración para liberar la semilla, formando así, la cariopsis.

La semilla está formada por el endospermo y el germen. El pericarpio, por ejemplo, protege a la semilla; el endospermo contiene materiales de reserva, energía principalmente y enzimas hidrolíticas, necesarias para el desarrollo de la nueva planta; la función principal del germen es la de contener la información genética siendo esta parte la que inicia el crecimiento para formar el embrión.

El endospermo, la estructura anatómica de mayor volumen en el grano de maíz, está formado por una capa celular llamada Aleurona, lugar donde también residen enzimas hidrolíticas. Además de ella, se encuentra el endospermo propiamente dicho, formado por dos regiones típicas (Robles y col, 1988).

2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PARTES DEL GRANO

Como se muestra en el Cuadro 2, las partes principales del grano de maíz difieren en su composición química. El pericarpio contiene principalmente fibra cruda, aproximadamente el 87 %, la que a su vez está formada por hemicelulosa (67 %), celulosa (23 %) y lignina (0.1 %) (Burge y Duensing, 1989). El endospermo, en cambio, contiene un nivel elevado de almidón (87 %), aproximadamente 8 % de proteínas y un contenido de grasas crudas relativamente bajo (0.8 %).

CUADRO 2. Composición química de las partes principales del maíz (%).

Componente químico	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	Germen (%)
Proteínas	3.7	8.0	18.4
Extracto etéreo	1.0	0.8	33.2
Fibra cruda	86.7	2.7	8.8
Cenizas	0.8	0.3	10.5
Almidón	7.3	87.6	8.3
Azúcar	0.34	0.62	10.8

Fuente: *Watson y Ramstad(1987)*

El germen se caracteriza por un alto contenido de grasas (33 %), de proteínas (próximo al 20 %) y minerales. Por otro lado, la capa de aleurona, contiene un alto porcentaje de proteínas (alrededor del 19 %) y de fibra cruda. Mostrados con mayor detalle en los cuadros 3 y 4.

CUADRO 3. Contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del maíz.

Aminoácido	Endospermo (1.26 % de N)		Germen (2.32 % de N)		Modelo FAO/OMS 1973
	mg %	mg/g N	mg %	mg/g N	
Triptófano	48	38	144	62	60
Treonina	315	249	622	268	250
Isoleucina	365	289	578	249	250
Leucina	1,024	810	1 030	444	440
Lisina	228	180	791	341	340
Total azufrados	249	197	362	156	220
Fenilalanina	359	284	483	208	380
Tirosina	483	382	343	148	380
Valina	403	319	789	340	310

CUADRO 4. Composición química general de distintos tipos de maíz (%).

Tipo	Humedad	Cenizas	Proteínas	Fibra cruda	Extracto etéreo	Hidratos de carbono
Salpor	12.2	1.2	5.8	0.8	4.1	75.9
Cristalino	10.5	1.7	10.3	2.2	5.0	70.3
Harinoso	9.6	1.7	10.7	2.2	5.4	70.4
Amiláceo	11.2	2.9	9.1	1.8	2.2	72.8
Dulce	9.5	1.5	12.9	2.9	3.9	69.3
Reventador	10.4	1.7	13.7	2.5	5.7	66.0
Negro	12.3	1.2	5.2	1.0	4.4	75.9

Fuente: Cortez y Wild-Altamirano (1972).

2.5 APLICACIONES DEL MAÍZ

El maíz tiene tres aplicaciones posibles: alimento, forraje y materia prima para la industria. Como alimento, se puede utilizar todo el grano, maduro o no, o bien se puede elaborar con técnicas de molienda en seco para obtener un amplio número de productos intermedios, como por ejemplo, sémola de partículas de diferentes tamaños, sémola en escamas, harina y harina fina, que a su vez tienen un gran número de aplicaciones en una amplia variedad de alimentos; se debe notar que el maíz cultivado en la agricultura de subsistencia continúa siendo utilizado como cultivo alimentario básico. En lo que respecta a su aplicación como forraje, en los países desarrollados más del 60 % de la producción se emplea para elaborar piensos compuestos para aves de corral, cerdos y rumiantes; en los últimos años, aun en los países en desarrollo en los que el maíz es un alimento fundamental, se utiliza un porcentaje más elevado de la producción como ingrediente para la fabricación de piensos. Desde hace relativamente poco, el maíz «de elevada humedad» ha despertado gran interés como alimento para animales, debido a su menor costo y a su capacidad de mejorar la eficiencia de la transformación de los alimentos. Los subproductos de la molienda en seco son el germen y la cubierta seminal el primero se utiliza para obtener aceite comestible de elevada calidad mientras que la cubierta seminal, o pericarpio, se emplea fundamentalmente como alimento, aunque en los últimos años ha despertado interés como fuente de fibra dietética (Burge y Duensing, 1989). La molienda húmeda es un procedimiento que se utiliza fundamentalmente en la aplicación industrial del maíz, aunque el procedimiento de cocción en solución alcalina empleado para elaborar las tortillas (el pan fino y plano de México y otros países de América Central también es una operación de molienda húmeda que sólo elimina el pericarpio (Bressani, 1990). La molienda húmeda produce almidón de maíz y subproductos entre los que figura el gluten que se utiliza como ingrediente alimenticio, mientras que el germen de maíz elaborado para producir aceite da como subproducto harina de germen que se utiliza como pienso; ha habido algunos intentos de emplear dichos subproductos para el consumo humano en distintas mezclas y formulaciones alimenticias.

El aumento de los precios del petróleo ha impulsado la intensificación de las investigaciones sobre la fermentación del maíz para producir alcohol combustible, el cual tiene un uso muy difundido en algunas partes de los Estados Unidos. Con maíz fermentado se elaboran también algunas bebidas alcohólicas.

Por último, también tienen importancia las aplicaciones de los residuos de la planta de maíz, que se utilizan, entre otras cosas, como alimento para animales y como base para extraer diversos productos químicos de las panojas, como por ejemplo, furfural y xilosa. Estos residuos también tienen importancia como elementos para mejorar los suelos (Martínez-Flores y col., 1997).

La mayor parte del maíz que se produce en México se industrializa y consume principalmente en forma de tortillas (63.4 %), del que un 66 % se procesa por medio de la nixtamalización tradicional y el 34 % en forma de harina instantánea; bajo diversas formas de consumo la tortilla forma parte de la dieta de todos los estratos sociales con un consumo anual *per capita* de 120 Kg. y en zonas rurales provee aproximadamente el 70 % del total de las calorías y 50 % de las proteínas ingeridas diariamente (Khan y col., 1980) ; a partir de la harina instantánea se elaboran atoles, tamales, botanas, etc. También del total de maíz consumido el 20.6 % se destina para consumo animal, el 3.7 % se industrializa para producir jarabes, almidones y cereales para desayuno, el 1.5 % se utiliza como semilla para siembra, y el 10.3 % representa el volumen de pérdidas.

CAPÍTULO 3

3.0 LA TORTILLA DE MAÍZ, SU PRODUCCIÓN Y CONSUMO

La tortilla constituye el alimento más característico e importante de México y de algunos países de América Central, se emplea como producto básico para la elaboración de innumerables alimentos tradicionales como son los tacos, totopos, botanas, enchiladas, y nachos entre muchos otros (McWard, 1993).

3.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

En la antigüedad la forma de preparación de tortillas consistía de los siguientes pasos: desgranado manual de la mazorca, cocimiento del grano con cal para obtener el nixtamal (del náhuatl *nextli*, que significa cal de cenizas y *tamalli*, masa cocida de maíz) (Cabrera, 1992), reposo del material durante toda la noche, molienda del maíz en metate, preparación del fogón y elaboración y cocimiento de las tortillas (Museo de Culturas Populares, 1982). La preparación de tortillas mediante este proceso tradicional es una tarea ardua, que involucra diversas etapas y consume mucho tiempo. A través del tiempo prevaleció esta forma de elaborar tortillas y en la actualidad se continúa realizando en algunos poblados; sin embargo, considerando la problemática que ello implica y aunado al crecimiento de la población urbana, se hizo necesario un cambio para la que la transformación del maíz en masa de nixtamal y tortillas dejara de ser manual. Es por ello que en el presente siglo surgió una industria nacional, original y propia para transformar el maíz y elaborar tortillas. El corto tiempo en que la masa puede ser usada para elaborar tortillas y el gusto por consumirlas recién cocidas, propiciaron la formación de una industria descentralizada en millares de establecimientos pequeños, lo mismo en el campo que en la ciudad. A pesar de que surgieron una serie de cambios, como el empleo de máquinas desgranadoras, la aplicación de molinos para moler el nixtamal, troquelado automático de tortillas y el uso de hornos para el cocimiento de las tortillas, el proceso actual de elaboración de tortillas emplea básicamente las mismas etapas que en sus inicios (Robles et al, 1988).

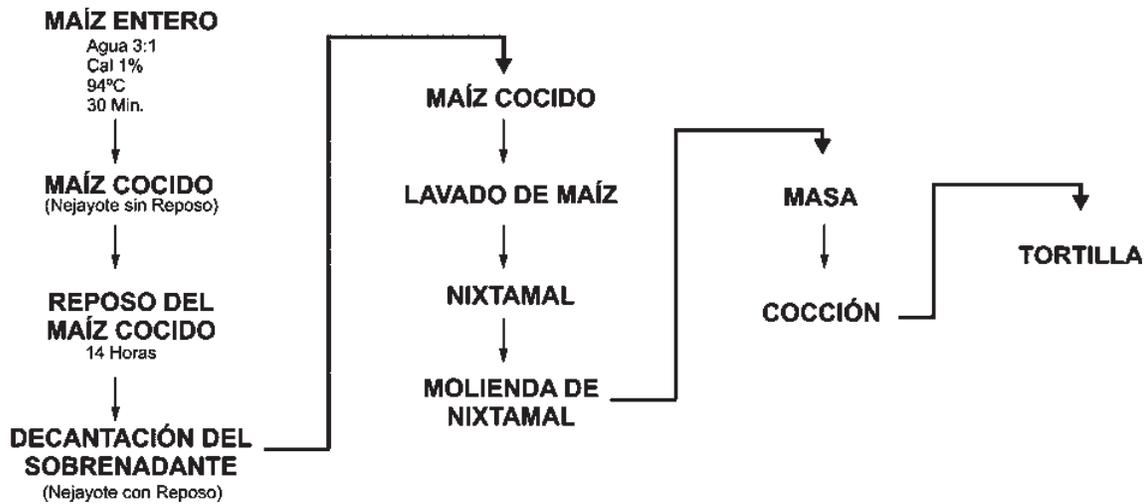


Figura 2. Proceso de Nixtamalización

3.1.1 NIXTAMALIZACIÓN: PROCESOS DOMÉSTICO E INDUSTRIAL.

3.1.1.1 Cocción en agua de cal en las zonas rurales

El proceso de nixtamalización, tal como se lleva a cabo en las zonas rurales de México, consiste en mezclar una parte de maíz integral con dos partes de una solución de cal a aproximadamente el 1 %. La mezcla se calienta a 80 °C durante un lapso de 20 a 45 min y luego se deja reposar toda la noche, de 8 a 10 horas. Posteriormente, se decanta el líquido cocido y el maíz, denominado entonces nixtamal, se lava dos o tres veces con agua para eliminar las cubiertas seminales, las pilorizas, la cal sobrante y las impurezas del grano. La añadidura de cal en las fases de cocción y de remojo contribuye a eliminar las cubiertas seminales; los subproductos se desechan o bien sirven para alimentar ganado porcino. Originalmente, se convertía el maíz en masa moliéndolo varias veces con una piedra plana hasta que las partículas gruesas alcanzaran la finura requerida; actualmente, la molienda inicial se realiza con un aparato de moler carne o con molinillos de disco y luego se refina la masa con la piedra. Para acabar, se toman unos 50 g de masa y se aplanan, tostándolo luego por ambos lados en una plancha caliente o placa de

arcilla. En Guatemala se sigue un proceso similar, descrito por Bressani y col. (1958b), en el que se usa tanto el maíz blanco como el amarillo, pero la concentración de cal varía de 0.17 % a 0.58 % según el peso del maíz, con una proporción entre el grano y el agua de 1: 1.2, y el tiempo de cocción varía de 46 a 67 min a una temperatura de 94 °C. El resto del proceso es en lo fundamental idéntico, salvo que la masa se prepara con un molinillo de disco y se tuesta durante unos cinco minutos a una temperatura cerca de 170 °C en los bordes y de 212 °C en el centro.

Si se utiliza maíz recién cosechado, se emplea menos cal y se disminuye el tiempo de cocción; sucede a la inversa si el grano es más viejo y seco. Las pérdidas de materia seca ascienden aproximadamente al 15 %, pero pueden variar entre el 8.9 % y el 21.3 %.

3.1.1.2 Cocción industrial en agua de cal

Diversos factores, como la migración del campo a la ciudad, hicieron surgir una demanda de tortillas cocinadas o precocidas. Se ideó el equipo necesario para transformar el maíz en bruto en maíz tratado con cal y, posteriormente, en masa y tortillas; y se inició luego la producción industrial de harina para tortilla en México y otros países. Poco después de la Segunda Guerra Mundial, la producción mecanizada de tortillas adquirió importancia en México. En las zonas urbanas hay dos variantes: la primera consiste en pequeñas industrias caseras de propiedad familiar que siguen el procedimiento descrito anteriormente, aunque también utilizan máquinas de mayores dimensiones para atender a un mercado relativamente más amplio. Esto ha sido posible gracias al empleo de molinos rotatorios y del tortillero; dichas máquinas fueron sustituidas posteriormente por un modelo más eficiente, en el que se pasa la masa por un tambor metálico rotatorio que la corta en forma de tortillas; éstas caen a una cinta transportadora o sartén de cocción continua y desembocan en un receptáculo situado al final de la cinta. Esta pequeña tecnología puede utilizar harina industrial para tortillas o maíz integral, en cuyo caso la masa se cuece en receptáculos de grandes dimensiones.

La otra variante es la transformación industrial a gran escala del maíz en harina instantánea precocida para tortillas. El procedimiento, que ha sido descrito por diversos investigadores (Deschamps, 1985), se basa en el método utilizado tradicionalmente en las zonas rurales. Más recientemente, se ha extendido el procedimiento de producción de harina a la producción de tortillas.

El comprador elige el maíz tras examinar su calidad y tomar muestras. Rechaza los lotes que tienen un porcentaje elevado de granos deteriorados y paga los que acepta según los defectos que presente el material en bruto. El maíz también se selecciona según su contenido de humedad, pues si el grano tiene humedad elevada planteará problemas de almacenamiento. Durante la fase de limpieza, se eliminan todas las impurezas, como suciedad, zuros y hojas. Una vez limpio, el maíz se envía a los silos y depósitos para su almacenamiento. De ahí, se transporta a las instalaciones de elaboración para su cocción en agua de cal, convirtiéndolo en nixtamal, ya sea en tandas o mediante un procedimiento de elaboración continua. Tras su cocción y macerado, el maíz tratado en agua de cal se lava con agua a presión y se tritura hasta que forme una masa que se lleva a un secador y se convierte en harina basta. Dicha harina, formada por partículas de todos los tamaños, se pasa por un tamiz que separa las partículas gruesas de las finas. Las partículas gruesas regresan al molino para ser trituradas otra vez y las finas, que constituyen el producto acabado, se envían a las instalaciones de empaquetado, donde se depositan en bolsas de papel reforzado. (Del Valle, 1972)

Una instalación completa de tratamiento debe tener maquinaria para realizar las siguientes operaciones: cocción en agua de cal, molienda, secado y cernido, así como una capacidad de producción diaria de 30 a 80 toneladas de harina. Estas cifras son el mínimo y el máximo; para aumentar su capacidad de producción, una empresa comercial debe instalar varias unidades paralelas, aunque el empleo de unidades de esas dimensiones suele deberse más a la tradición que a una exigencia técnica, pues es perfectamente factible diseñar fábricas con una capacidad de producción inferior a 30 y superior a 80 toneladas al día. Al parecer, no se consideran viables las fábricas de dimensiones más grandes o menos reducidas.

El rendimiento industrial de la harina de maíz cocido en agua de cal fluctúa entre el 86 y el 95 %, según el tipo del cereal, localidad de los granos enteros y las condiciones en que se realiza el tratamiento con cal. Los rendimientos industriales son más elevados que en el medio rural y en condiciones semiindustriales, gracias quizá a la calidad del grano elaborado.

La harina para tortilla es un polvo fino, seco, blanco o amarillento que tiene el olor característico de la masa de maíz. Dicha harina, mezclada con agua, proporciona una masa adecuada para elaborar tortillas, tamales, y otros alimentos.

Cuando la harina tiene un contenido de humedad del 10 al 12 %, es estable frente a la contaminación microbiana. Si la humedad supera el 12 %, la atacan con facilidad los mohos y las levaduras. El problema del ataque por bacterias es casi inexistente dado que el mínimo de humedad que esos organismos necesitan para desarrollarse es tan elevado que, de alcanzarlo la harina, ya se habría transformado en masa. Otra cuestión conexas con la estabilidad de la harina es la rancidez, que normalmente no constituye un problema salvo que se empaquete a altas temperaturas. El tiempo mínimo para que la harina se eche a perder en México es de cuatro a seis meses en invierno y de tres meses en verano. Por lo general, se vende al consumidor dentro de los 15 días siguientes a su venta a los comerciantes al por menor y al por mayor, mientras que su período de conservación en los anaqueles es de un mes (Del Valle, 1972).

Las tortillas a base de harina de maíz cocido en agua de cal se pueden producir en el hogar o en fábricas, tanto grandes como pequeñas, porque presentan grandes ventajas para ese tipo de confección aunque su empleo no está muy difundido en las zonas rurales.

3.2 CAMBIOS DURANTE EL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

A continuación se integra una síntesis de los aspectos más relevantes acerca de la química del proceso de nixtamalización:

Bressani y col. (1958b) reportan una pérdida generalizada de nutrimentos, excepto del calcio, a consecuencia de la nixtamalización. Para dar una explicación al mayor crecimiento de ratas alimentadas con tortilla, proponen una disminución en la solubilidad de las diferentes fracciones proteicas, sobre todo de la zeína, dando como resultado una acción enzimática más efectiva sobre las fracciones proteicas solubles en sal y agua, que son de mayor valor nutricional.

Molina y col. (1977) encontraron que el nivel en el cual el almidón del maíz es gelatinizado durante la nixtamalización, es una medida que se reflejará en las propiedades de la masa. También reportan que la máxima viscosidad que logra una suspensión de harina nixtamalizada en el Amilógrafo, es un índice de la gelatinización del almidón, un indicativo de la extensión del cocimiento y del grado de cohesión entre la masa.

Martínez y Lachance (1979) mencionan que la dureza de los granos de maíz individuales puede ser una medida para predecir tiempos de cocimiento, ya que, dicen, hasta la fecha se depende de personal experimentado que empíricamente deciden el final del cocimiento en la nixtamalización. Reportan que el Ca(OH)_2 en una solución caliente se disocia mejor que a temperatura ambiente, y que los iones OH^- sirven para hidrolizar las celulosas y hemicelulosas del pericarpio y que, muy probablemente, el ión Ca^{++} sea unido a los polímeros del maíz.

Cortéz y Wild - Altamirano (1972) reportan que la tenacidad de la masa del maíz nixtamalizado, medida en el Mixógrafo de Swanson, puede servir para diferenciar a las diferentes variedades de este cereal. Concluyen que existe una relación entre el contenido de proteína, la dureza del grano y la tenacidad de Swanson.

Trejo y col. (1982), incluyen en su estudio de nixtamalización al maíz opaco-2, el cual, al ser nixtamalizado se caracterizó por una notable disminución en el contenido de grasa. Al determinar la movilidad de las fracciones proteicas en electroforesis en gel de poliacrilamida, encontraron que todas las fracciones presentan la misma movilidad, antes y después de la nixtamalización. Así mismo, establecen que las condiciones del tratamiento provocan la completa gelatinización de los gránulos de almidón, evidenciada por la pérdida de la birrefringencia. Concluyen que, probablemente, el ión Ca^{++} quede unido a las cadenas tanto de hemicelulosa como de almidón.

Sanderson y col. (1978) estudiaron los efectos del tratamiento alcalino sobre los aminoácidos del maíz, encontrando que existe pérdida de arginina y cisteína. Reportan también la aparición de lisinoalanina, lantionina y ornitina. Proponen que los posibles efectos antifisiológicos de estos aminoácidos deberían de estudiarse más cuidadosamente.

Bedolla y col (1983) mencionan que la textura de la masa elaborada con maíz nixtamalizado dependerá de la textura del endospermo del maíz que se esté usando, del proceso de secado a que fue sometido el grano y del almacenamiento. Explican que la medición de la dureza de un conjunto de granos y no granos individuales como lo proponen Martínez y Lachance (1979) puede ser un índice para predecir el tiempo de cocimiento de diferentes variedades de maíz. Encuentran una relación lineal y negativa entre el tiempo de cocimiento y la textura del maíz cocido a diferentes tiempos.

Khan y col. (1980) señalan que la masa de maíz nixtamalizado es en realidad una mezcla de gránulos de almidón gelatinizados y de gránulos sin gelatinizar, mencionando que la molienda favorece la mezcla y que esta aumenta el daño del almidón. Concluyen que el método enzimático no es apropiado para medir la extensión de la gelatinización en una muestra de cereal procesada, por ser muy variable y de poca sensibilidad.

3.3 CAMBIOS NUTRICIONALES DURANTE EL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

El tratamiento térmico –alcalino del maíz es un proceso fundamental para mejorar el valor nutritivo del grano (Museo de culturas populares, 1982). Las proteínas del maíz son de un bajo valor nutricional, particularmente debido a que la mayor parte de ellas se componen de zeína, proteína altamente deficiente en lisina y triptofano (Maner, 1990; Bazúa, 1979), mejorando su calidad después de haber sido sujetas al proceso de nixtamalización. Esto es atribuido probablemente a una disminución relativa de la solubilidad de la porción zeína de la proteína de maíz (Guerra, 1978), mientras que la glutenina de mayor valor nutricional, incrementa su solubilidad y con ello la disponibilidad de aminoácidos esenciales (Bressani y col., 1958b; Paredes-López y Saharópulos-Paredes, 1982).

La enfermedad de la pelagra, conocida como la enfermedad de las 3 D, es causante de dermatitis, demencia y diarrea, ocurre en poblaciones cuya dieta está basada en el maíz sin tratamiento térmico alcalino. La pelagra se presenta debido a deficiencias de niacina y triptofano en la dieta. El triptofano es el precursor de la síntesis de niacina en el ser humano, y su equivalencia es de 60 mg de triptofano por 1 mg de niacina. Otro factor que influye en el desarrollo de la pelagra es la elevada concentración de leucina en el maíz, que es de un 12 a un 15 % de la proteína. Sin embargo, el contenido de leucina en el maíz se reduce debido a su degradación durante el tratamiento térmico-alcalino, lo que mejora el valor nutritivo de la proteína (Badui, 1993). La niacina en el maíz esta unida a otros constituyentes del grano de tal forma que el tratamiento térmico-alcalino la liberan al hidrolizar los enlaces que la unen, haciéndola disponible (Badui, 1993).

Trejo y col. (1982) realizaron estudios enfocados al aspecto nutricional del calcio en relación al proceso de nixtamalización. Dichos autores indican que el calcio se incorpora al grano de maíz durante la nixtamalización, enlazándose con el almidón y aumentando aproximadamente 3 veces la cantidad de calcio unida al almidón en relación al calcio determinado en muestras sin nixtamalizar. La alta disponibilidad de calcio en la tortilla es importante porque evita la osteoporosis que se manifiesta como fragilidad de los huesos por pérdida de masa del sistema óseo

(Vargas, 1992; Niewohner, 1988). La utilización de hidróxido de calcio en la transformación del maíz en tortillas aumento considerablemente (hasta en un 400 %) el contenido de calcio del producto. Diversos estudios de biodisponibilidad llevados a cabo con animales por Braham y Bressani (1966) mostraron que había menos calcio disponible en el maíz tratado en agua de cal (85.4 %) que en la leche desnatada (97 %). La biodisponibilidad del calcio aumentó cuando se suplementó el maíz tratado en agua de cal con sus aminoácidos limitantes, esto es, lisina y triptofano. Poneros y Erdman (1988) han confirmado la elevada biodisponibilidad de calcio de las tortillas con o sin adición de ácido ascórbico. Como ya se indicó en una sección anterior, el empleo de hidróxido de calcio mejora la proporción calcio/ fósforo de las tortillas, lo que posiblemente favorece la utilización de los iones de calcio por parte del animal de experimentación. Se trata de un resultado importante para las poblaciones cuyas dietas tienen una escasa proporción de este mineral esencial. Además, el descubrimiento de que una mejor calidad de las proteínas del maíz favorece la biodisponibilidad del calcio tiene importancia nutritiva y es un motivo más para producir comercialmente MPC destinado a las personas cuya nutrición se basa fundamentalmente en el maíz.

3.3.1 Aminoácidos

Bressani y Scrimshaw (1958a) realizaron estudios mediante la digestión enzimática *in vitro* con pepsina, tripsina y pancreatina. Al final de la digestión de la pepsina se puso de manifiesto que la cantidad de alfaamina, en porcentaje respecto al nitrógeno digerido, era el doble en las tortillas (43.1 %) que en el maíz (21.4 %); también se hallaron niveles de histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina y triptofano más elevados en el hidrolizado de las tortillas que en el del maíz, lo que indica una liberación más rápida de las proteínas. Dichos investigadores opinaron que la diferencia de ritmo de liberación podría deberse a la considerable disminución de la solubilidad de la fracción proteica de la prolamina de las tortillas, frente a la del maíz. Serna-Saldivar y col. (1987), en cambio, experimentando con ganado porcino al que se había colocado una sonda en el íleon, hallaron que la digestibilidad de la mayoría de los aminoácidos esenciales en ese

nivel del tracto intestinal era algo superior en el caso del maíz cocido en agua común que en el cocido en agua de cal. La digestibilidad de las proteínas disminuyó en forma leve, posiblemente a causa del tratamiento con calor que forma parte del proceso (Bressani, 1990). Otros investigadores han afirmado que, durante la elaboración del maíz, la existencia de interacciones hidrofóbicas, la desnaturalización de las proteínas y su degradación probablemente dan lugar a cambios de la solubilidad de dichos elementos, que podrían influir en la liberación de aminoácidos durante la digestión enzimática.

3.3.2 Fibra dietética

Se ha demostrado experimentalmente que, al transformar el maíz en tortillas mediante cocción alcalina, la fibra dietética total disminuye en la fase de la masa y aumenta en las tortillas hasta niveles sólo ligeramente inferiores a los del maíz sin tratar. Según dichos estudios, los niveles de fibra dietética total de las tortillas ascendían por término medio al 10 % del peso en seco. Si una persona consume unos 400 g de tortilla (peso en seco), la ingesta total de fibra dietética será de 40 g, valor considerablemente mayor que el de la ingesta recomendada. Aun los niños de corta edad pueden consumir cantidades relativamente grandes de fibra que pueden influir en la disponibilidad de hierro. Braham y Bressani (1966) y Poneros y Erdman (1988) demostraron que el calcio de las tortillas es altamente disponible y que ésta aumenta si se mejora la calidad de las proteínas añadiendo los aminoácidos limitantes.

Como se ha indicado en diversos estudios, la disponibilidad de zinc podría depender de un exceso de calcio, en lugar de la fibra dietética.

<http://www.fao.org/docrep/T0395S/T0395S06.htm>

3.4 DESVENTAJAS DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

Las desventajas que presenta el proceso de nixtamalización, desde el punto de vista nutricional, es la pérdida de componentes químicos del grano, las cuales se incrementan con el tiempo de cocimiento, altas concentraciones de cal y durante el reposo. Fragmentos de pericarpio, almidón, proteína, germen y cal, constituyen la mayor porción de materia seca en el agua de cocimiento. Del germen se pierden aproximadamente un 41.5 % de los lípidos y el 41.5 % de los carbohidratos. Existen pérdidas de tiamina, riboflavina y niacina del 60, 52 y 32 %, respectivamente en relación al total del grano. Así como 44 y 46 % de reducción de lípidos y fibra cruda (Báez-Ramírez y Martínez-Borrego, 1990). A pesar de existir pérdidas de nutrientes, el maíz nixtamalizado presenta mayor valor nutricional que el maíz crudo, ya que el resultado de algunos estudios indican un aumento de lisina, de triptofano y la relación leucina-isoleucina se incrementa en 1.8 veces (Bressani, 1958 a; Katz y col., 1974). En el cuadro 5 se muestran diferentes datos reportados por varios investigadores respecto a la composición química del maíz y tortilla.

CUADRO 5. Composición química del maíz y tortilla (% en base seca).

Producto	Proteína (N x 6.25)	Lípidos	Carbohidratos	Cenizas	Fibra Cruda
Maíz (a)	9.6	5.1	84.0	1.3	1.5
Nixtamal	10.3	3.9	84.3	1.5	1.3
Tortilla	10.7	3.0	84.7	1.5	1.1
Nixtamal	11.1	4.6	--	1.5	--
Tortilla	11.2	4.4	--	1.6	--
Tortilla (b)	10.7	2.3	89.0	1.6	--
Tortilla (c)	9.7	1.5	86.0	1.8	2.4

(a) Datos de Bressani y col. (1985).

(b) Datos de V. W. Krause (1985). Promedio de 50 tortillas elaboradas con el método tradicional de Guatemala

(c) Datos de Saldaña y Brown, (1984)

Fuente: Serna y col. (1990)

3.4 LIMITANTES TECNOLÓGICAS DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

La nixtamalización es un proceso desarrollado por nuestros ancestros y continua siendo utilizado como base en la producción industrial de tortillas. A pesar de que este proceso ha permanecido sin cambios durante años, es un proceso que presenta limitantes para la época actual y requiere de la aplicación de nuevas tecnologías para ser un proceso que este acorde con los adelantos tecnológicos de la época.

En la modernización de la transformación del maíz a tortilla, se deben de considerar los siguientes aspectos: a) La eliminación del agua residual, altamente contaminante (nejayote). El nejayote tiene un pH alcalino que provoca incrustaciones a las tuberías del drenaje y contiene una gran cantidad de sólidos solubles (5 al 14 %), que favorece el desarrollo de microorganismo b) Mejoría en el valor nutritivo de la tortilla. Durante la etapa del cocimiento alcalino del grano de maíz se desprende el pericarpio y se solubilizan algunos compuestos nitrogenados, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales. c) Ahorro de agua. El proceso tradicional desperdicia una gran cantidad de agua empleada durante las etapas de cocimiento y lavado de nixtamal, que no es recuperada, debido a que las plantas de tratamientos de agua son costosas. Es importante para el ahorro de agua que se desarrolle un proceso en el que el agua adicionada solamente sea la necesaria para la obtención de tortillas y, d) Ahorro de energía. Durante el calentamiento del agua utilizada para el cocimiento de los granos de maíz, se requiere inicialmente que el calor generado de la combustión del gas se absorba y difunda hasta el agua, que es un material con bajo coeficiente de difusividad térmica, y posteriormente, que el calor se introduzca al interior del grano de maíz, procedimientos que hacen que dicho sistema de cocimiento sea altamente ineficiente y se desperdicie una gran cantidad de energía. En el cocimiento de la tortilla se emplean máquinas donde la transferencia de energía es poco eficiente. Debido a lo anterior, se requiere que las nuevas tecnologías propuestas para la elaboración de tortillas de maíz presenten la mayor cantidad de ventajas posibles respecto al método tradicional de nixtamalización.

CAPÍTULO 4

4.0 ESTUDIOS ALTERNATIVOS AL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

A continuación se discuten algunas de las metodologías propuestas para la elaboración de tortillas de maíz.

Mendoza (1975) describe un método de cocimiento alcalino de harina de maíz utilizando vapor. El aparato consta de una cámara que en la parte inferior esta provista de un ventilador que permite tanto la circulación de aire como un movimiento constante de la harina (previamente mezclada con cal); el calor y el agua son suministrados de tal forma que el vapor de agua resultante permite humedecer la mezcla de harina-cal, llevándose a cabo de esta manera el cocimiento; posteriormente, la harina se transfiere a una cámara de enfriamiento y finalmente es molida.

Molina y col. (1977) reportaron la elaboración de harinas instantáneas cociendo y secando una mezcla de harina de maíz con agua (relación 1 a 3) y cal (0.3% p/p) en un doble tambor rotatorio. Las condiciones del proceso fueron: presión de 15,20 y 25 psi, alcanzando con ello temperaturas de 93, 99 y 104 °C, respectivamente, a 2, 3 y 4 rpm. En dicho estudio la harina instantánea fue hidratada y se elaboraron tortillas, encontrándose características fisicoquímicas y sensoriales similares a las tortillas obtenidas por el método tradicional.

Johnson y col. (1980) elaboraron harina instantánea por micronización, que es un método de procesamiento en seco utilizando quemadores de gas infrarrojo. Este procedimiento consiste en mezclar los granos de maíz prequebrados en solución diluida de calcio y posteriormente la mezcla se sometió a cocimiento por infrarrojo. El grano de maíz es cocido rápidamente desde su parte más interna hacia el exterior e inmediatamente los granos calientes son hojueados en rodillos corrugados de acero, enfriados y molidos hasta obtener la harina instantánea. Las pruebas de textura y rolabilidad efectuadas en las tortillas preparadas por micronización fueron comparables a las elaboradas a partir de una harina instantánea comercial.

Rubio (1981) diseñó una máquina para procesar grano de maíz a masa y después tortillas. En este proceso el maíz fue alimentado a un precalentador, en el que el calor fue suministrado a través de aire caliente ayudado por un ventilador, alcanzándose temperaturas de 135 a 150 °C en un periodo comprendido entre 12 y 18 min. Con esto se logró reducir el nivel de humedad y la ruptura de las capas externas del grano de maíz que permitieron una mejor difusión del agua. Al mismo tiempo las impurezas del grano fueron removidas por medio de un ciclón. El maíz fue pasado a un tanque en donde se roció con una suspensión de hidróxido de calcio, que rápidamente fue absorbida por el grano, modificando así la estructura de la cascarilla, permitiendo una mayor penetración del agua hasta alcanzar una humedad del 18 al 27 %. El grano humectado fue conducido a través de un tornillo transportador hacia un molino de martillos en donde fue molido y enviado por una banda secadora hacia un ciclón clasificador que envió a su vez partículas separadas hacia un cernidor. A partir de este proceso se obtuvieron harinas de buenas características. Concluyendo que este proceso es más eficiente que el tradicional, debido a que reduce el uso de agua, disminuye costos y dificultades en la remoción del agua, teniendo además una menor pérdida de sólidos.

Otro de los procesos que ha sido ampliamente estudiado para la transformación de maíz a harina instantánea, masa fresca y tortillas, es el de extrusión.

CAPÍTULO 5

5.0 EXTRUSIÓN

La extrusión es la generación y uso de un flujo continuo de materias primas para fabricar productos.

La palabra extrudir proviene del latín “extrudere” y significa empujar o presionar hacia fuera, expeler o expulsar (Enríquez, 1984). Los extrusores son equipos especializados que dan forma uniforme a los productos de manera continua, al forzar a los materiales sometidos al proceso de extrusión a fluir, por medio de un tornillo sin fin, a lo largo de un cilindro y pasar a través de un orificio, conocido como dado o boquilla. La mayor parte de los extrusores realizan el mezclado y la conversión de los materiales alimentados a éstos en masas manejables que puedan fluir a través de la boquilla.

5.1 ELEMENTOS Y FUNCIONAMIENTO DE LOS EXTRUSORES

En la figura 3 se muestran las partes más importantes de un extrusor sencillo. Se observa la tolva alimentadora, que permite proporcionar un flujo uniforme constante a la entrada del equipo. El tornillo o rotor es la parte central del extrusor que ejecuta las operaciones de mezclado, amasado, corte, cocimiento avance de material que se llevan a cabo dentro del cañón o cilindro y por último la boquilla que le da forma al producto final (Acosta, 1984).

El canal donde gira el tornillo, en la mayoría de los casos es una superficie cilíndrica que produce los esfuerzos cortantes en el material y sirve además como una superficie de transferencia de calor, ya sea para calentar o enfriar. Al generar calor por la fricción producida entre el material y las superficies metálicas del tornillo y del cañón o cilindro, es posible cocer la materia prima y finalmente obtener un producto precocido o cocido.

En el tornillo de un extrusor se distinguen como características principales: diámetro del tornillo, profundidad entre la base del tornillo y el interior del cañón así como la altura y el número de álabes.

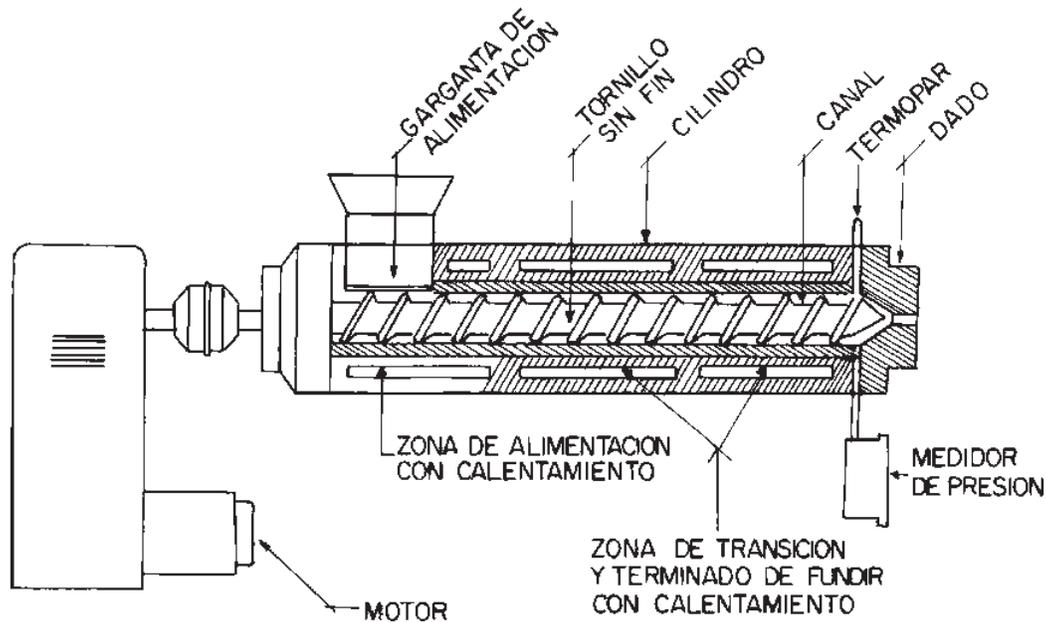


FIGURA 3. Elementos de un extrusor

Otra parte importante del extrusor es el barril, cañón o cilindro, que es donde se realiza el mezclado, corte del material y elevación de temperatura del producto que se está elaborando. El material impulsado por el rotor tiende a deslizarse a través del cañón, para regular ese deslizamiento se le agregan obstrucciones al cañón, que pueden ser ranuras con bordes filosos, pernos, etc. Al chocar el producto en proceso contra los pernos o bordes del cañón se aumenta el tiempo de residencia produce la fricción que eleva la temperatura y la presión hasta un valor predeterminado (Acosta, 1984).

A lo largo del cilindro y del tornillo se distinguen tres secciones (Harper, 1981).

1. La sección de alimentación, que está caracterizada por los alabes hondos, los cuales fácilmente aceptan los ingredientes crudos y los transportan hacia delante. 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.
2. La sección de compresión o alimentación, en el cual 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 alabes, 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 que resulta en un aumento en la temperatura.
3. La sección de medición o cocimiento, que es donde el flujo, la presión, compresión y la velocidad de corte son altos. Esta zona se caracteriza por tener una altura mucho menor de los alabes que en la zona de compresión. La masa termoplástica se transforma en una masa plástica. Como resultado de la conversión de la energía mecánica en energía térmica, la acción del corte en esta zona homogeniza y adiciona más calor a la mezcla. Esta zona es la más importante del extrusor. Su función es recibir el material, comprimirlo, homogeneizarlo 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 deseados al producto extrudido.

5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS EXTRUSORES

La clasificación de los extrusores se basa en diferentes criterios, por ejemplo, sobre la humedad del producto a extrudirse o bien sobre las características funcionales o termodinámicas del mismo proceso (Tribelhorn y Harper, 1980; Hauck y Ruber, 1989).

Tomando como referencia este último sistema de clasificación se tienen los siguientes tipos:

1. Autógeno.- En donde el calor se genera por la disipación de la energía mecánica. Algunos extrusores de cocimiento para la elaboración de frituras son de este tipo.
2. Isotérmico.- En donde el calor se controla mediante fuentes auxiliares a través de calentamiento o enfriamiento por chaquetas conectadas al barril. Extrusores moldeadores pertenecen a esta clase.
3. Politrópicos.- El calor generado proviene de una combinación de la disipación de la energía mecánica y fuentes auxiliares. La mayoría de los extrusores pertenecen a este tipo.

5.3 VARIABLES DE EXTRUSIÓN

La extrusión permite la interacción de diversos componentes, tales como el agua, el vapor y otros líquidos, así como sólidos, los que debe ser continua y uniformemente combinados. Algunas de las variables de la extrusión son la temperatura de las zonas de calentamiento, humedad de los materiales, velocidad del tornillo (rpm), velocidad de alimentación del material y granulometría de la harina (Chinnaswamy y Hanna, 1988), las cuales deben ser estrictamente controladas, evaluadas e interpretadas en relación al efecto que producen sobre las características de los materiales extrudidos.

5.3.1 FUNCIONES DE LOS EXTRUSORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Los extrusores en la industria alimentaria realizan las siguientes funciones (Harper, 1981):

1. Mezclan y homogenizan materias primas
2. Se producen para la: